

**Generación de bioenergía como estrategia aprovechamiento del potencial energético de
los residuos sólidos orgánicos en Colombia**

Natalia Delgado Sánchez

Asesor

José Daniel Ramos Hernández

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Administrativas, Contables, Económicas y de Negocios – ECACEN

Especialización en Gestión de Proyectos

2023

José Daniel Ramos Hernández

Jurado

Jurado

Resumen

La presente propuesta de monografía de investigación tiene como objetivo analizar de la bioenergía a partir de residuos sólidos orgánicos (RSO) como fuente de energía renovable y aprovechamiento su potencial energético en Colombia. El manejo y aprovechamiento de RSO representa un desafío ambiental y social que requiere de enfoques innovadores y sostenibles para su adecuada gestión.

En el marco conceptual y teórico, se explorarán conceptos clave relacionados con la bioenergía, la valorización de RSO y su potencial para ser transformados en energía renovable. Se analizarán diferentes tecnologías de conversión, que permiten obtener bioenergía a partir de los RSO.

El planteamiento del problema se centrará en la necesidad de buscar alternativas sostenibles para la gestión de RSO con el enfoque del aprovechamiento de su potencial energético. La bioenergía se presenta como una opción prometedora que podría transformar estos residuos en una fuente de energía renovable.

En el desarrollo de la investigación, se alcanzaron los objetivos específicos teniendo como resultados de la información analizada que el potencial de biogás en Colombia es considerable y hay varios sectores y proyectos en desarrollo que están contribuyendo a su aprovechamiento. Sin embargo, aún existe un gran potencial sin explotar, lo que ofrece oportunidades significativas para futuros desarrollos en este campo. Por otra parte, se compararon aspectos técnicos de los siguientes procesos Compostaje, Pirólisis, Digestión Anaeróbica, Gasificación, Incineración con Recuperación de Energía, en aras de considerar cual es la mejor alternativa. Como tercer resultado se toman los aprendizajes de países que ya han implementado tecnologías para aprovechar el potencial energético de los residuos orgánicos.

Se concluye en este trabajo investigativo que la bioenergía se presenta como una alternativa eficiente para abordar adecuadamente la gestión de los residuos al hacer énfasis en gestionar los residuos orgánicos puede ser un buen comienzo para afrontar la problemática, generando impactos positivos en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, desarrollo de la economía circular, beneficios sociales, ambientales y económicos.

Se recomienda para investigaciones próximas, la posibilidad del uso de estos resultados para el desarrollo de artefactos electrónicos y algoritmos que permitan la Inteligencias Artificiales Generativas, puedan realizar análisis predictivos que permitan una mejor toma de decisiones por parte de actores involucrados, en aras de integrar la tecnología e innovación en procesos convencionales como la gestión de residuos. Se espera que este estudio contribuya a la realización de investigaciones más profundas para lograr la implementación de tecnologías de generación de bioenergía en Colombia.

Palabras clave: Aprovechamiento de residuos, biomasa, digestión anaeróbica, energíarenovable

Abstract

The present research monograph proposal aims to analyze bioenergy from organic solid waste (OSW) as a source of renewable energy and to leverage its energy potential in Colombia. The management and utilization of OSW represent an environmental and social challenge that requires innovative and sustainable approaches for its proper handling.

In the conceptual and theoretical framework, key concepts related to bioenergy, the valorization of OSW, and their potential to be transformed into renewable energy will be explored. Various conversion technologies that enable the generation of bioenergy from OSW will be analyzed.

The problem statement focuses on the need to seek sustainable alternatives for the management of OSW, with an emphasis on leveraging their energy potential. Bioenergy emerges as a promising option that could transform these wastes into a renewable energy source.

In the development of the research, specific objectives were achieved, with the analyzed information revealing that the potential for biogas in Colombia is considerable. Several sectors and developing projects are contributing to its utilization. However, there remains a large, untapped potential, presenting significant opportunities for future developments in this field. Furthermore, technical aspects of the following processes were compared: Composting, Pyrolysis, Anaerobic Digestion, Gasification, and Incineration with Energy Recovery, to determine the best alternative. As a third outcome, lessons from countries that have already implemented technologies to harness the energy potential of organic waste were considered.

This research concludes that bioenergy is an efficient alternative for appropriately addressing waste management. Emphasizing the management of organic waste can be a good start to tackle the problem, generating positive impacts in reducing greenhouse gas emissions,

developing the circular economy, and yielding social, environmental, and economic benefits.

For future research, it is recommended to explore the use of these results for the development of electronic devices and algorithms that enable Generative Artificial Intelligences to perform predictive analyses, aiding better decision-making by stakeholders. This approach aims to integrate technology and innovation in conventional processes like waste management. This study is expected to contribute to more in-depth research for the implementation of bioenergy generation technologies in Colombia.

Keywords: Use of waste, biomass, anaerobic digestion, renewable energy

Tabla de contenido

Introducción	11
Descripción del Problema	17
Justificación	18
Objetivos	21
Objetivo General	21
Objetivos Específicos.....	21
Marco de Referencia	21
Estado del arte.....	22
Marco teórico	26
Elaboración de constructos	27
Marco Conceptual	30
1. Biomás.....	31
2. Estrategias de conversión de biomasa.....	31
3. Biogás.....	33
4. Digestión anaerobia.....	33
Hidrolisis.....	34
Acidogénesis o fermentación	35
Acetogénesis	35
Metanogénesis.....	36
5. Biorreactor.....	37
Metodología	38
Tipo de investigación.....	38

FASE I. Revisión de la información	38
FASE II. Categorización de la información.....	38
Resultados	39
Primer resultado desarrollo primer objetivo	39
Segundo resultado desarrollo segundo objetivo	40
Tercer resultado desarrollo tercer objetivo	43
Análisis de resultados	45
Gestión de Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia.....	45
Potencial de Aprovechamiento de Residuos y Generación de Biogás.....	45
Producción de Biogás a partir de Residuos Orgánicos	46
Importancia de la Gestión Efectiva de Residuos Orgánicos	46
Conclusiones	47
Referencias Bibliográficas	49

Lista de Tablas

Tabla 1 *Tiempo de vida útil de los sistemas de disposición autorizados en Colombia 202113*

Lista de Figuras

Figura 1 *Nombre de la Figura* 9

Figura 2 *Nombre de la Figura* 9

Figura 3 *Nombre de la Figura* 9

Introducción

El manejo adecuado de los residuos se viene convirtiendo en un tema de gran interés a nivel mundial porque representa un problema recurrente en la gestión ambiental de nuestro planeta. En este sentido, se observa que en Latinoamérica y el Caribe enfrenta un desafío significativo en lo que respecta a la gestión integral de residuos sólidos urbanos. Cada habitante en esta área genera en promedio 1 kg de residuos al día, lo que se traduce en una asombrosa cantidad de 541.000 toneladas de residuos diarios (ONU Medio Ambiente, 2018), pero lo más alarmante es que esta cifra está en constante aumento y se espera que ascienda a un 25% para el año 2050, llegando a alcanzar las 671.000 toneladas diarias (ONU Medio Ambiente, 2018), si mantenemos la tasa de generación actual.

Es importante destacar que más del 50% de los residuos urbanos generados son orgánicos. Esto significa que existe un gran potencial para implementar prácticas de gestión de residuos más sostenibles como el compostaje y la generación de energía a partir de su biomasa para reducir la cantidad de residuos que se destinan a los vertederos; se disponen 145.000 toneladas diarias de residuos a rellenos, incluyendo 17.000 toneladas diarias de desechos plásticos, lo que contribuye a la contaminación del entorno (ONU Medio Ambiente, 2018).

En este orden de ideas, se observa que en Colombia durante el año 2021 se gestionaron un promedio de 33.939 Ton/día de residuos sólidos en todo el territorio nacional como parte del servicio público de aseo, esta cifra representa un aumento del 4.16% con respecto a las cantidades manejadas en el año 2020 (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), 2023). Este incremento evidencia la importancia de una gestión eficiente y sostenible de los residuos sólidos.

Este incremento en la generación de residuos se debe a una serie de factores globales que están afectando a la región. Entre ellos, el crecimiento de la población, la tendencia creciente hacia la urbanización, que ya afecta al 80% de la población de Latinoamérica y el Caribe, el crecimiento económico, la transición de una gran cantidad de personas de la pobreza a una emergente clase media y los patrones de consumo y producción insostenibles relacionados con una economía lineal (ONU Medio Ambiente, 2018).

En Colombia, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios) ha categorizado los sistemas de disposición final de residuos sólidos en dos grupos desde 2008: sistemas autorizados y sistemas no autorizados.

Los **sistemas autorizados** incluyen el "relleno sanitario", que es un lugar diseñado técnicamente y operado de manera controlada para la gestión de desechos sólidos sin riesgos para la salud pública ni el medio ambiente. También se considera la "celda de contingencia", que permite a los municipios utilizar un sitio previamente autorizado como celda transitoria en un proyecto de relleno sanitario bajo ciertas condiciones establecidas por las autoridades ambientales.

Por otro lado, los **sistemas no autorizados** comprenden la "celda transitoria", que inicialmente se construye para una capacidad limitada y no puede usarse después de un cierto período, y el "botadero a cielo abierto", que acumula residuos sin cumplir con las normas vigentes y presenta riesgos para la salud y el medio ambiente según las regulaciones.

En el transcurso de 2021, se logró detectar un total de 266 lugares designados para la disposición final de residuos en Colombia. Esto representó una reducción de 15 sitios en comparación con el año anterior, lo que equivale a una disminución del 5.34% con respecto a

2020 de lugares para hacer disposición de residuos. En cuanto a la clasificación de estos lugares para el año 2021, se dividen de la siguiente manera: 165 se consideran rellenos sanitarios, 77 se catalogan como vertederos a cielo abierto y además se cuentan con 12 celdas de contingencia y otras 12 celdas temporales. Esta información refleja la diversidad de enfoques y métodos utilizados en el manejo de residuos sólidos en el país durante ese período (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), 2023). A continuación, se expone el lapso de vida útil que presentan los sistemas de disposición autorizados en el país.

Tabla 1 *Tiempo de vida útil de los sistemas de disposición autorizados en Colombia 2021*

Vida útil	Cantidad de sitios regionales	Cantidad de sitios locales o unitarios	Total por rango
Vencida	1	17	18
(0 - 3] años	10	20	30
(3 - 6] años	16	18	34
(6 - 9] años	10	19	29
Más de 9 años	34	31	65
Sin información	-	2	2
N/A	1	87	88
Total sitios	72	194	266

Nota: Tomado de (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2021)

Analizando la información extraída del Informe Nacional De Disposición Final De Residuos Sólidos de 2021 (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), 2023), a la fecha se tenían 18 lugares de disposición operando excediendo el tiempo de vida útil para el cual fue diseñado, otros 30 estaban operando con entre 0 y 3 años de vida útil, junto con 34 lugares con menos de 6 años de operación restante, adicional a ello se tiene que del total de los 266 sitios de disposición 88 son lugares no autorizados, siendo estos un 33% de los espacios de disposición final, haciendo la sumatoria entre los lugares no autorizados y aquellos que ya culminaron o están cerca del límite de su vida útil se tiene que cerca del 64% de los lugares

donde se da la disposición final en Colombia, ya sea de sitios autorizados o no están cercanos a cumplir su vida útil u operan en incumplimiento de la normativa y los requerimientos técnicos, adicional y no menos importante, los impactos ambientales como emisiones de gases efecto invernadero, contaminación de acuíferos, riesgo por incendios, propagación de vectores, afectaciones respiratorias y cutáneas en las poblaciones cercanas entre otros (Cárdenas-Valbuena et al., 2022).

En Colombia para el año 2021, se gestionaron un promedio de 33,939 Ton/día de residuos sólidos en todo el territorio nacional según los reportes del SUI y teniendo en cuenta que aproximadamente el 61% de los desechos producidos por la población colombiana son de naturaleza orgánica y considerando que en el año 2019 se gestionaron alrededor de 11.5 millones de toneladas de residuos urbanos en el Colombia, (Ministerio de Vivienda & Banco Mundial, 2021), se estima que aproximadamente 7 millones de toneladas corresponden a residuos sólidos orgánicos. Es fundamental resaltar que la fracción orgánica de los residuos guarda una estrecha relación con la producción de gases de efecto invernadero en el ámbito de la gestión de residuos, ya que su descomposición libera emisiones de metano y dióxido de carbono a la atmósfera, según lo señalado en un informe del (Javier et al., 2023)

El panorama tanto de generación de residuos, como las cifras importantes en el estado actual de los rellenos sanitarios y la continuidad de su funcionamiento, presenta dos condiciones críticas que acrecientan la problemática de la gestión y manejo de los residuos sólidos, lo que lleva a la búsqueda de alternativas eficientes para abordar adecuadamente la gestión de los residuos, por lo que al analizar las fracciones generadas y su potencial de aprovechamiento, hacer énfasis en gestionar los residuos orgánicos puede ser un buen comienzo para afrontar la problemática de la gestión de los residuos sólidos, puesto que se

disminuirían considerablemente el volumen de residuos a disponer en los vertederos, se contribuiría a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, se reducirían otros impactos ambientales, y la búsqueda de alternativas de aprovechamiento eficiente que genere ganancias ambientales y económicas, entre otros beneficios. Al abordar esta problemática teniendo en cuenta los componentes técnicos, normativos, inclusión de desarrollos tecnológicos e innovación, con el enfoque de economía circular, se puede encontrar una alternativa que aporte una solución a esta problemática y a su vez represente una ganancia ambiental, social y económica.

Tomando en cuenta que la producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos se ubica en un rango estimado de 21 a 65 metros cúbicos de gas metano por cada tonelada de residuos orgánicos, según un estudio realizado por (Al-Addous et al., 2018), podemos realizar un cálculo aproximado para determinar la cantidad de biogás generado en los rellenos sanitarios de Colombia en el año 2019. Si tomamos en consideración la cantidad de residuos sólidos orgánicos dispuestos en los rellenos sanitarios durante ese período, se calcula que se generaron entre 147 y 246 millones de metros cúbicos de biogás (Ministerio de Vivienda & Banco Mundial, 2021).

Este valor representa una estimación significativa de la producción de biogás a partir de los residuos orgánicos en el país durante ese año.

Este dato subraya la importancia de gestionar de manera efectiva los residuos sólidos orgánicos y aprovechar su potencial para la generación de biogás, lo que no solo contribuye a la mitigación del impacto ambiental de los rellenos sanitarios, sino que también ofrece una fuente de energía renovable valiosa.

Contextualización

En el panorama colombiano, la implementación de la bioenergía derivada de residuos sólidos orgánicos (RSO) se enfrenta a varios desafíos significativos que requieren atención meticulosa para su superación. Primordialmente, la infraestructura existente se muestra insuficiente para manejar de manera efectiva la recolección, transporte y procesamiento de los RSO, lo que subraya la necesidad de una inversión sustancial en este sector (Devia & Vidales, 2023). Adicionalmente, la falta de tecnología avanzada y de personal calificado en el ámbito de la bioenergía representa un obstáculo considerable, limitando las capacidades de innovación y eficiencia en el tratamiento y conversión de los residuos en energía. Otro reto notable es la consecución de financiamiento, especialmente para tecnologías emergentes o en etapas experimentales, lo que a menudo se ve agravado por un marco regulatorio poco claro o la ausencia de políticas específicas y incentivos que fomenten el desarrollo de la bioenergía (Vera-Acevedo & Raufflet, 2022). Además, la conciencia y participación pública en la segregación y el manejo adecuado de los RSO es crucial, ya que una deficiente gestión de estos puede limitar la disponibilidad de materia prima de alta calidad para la producción de bioenergía. Finalmente, se debe asegurar que la producción de bioenergía no entre en conflicto con otras necesidades de uso del suelo ni contribuya a la degradación ambiental, manteniendo un enfoque en la sostenibilidad ambiental (French-Davis, 2019). Estos desafíos requieren una estrategia integrada y multifacética que aborde tanto las necesidades tecnológicas como las socioeconómicas y ambientales.

En Colombia, la transformación de residuos sólidos orgánicos (RSO) en bioenergía presenta una gama de oportunidades prometedoras, fundamentales para fomentar un desarrollo sostenible y diversificado. El país se caracteriza por su significativo potencial en RSO, atribuible a su rica biodiversidad y condiciones climáticas favorables, lo que le confiere una ventaja única

para la producción de bioenergía. Esta conversión de residuos en energía no solo contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con los objetivos globales de mitigación del cambio climático, sino que también impulsa el desarrollo sostenible a través de la generación de empleo y la promoción de una economía circular (Naciones Unidas, 2021). Adicionalmente, la bioenergía puede desempeñar un papel crucial en la mejora de la seguridad energética del país, diversificando las fuentes de energía y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. Este escenario presenta una oportunidad invaluable para la innovación y la adopción de tecnologías avanzadas en el campo de la bioenergía. Paralelamente, la implementación de proyectos de bioenergía puede ser un catalizador para la educación ambiental y la sensibilización de la población, promoviendo prácticas sostenibles y una mayor conciencia sobre la gestión de residuos. Además, se abre un horizonte para la cooperación internacional, que puede facilitar el intercambio de tecnologías, conocimientos y recursos financieros, esenciales para el avance de la bioenergía en el contexto colombiano (Naciones Unidas, 2021). En suma, la adopción de la bioenergía a partir de RSO no solo aborda los desafíos ambientales y energéticos, sino que también traza un camino hacia el progreso económico y social.

Se prevé que la proporción de energía renovable en el suministro total de energía primaria aumente significativamente, pasando del 14% en el año 2015 al 63% para el año 2050 (Gielen et al., 2019). Este cambio representa un importante avance hacia un sistema energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, ya que las fuentes de energía renovable contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Este aumento en la participación de las energías renovables refleja el creciente interés en la transición hacia fuentes de energía sustentables. La energía renovable puede satisfacer dos tercios de la demanda energética total mundial y contribuir a la mayor parte de las emisiones de gases de

efecto invernadero (Nava Escudero, 2016). Reducción que se necesita de aquí a 2050 para limitar el aumento de la temperatura media de la superficie mundial por debajo de 2 °C objetivo pactado en el Acuerdo de París (Nava Escudero, 2016). Colombia ratificó el Acuerdo de París en 2016 y se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% por debajo de los niveles proyectados para 2030 (De Pinto et al., 2018). Este compromiso se conoce como la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por sus siglas en inglés). para alcanzar esta meta ambiciosa se han hecho esfuerzo como: la estrategia nacional de cambio climático; política de economía circular; reducción de la deforestación; participación en iniciativas internacionales; promoción del transporte sostenible; adaptación al cambio climático; dentro de estas iniciativas y compromisos también se encuentran los programas de energías renovables, en los que Colombia ha implementado programas para fomentar el desarrollo de fuentes de energía renovable, como la energía solar y eólica. Estos programas buscan aumentar la participación de las energías limpias en la matriz energética del país (Corficolombiana & Casa de Bolsa, 2023). Siendo las energías solar y eólica las que tienen un mayor avance en dicha matriz, por lo que se abre un espacio para la investigación y estudio de la energía a partir de biomasa.

En el año 2050, la biomasa por sí sola desempeñaría un papel crucial al representar aproximadamente dos tercios del uso directo de energía renovable. Esto abarca aplicaciones modernas como la calefacción por biomasa y los biocombustibles líquidos. En términos de energía primaria, el suministro anual de bioenergía se duplicaría en comparación con los niveles actuales, alcanzando aproximadamente 116 exajulios por año (116 EJ/yr) (Gielen et al., 2019).

Siendo la unidad "EJ/yr" utilizada para medir cantidades de energía a una escala

extremadamente grande. Un exajulio (EJ) equivale a un quintillón de julios, lo que representa una cantidad de energía colosal. Para ponerlo en perspectiva, el consumo mundial total de energía en el año 2019 se situó en torno a los 600 exajulios (600 EJ) (Renewable Energy Agency, 2019). Este consumo abarcó todas las formas de energía, como la electricidad, el petróleo, el gas natural, la energía solar, la energía eólica y otras fuentes. La bioenergía desempeñará un papel esencial en el impulso de las energías renovables hacia un futuro más sostenible y en la reducción de nuestra dependencia de fuentes de energía no renovables.

Este panorama frente a la problemática del manejo de residuos que es permanente y de gran magnitud, representa una oportunidad de igual condición definitiva y de gran impacto, que puede ser abordada con una solución de impacto, la generación de energía renovable a partir de biomasa residual; esta monografía busca documentar la técnica de digestión anaeróbica, que es el método más común para la transformación de materia orgánica en gas metano; y cómo podría implementarse en el contexto Colombiano.

Descripción del Problema

En la actualidad, la generación de residuos sólidos orgánicos representa un desafío importante para la gestión adecuada y disposición final de los residuos sólidos, en Colombia se producen un promedio de 33,939 Ton/día (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2021), de este volumen se calcula que 61 % corresponde a orgánicos (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), 2023), es decir cerca de 7.5 millones Ton/año de residuos orgánicos, teniendo estos un alto potencial de aprovechamiento que se pierde al no clasificarse y disponerse en los rellenos sanitarios.

La gestión inadecuada de residuos sólidos orgánicos en Colombia tiene impactos ambientales, sociales y económicos significativos. En términos ambientales, la disposición inadecuada de residuos sólidos orgánicos puede contaminar el aire, el agua y el suelo, y contribuir al cambio climático a través de la emisión de gases de efecto invernadero. En términos sociales, la gestión inadecuada de residuos sólidos orgánicos puede afectar la salud pública, la calidad de vida de las comunidades cercanas a los vertederos y la biodiversidad. En términos económicos, la gestión inadecuada de residuos sólidos orgánicos puede generar costos significativos para los gobiernos locales y nacionales, y limitar el potencial de desarrollo económico y social de las comunidades.

Entre los desafíos específicos que enfrenta Colombia en cuanto a la gestión de residuos sólidos orgánicos se encuentran la falta de infraestructura adecuada para la recolección, transporte y disposición final de los residuos, la falta de conciencia ambiental de la población, y la falta de políticas públicas efectivas para la gestión de residuos. Además, la falta de financiamiento y la falta de incentivos para la adopción de prácticas sostenibles son otros desafíos que enfrenta el país en este ámbito.

Paralelamente, la creciente demanda de energía y la necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles no renovables plantean la urgencia de buscar alternativas sostenibles para la generación de energía. En este contexto, la bioenergía surge como una opción prometedora que puede convertir los residuos sólidos orgánicos en una fuente de energía renovable (Vera et al., 2017)

La bioenergía se presenta como una solución sostenible y viable para abordar la problemática de la gestión de residuos sólidos orgánicos en Colombia. La bioenergía permite transformar los residuos en una fuente de energía renovable y reducir su impacto ambiental. Además, la bioenergía puede generar beneficios económicos y sociales para las comunidades locales, a través de la creación de empleo y la generación de ingresos.

Sin embargo, a pesar del potencial de la bioenergía a partir de residuos sólidos orgánicos, aún persisten desafíos y limitaciones en su **implementación a gran escala**. Estos pueden incluir tecnologías de conversión ineficientes, barreras regulatorias y financieras, falta de infraestructuras adecuadas y resistencia social. Por lo tanto, es fundamental realizar un análisis exhaustivo de las perspectivas de la bioenergía y su viabilidad para abordar la crisis de residuos, identificando tanto sus beneficios como las limitaciones que deben superarse.

Justificación

El buen manejo y aprovechamiento de los RSO representa un desafío ambiental, técnico, económico y social, ya que dar solución a esta problemática o ineficiencia de los procesos requiere de soluciones innovadoras y sostenibles.

En este contexto, la bioenergía obtenida a partir de residuos sólidos orgánicos se presenta como una alternativa prometedora y relevante para abordar tanto la problemática de la gestión de residuos como la necesidad de transitar hacia fuentes de energía más limpias y renovables.

La conversión de estos residuos en energía renovable, como el biogás y el bioetanol, no solo reduciría la presión sobre los rellenos sanitarios, sino que también proporcionaría una fuente de energía local y sostenible que podría contribuir a la seguridad energética y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Vera et al., 2017). Considerando que la generación de biogás a partir de los residuos sólidos orgánicos se estima entre 21 y 65 m³ por tonelada (Al- Addous et al., 2018), se puede calcular que para el año 2019 se generaron entre 147 y 246 millones de metros cúbicos de biogás en los rellenos sanitarios del país. (MADS, 2020)

Tabla 2 *Potencial energético de la biomasa por sectores*

Sector	RSO (ton/año)	Participación (%)	Potencial energético (Tj/año)	Participación potencial energético (%)
Agrícola	71.943.813	40.5%	331.646	73.7%
Pecuario	105.418.066	59.4%	117.748	26.2%

Residuos sólidos urbanos(*)	165.021	0.1%	410	0.1%
TOTAL	177'526.900	100%	499.803	100%

* estimación realizada para residuos de centros de abastos, plazas de mercado y

Nota: tomado de (Ministerio de Vivienda & Banco Mundial, 2021; Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios., 2020)

Se puede observar en la tabla que existe gran potencial energético en la biomasa residual generada en el país, esta obtención de energía se puede lograr a través de distintos mecanismos, mas para este caso se estudiara la digestión anaeróbica como un método sencillo que proporciona la naturaleza, realizado por microorganismos que al ingerir y metabolizar los diferentes compuestos orgánicos da como producto una mezcla de gases compuesta principalmente por metano, así como una fracción sólida con alta carga orgánica con alto potencial de uso como abono orgánico, puesto que los diferentes sustratos y minerales están más fácilmente disponibles para ser absorbidos en el medio natural.

Sin embargo, a pesar del creciente interés en la bioenergía a partir de residuos sólidos orgánicos, existen desafíos y barreras que deben abordarse para su implementación. Es fundamental investigar y analizar estas limitaciones, que pueden incluir aspectos tecnológicos, económicos, regulatorios y sociales, para poder desarrollar estrategias eficientes y efectivas que permitan aprovechar plenamente el potencial de esta fuente de energía renovable.

Esta monografía de investigación tiene como objetivo analizar la información académica y empresarial en la implantación de digestión anaeróbica para la obtención de bioenergía a partir de residuos sólidos orgánicos, proporcionando una evaluación objetiva de

las perspectivas de la bioenergía como solución para la crisis de residuos. Se espera que los hallazgos de esta investigación contribuyan a una gestión más eficiente y sostenible de los recursos naturales y energéticos a nivel local, regional y nacional, proponiendo soluciones viables para enfrentar la crisis de residuos y avanzar hacia un modelo energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. La justificación de este estudio radica en su relevancia para la sociedad, el medio ambiente y la búsqueda de una economía más circular y basada en fuentes de energía renovable.

Metodología de investigación

Para la construcción de esta monografía se tuvo un enfoque de investigación mixto, donde se combinó métodos cuantitativos y cualitativos, permitiendo explorar tanto las dimensiones numéricas como las interpretativas del tema.

La Investigación Cuantitativa, se implementó con el objetivo de medir y analizar datos numéricos relacionados con la bioenergía en Colombia, como la cantidad de residuos sólidos orgánicos generados, la capacidad de generación de bioenergía, las emisiones de gases de efecto invernadero reducidas, entre otros. Los métodos de Recolección de Datos, fueron a partir del uso de estadísticas oficiales, datos de organismos gubernamentales y ONGs, informes de empresas de gestión de residuos y energía, entre otros.

Se hizo uso de la metodología de la Investigación Cualitativa con el objetivo de Comprender las percepciones, opiniones y experiencias de los involucrados en la gestión de residuos y la producción de bioenergía. El método de recolección de datos fue a partir de estudios de caso en proyectos de bioenergía, análisis de políticas y legislaciones, y revisión de literatura académica y reportes de investigación.

Importancia de la investigación

La investigación sobre la bioenergía a partir de residuos sólidos orgánicos (RSO) en Colombia es de gran importancia y relevancia en los contextos local, regional y nacional, y sus hallazgos podrían ser fundamentales en la futura toma de decisiones y formulación de políticas públicas. A nivel local, este estudio puede ofrecer soluciones prácticas y sostenibles para la gestión de residuos, un desafío urbano y rural crítico. La transformación de RSO en bioenergía puede proporcionar un modelo para reducir la acumulación de desechos en vertederos y mitigar los problemas ambientales asociados, al tiempo que aumenta la conciencia y fomenta la participación comunitaria en prácticas de sostenibilidad.

En el ámbito regional, la investigación puede resaltar cómo la bioenergía de RSO contribuye al desarrollo sostenible, equilibrando las necesidades económicas, ambientales y sociales. Puede servir como un modelo replicable para otras regiones con características geográficas y socioeconómicas similares, promoviendo estrategias de manejo de residuos y producción de energía adaptadas a diferentes contextos. A nivel nacional, el estudio puede contribuir a la diversificación de las fuentes de energía de Colombia, mejorando la seguridad energética y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. Además, los hallazgos pueden informar y moldear políticas públicas relacionadas con la gestión de residuos y la energía renovable, alineando a Colombia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, especialmente en áreas como energía limpia, ciudades sostenibles, acción climática y economía circular.

Los resultados de la investigación proporcionan evidencia empírica que es crucial para la toma de decisiones informadas por parte de legisladores, empresas y organizaciones no gubernamentales. Pueden incentivar la inversión en tecnologías de bioenergía y en la infraestructura necesaria para su implementación, además de servir como base para la

colaboración entre el sector público, el sector privado y la academia. Al identificar tendencias, desafíos y oportunidades, la investigación puede ayudar a preparar a Colombia para responder de manera proactiva a los desafíos futuros en el ámbito de la gestión de residuos y la producción de energía renovable. En resumen, este estudio tiene el potencial de influir significativamente en cómo Colombia aborda los desafíos ambientales y energéticos, proporcionando un marco para políticas más sostenibles y efectivas que beneficien tanto a las comunidades locales como al país en su conjunto.

Objetivos

Objetivo General

Analizar la generación de bioenergía como estrategia aprovechamiento del potencial energético de los residuos sólidos orgánicos en Colombia

Objetivos Específicos

1. Establecer el estado actual del potencial energético en la biomasa residual producida en Colombia
2. Identificar las tecnologías más adecuadas para transformar los residuos sólidos orgánicos en bioenergía, considerando aspectos técnicos y económicos.
3. estudiar casos exitosos de bioenergía a partir de digestión anaeróbica de RSO aplicables a Colombia.

Marco de Referencia

Estado del arte

Se construye el estado del arte con base en investigaciones internacionales y nacionales para evidenciar el estado actual de la digestión anaeróbica como alternativa para el manejo y aprovechamiento de los residuos orgánicos. Esto le permite tener una visión que va desde lo global a lo local, permitiendo trazar un camino hacia soluciones asequibles, adaptar soluciones existentes y/o explorar nuevos caminos basándose en lo que otros han aprendido en el pasado.

Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago

Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables (Ávila-Hernández et al., 2018).

Objetivo: Realizar una demostración del proceso de biodigestión, cuyas reacciones bioquímicas son llevadas a cabo por distintas familias de microorganismos en cuatro etapas.

Muestras: El estudio de generación se llevó a cabo mediante el pesaje diario de los residuos sólidos biodegradables generados en la soda institucional del Tecnológico de Costa Rica (TEC), durante cinco días. Para la determinación de la composición química de estos residuos, se tomó una muestra compuesta y se envió al Laboratorio del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) y, posteriormente, se procedió al análisis de la información.

Resultado: El promedio de residuos biodegradables fue de 229,16 kg por día. Este

podría variar dependiendo del menú que se establezca. Los porcentajes de pérdidas de las tres áreas principales que se miden en un comedor o restaurante fueron las siguientes: el 2% de residuos sólidos biodegradables totales generados, surgieron de descartes en bodegas, el 26% a partir de residuos de preparación comestibles, el 43% a residuos de preparación no comestibles (como

cáscaras, semillas y otras porciones no comestibles), y un 29% provino de los desperdicios dejados en platos.

Conclusiones: Al realizar el estudio de generación en el comedor institucional del TEC, se determina que el promedio de residuos sólidos biodegradables es 229,16 kg por día. El análisis del laboratorio respecto a la evaluación química de los residuos reporta que la relación de C/N es baja y es la esperada para este tipo de residuos, que es aproximadamente 14:1.

Además, el porcentaje de materia orgánica es superior al 50 %, siendo otro valor esperado en la investigación. La mezcla que dio mejor resultados durante la experimentación fue la hecha con el **Índigo®**. Se inició la generación del biogás en el **día nueve** y mantuvo durante todo el tiempo de retención en el biodigestor. Así mismo, considerando los costos evitados por su uso, genera un efecto positivo en costos de almacenamiento y acarreo, ya que es un producto concentrado que sedosifica en pequeñas cantidades. Además, la temperatura durante el proceso de digestión anaeróbica se mantuvo en el rango mesofílico, el cual va de los 20 °C a los 40 °C para los cuatro tratamientos. La experimentación tuvo un valor mínimo de 21,8 °C reportado en el biodigestor que contuvo, únicamente, residuos. La máxima temperatura se dio en la mezcla con pasto la cual fue de 31,6 °C. En conclusión, tratando localmente los residuos biodegradables mediante la digestión anaerobia, se puede ampliar la vida útil de los rellenos sanitarios, reducir la contaminación por lixiviados infiltrados en mantos acuíferos y cuerpos receptores, disminuir las emisiones de CO₂ e, y aprovechar el producto (biogás) como fuente de energía renovable.

Utilización de residuos sólidos orgánicos para el desarrollo de Biogás

González B, P. (2022, octubre). Utilización de residuos sólidos orgánicos para el desarrollo de biogás. Scielo web of science. Recuperado 10 de octubre de 2023, de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9092/4/5552342-2022-2-GA.pdf>

Objetivo: Evaluar tecnologías para el aprovechamiento sostenible de residuos sólidos orgánicos para la producción de biogás en Bogotá.

Muestras: Luego de conocer los diferentes tipos de residuos provenientes de las plazas de mercado existentes en la ciudad de Bogotá. mediante un estudio realizado se obtuvieron valores de que el 88.5% de los residuos generados en ton/días por estas son precisamente orgánicos, valor que da la pauta para la selección del mejor biodigestor.

Resultado: Identificar todos los desechos sólidos orgánicos son 8.1 toneladas/ día en lugares el mercado, de los cuales el 88.5% corresponde a los desechos vegetales (verduras, frutas y verduras), material suficiente para la producción de biogás. 8 biodigestores se comparan de acuerdo con la investigación actual diferentes tecnologías corresponden a domo permanente, domo flotante, estructura flexible, flujo industrial, horizontal y horizontal de fogador, eventos y combinación completa, cada una con otros.

Conclusiones: Se ha encontrado que la mejor tecnología para el uso de residuos sólidos orgánicos es el biodigestor de estructura flexible de bajo costo buen mantenimiento y producción biométrica, materiales económicos de construcción con luz tomar el control, el tamaño apropiado y la capacidad móvil, fácil de instalar, lograrlo con la cantidad de residuos obtenidos, hay una cantidad óptima de biogás para su uso esto es necesario en el mercado,

principalmente en la ciudad de Bogotá.

Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana

Cadavid, L. S., & Bolaños, I. V. (2015, diciembre). Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. redalyc.

Recuperado 10 de octubre de 2023, de <https://www.redalyc.org/pdf/1470/147043932004.pdf>

Objetivo: El potencial bioquímico de metano de residuos de frutas y verduras y de los residuos de poda de una ciudad colombiana intermedia (Palmira, Colombia), se estudiaron con el fin de analizar su potencial para producir energía renovable.

Muestras: En esta investigación todas las muestras fueron tomadas de forma representativa y en fresco. Los residuos de frutas y verduras (FV) fueron colectados en una plaza de Mercado y un supermercado típicos de la ciudad de Palmira, Valle del Cauca. Se tomaron muestras representativas durante una semana, sin incluir alimentos cocidos, el material se tomó fresco y se refrigeró a 4°C en el laboratorio. Una vez colectado todo el material, se redujo su tamaño en un procesador de alimentos con el fin de homogenizarlo y aumentar su área superficial. En cuanto al residuo de poda, se definió un muestreo representativo por áreas en las zonas verdes del campus principal de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. La muestra compuesta del residuo de poda se sometió a secado en campo por un día y luego se trituró en un molino de fibra hasta obtener una longitud de fibra de 2 mm de largo. Además se investigó el manejo de la poda de las zonas verdes de la ciudad de Palmira con la alcaldía municipal.

Resultado: El potencial bioquímico de metano final de los residuos frutas y verduras

fue de 0,710 m³CH₄/ kg S Vadicionado, el cual es 2 veces mayor al obtenido para los residuos de poda. Después de 60 días se observó una remoción de sólidos volátiles de 48% y 44% para los residuos de frutas y verduras y de residuos de poda, respectivamente. Además, para los residuos de poda se encontró una remoción importante de celulosa, baja para la hemicelulosa y muy pobre para la lignina. Si se sometieran a digestión anaerobia la totalidad de los residuos de frutas y verduras y de poda que se produce en la ciudad de Palmira al año, sería posible producir 5.489 MWh de energía térmica ó 3.295 MWh de energía eléctrica. Los resultados muestran que la digestión anaerobia podría ser una alternativa viable y sostenible para el manejo y disposición de los residuos de frutas y verduras y los de poda, en los municipios colombianos, con la posibilidad adicional de producir energía renovable para cocinar, iluminación o como combustible para vehículos.

Conclusiones: Se estudió el potencial para producir energía renovable en forma de metano a partir de residuos de frutas y verduras y de poda de zonas verdes, para el municipio de Palmira (Colombia). Se observó que diferencias en la composición química de los residuos orgánicos producen diferencias importantes en el potencial de metano de los mismos. Dado que el rendimiento de metano de ambos residuos evaluados está por encima de 0.3 m³/kg SVadicionado, pueden considerarse como buenos sustratos para la producción comercial de metano. El presente estudio muestra que la digestión anaerobia, le ofrece la oportunidad al municipio de Palmira de, manejar de una forma ambientalmente segura sus residuos orgánicos y, además, obtener beneficios económicos a través de la producción de energía renovable. Modelo que podría ser replicado en otros municipios del país.

Marco teórico

Elaboración de constructos

Tema de investigación: el análisis de la generación de bioenergía a partir de residuos sólidos orgánicos (RSO) como fuente de aprovechamiento de la fracción orgánica.

Pregunta de investigación: ¿Cuál de los biorreactores anaerobios será el más apto para implementar como sistema de aprovechamiento de residuos orgánico, así como para la producción de biogás?

En aras de dar respuesta a la problemática del Desaprovechamiento del potencial energético y mal manejo de los residuos sólidos orgánicos, se busca analizar la generación de bioenergía a partir de residuos sólidos orgánicos (RSO) como fuente de aprovechamiento su potencial energético y dar un manejo eficiente a la fracción orgánica; en este orden de ideas se inicia la búsqueda de investigaciones previas tomando como punto de partida a (Khalid et al., 2011) que ha sido una de las investigaciones más consultadas, centrada en el proceso de digestión anaeróbica considerándola como una de las opciones más viables para el reciclaje de la fracción orgánica de los residuos sólidos. Los autores proporcionan una visión general amplia de la digestibilidad y el rendimiento de producción de energía (biogás) y las configuraciones del digester para alcanzar el mejor rendimiento.

Siendo este estudio orientador para los fines de la presente investigación, se amplían los conceptos de Digestión anaerobia y tipos de reactores, biogás a partir de biomasa residual.

La digestión anaerobia es un proceso biológico fundamental en el que los microorganismos, en su mayoría bacterias, llevan a cabo la degradación de materia orgánica

enambientes carentes de oxígeno. Uno de los grupos de bacterias más destacados involucrados eneste proceso son los metanógenos. A través de la digestión anaerobia, estos microorganismos descomponen compuestos orgánicos complejos y generan una mezcla de productos finales, que incluye metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y cantidades mínimas de otros gases. (Palau,2016)

Este proceso ha sido aprovechado por el ser humano durante más de un siglo, especialmente en la producción de biogás a partir de desechos orgánicos, para ello se han desarrollado biodigestores anaerobios proporcionan un entorno controlado donde se pueden mantener las condiciones adecuadas para que los microorganismos anaerobios realicen la digestión de la materia orgánica de manera eficiente. Estas condiciones suelen incluir una temperatura óptima, un pH adecuado y una mezcla constante para garantizar que los microorganismos tengan acceso a los sustratos orgánicos (Khalid et al., 2011) La digestión anaerobia pasa por diferentes fases en función de los compuestos que se degradan y complejomicrobiano (Fernández Rodríguez et al., 2016)

En la búsqueda de eficiencia del proceso se han diseñado diferentes reactores:

Tabla 3

Tipos de biorreactores de digestión anaeróbica.

Tipo de	Tipo de	Tasa de	Comentarios
biorreactor	sustrato	carga	
		orgánica	
		(kg/m³ /d)	

Biorreactor	Residuos	2.6	Se observó una
discontinuo de	hortofrutícolas y aguas		disminución en la
secuenciación	residuales de matadero		producción de biogás
anaeróbica			debido a la alta cantidad
			de amoníaco libre a una
			alta tasa de carga
			orgánica (OLR)
Reactores de	Residuos	15	El reactor mostró
tanque con agitación	sólidos urbanos		un rendimiento de
continua			proceso superior a
			medida que el OLR
			aumentó

Tipo de biorreactor	Tipo de sustrato	Tasa de carga orgánica (kg/m³/d)	Comentarios
			progresivamente hasta 15 kg/m ³ /d
Digestor anaeróbico a gran escala	Desperdicio de alimentos industriales	17	Se observó un rendimiento de metano de 360 l/kg de residuos de pienso con un tiempo de retención de 40 días.
Reactor biológico integrativo	Desperdicios de cocina	8.0	El reactor biológico integrativo mostró el mejor rendimiento y la tasa de producción de biogás fue mayor que el reactor único.
Reactores semicontinuos a escala de laboratorio	Residuos sólidos urbanos y agua de prensa de la planta municipal de compostaje	20	El rendimiento del reactor para la producción de biogás fue mayor hasta 20 OLR, pero un mayor aumento

			en OLR no afectó la producción de biogás.
Nuevo biorreactor de lecho fluidizado anaeróbico floculante a base de almidón	Efluentes de aguas residuales tratados primariamente con o sin contaminantes orgánicos refractarios	43	La eficiencia y la actividad microbiana a OLR alto fueron mayores que las del biorreactor anaeróbico de lecho fluidizado convencional.
Biorreactor con filtro de malla de tambor giratorio	Residuos sólidos urbanos	15	El reactor demostró ser estable y útil para mezclar los desechos a OLR alto, lo que generalmente no es posible en digestores agitados mecánicamente.
Digestores anaerobios automezclables	Camada de aves	16	Se observó automezcla con OLR alto y alta biometanización de

Tipo de biorreactor	Tipo de sustrato	Tasa de carga orgánica (kg/m³/d)	Comentarios
			la cama de aves de corral.
Biorreactor de membrana anaeróbica sumergida	Lodos de depuradora, residuos de alimentos y aguas residuales ganaderas	1.8	El reactor mostró un rendimiento inestable durante la etapa inicial, pero tuvo un rendimiento superior después de la formación de aclimatación.
Digestor anaeróbico semicontinuo de dos fases	Aguas residuales de almazara y residuos sólidos de almazara	14	Se observó el mejor desempeño en términos de productividad de metano, eficiencia de eliminación de DQO soluble y fenol y calidad del efluente.
Reactor anaeróbico de producción de	Residuo orgánico	3.0	En comparación con un reactor metanogénico de una

hidrógeno y metano
de dos etapas.

sola etapa, se logró un
11% más de energía

Biorreactor
anaeróbico de estado
sólido de flujo
ascendente

Mezcla de
ensilaje de maíz y paja.

17

El reactor de la
UASS mostró el mayor
rendimiento
metanogénico para la
digestión de biomasa
sólida

Nota. Tabla con los diferentes tipos de biorreactores utilizados para la digestión

anaeróbica. Fuente: Khalid et al., 2011

La investigación realizada por (Khalid et al., 2011) sirven como punto de partida para el análisis sobre los distintos reactores y cual de ellos sería el más óptimo para implementar en el contexto del aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos.

Marco Conceptual

En esta monografía se adentra en el marco conceptual que subyace en como la digestión anaerobia de residuos orgánicos urbanos, puede representar una alternativa para la gestión y aprovechamiento de estos, por ello resulta fundamental explorar sus fundamentos teóricos y los procesos involucrados.

1. Biomas

La biomasa se define como "la materia orgánica originada en un proceso biológico ya sea espontáneo o inducido, que puede ser aprovechada como una valiosa fuente de energía." (Real Academia Española, n.d.) Esta materia orgánica abarca una amplia gama de recursos biológicos, desde residuos agrícolas y forestales hasta cultivos energéticos y desechos orgánicos urbanos, que pueden ser transformados en diversas formas de energía, como biogás, bioetanol, biodiesel y calor, contribuyendo así a la diversificación de fuentes de energía y a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles (Pham et al., 2015).

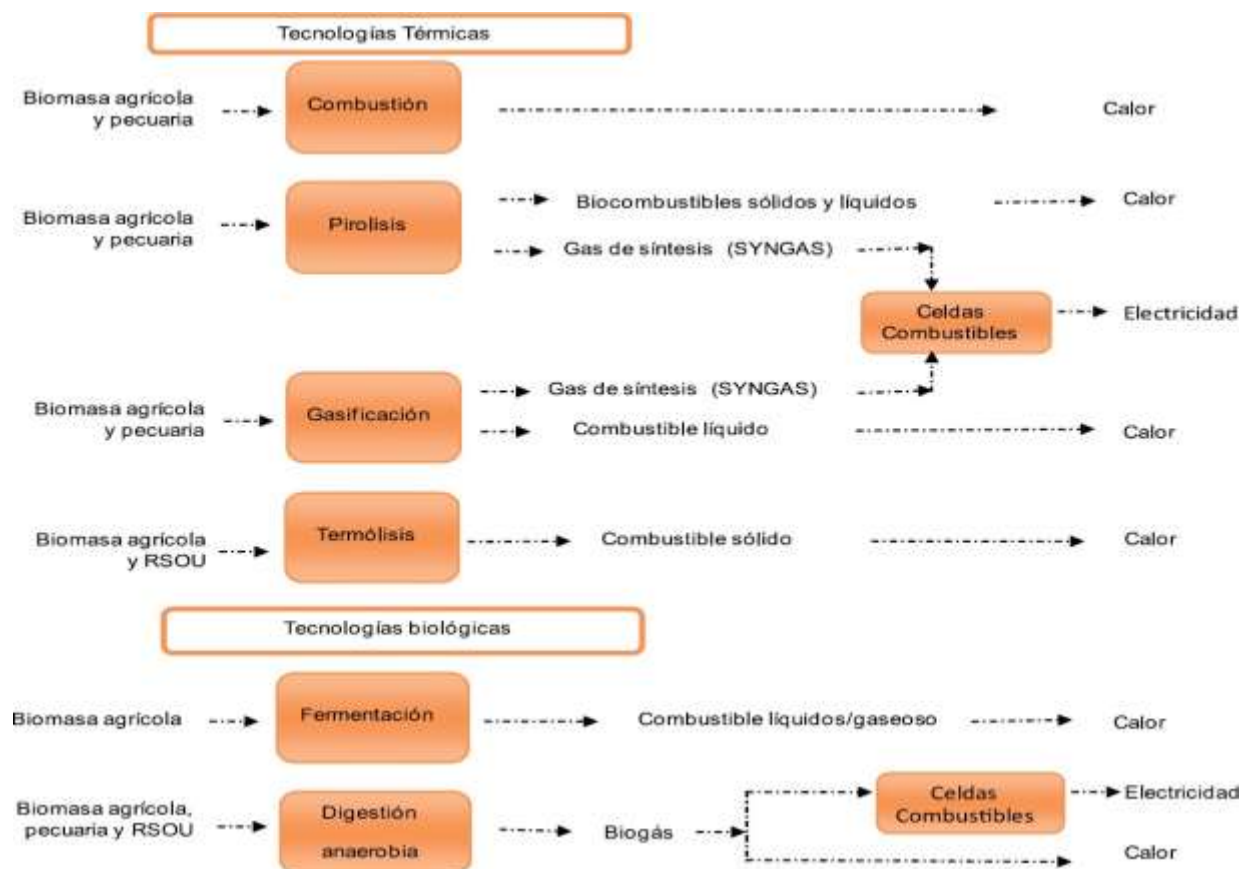
En la normatividad colombiana encontramos la Ley 1715 de 2014, donde se define la biomasa como "una fuente no convencional de energía renovable que se basa en la degradación espontánea o inducida de cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico y toda materia vegetal originada (sic) por el proceso de fotosíntesis, así como de los procesos metabólicos de los organismos heterótrofos, y que no contiene o hayan estado en contacto con trazas de elementos que confieren algún grado de peligrosidad" (Ley 1715 de 2014, 2014)

2. Estrategias de conversión de biomasa

La biomasa en sí misma no es una fuente de energía ya que debe ser convertida o transformada para obtener su potencial energético. Hay varias maneras de lograr esto, ilustradas en la Figura 1

Figura 1

Procesos de conversión de la biomasa



Fuente. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2014)

La figura muestra diversas formas de aprovechamiento de la biomasa, destacando la digestión anaerobia como un proceso clave para la obtención de biogás, el objetivo principal

de este proyecto. Es importante señalar que, según el tipo de biomasa, se requiere un proceso de transformación específico para obtener energía. El método utilizado determinará el producto final, que puede ser líquido, como gasolina, diésel o bioetanol, o gaseoso, como syngas o biogás (Tong et al., 2018); siendo el tema central de esta investigación la producción de biogás.

3. Biogás

Se trata de un gas generado mediante la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno, es decir, la materia se descompone y se transforma a través de un proceso conocido como digestión anaerobia (Pham et al., 2015). Incluye alrededor del 50% al 70% de metano (CH_4), entre el 30% y el 40% de dióxido de carbono (CO_2), así como proporciones menores de otros gases, como nitrógeno (N_2) e hidrógeno (H_2). Además, el biogás puede contener impurezas como azufre (S_2) o siloxanos, dependiendo de la materia prima empleada (Pham et al., 2015) que para el caso de es

Tabla 4

Composición química para los residuos orgánicos municipales

Componente	Residuos Orgánicos Municipales
Metano	50 - 70%
CO_2	30 - 50 %
Hidrogeno	0 - 2 %
H_2S	0 - 8%
Amoniaco	trazas
CO	0 - 1%
N	0 - 1%
O	0 - 1%

Fuente. (Pham et al., 2015)

4. Digestión anaerobia

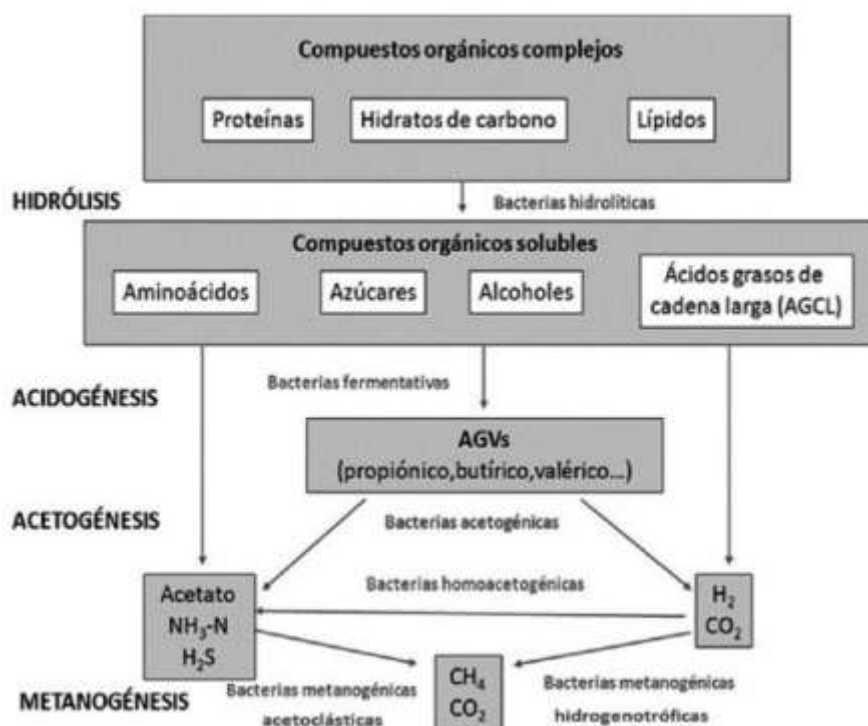
La digestión anaerobia es un proceso de fermentación microbiana que ocurre en condiciones de ausencia de oxígeno. Este proceso produce una combinación de gases, principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), que se conoce como biogás, además de una suspensión acuosa o lodo que contiene microorganismos responsables de descomponer la materia orgánica. La materia prima que se puede someter a este tratamiento incluye cualquier tipo de biomasa residual que tenga un alto contenido de humedad (Palau, 2016).

El resultado principal de este procedimiento es el biogás, el cual consta de una combinación de metano (en un rango del 50% al 70%) y dióxido de carbono (que oscila entre el 30% y el 50%), junto con pequeñas cantidades de otros elementos como nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), hidrógeno (H_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). La composición precisa del biogás varía dependiendo tanto de la materia prima empleada como del proceso mismo. Además, el residuo sólido remanente, conocido como "biol," puede ser aprovechado como fertilizante para el suelo o como alimento para animales (Palau, 2016).

La digestión anaerobia se da a través de las cuatro etapas siguientes

Figura 2

Etapas de la digestión anaerobia



Fuente. (Fernández Rodríguez et al., 2016)

Hidrolisis

En la primera etapa de la digestión anaerobia, los compuestos no solubles, como la celulosa, las proteínas y las grasas, se vuelven solubles y se descomponen en monómeros gracias a enzimas liberadas por bacterias hidrolíticas que operan fuera de sus células, lo que se conoce como exoenzimas. La hidrólisis de carbohidratos ocurre en un período corto, generalmente unas pocas horas, mientras que la de proteínas y lípidos puede requerir varios días para completarse. La lignocelulosa y la lignina se degradan de manera lenta e incompleta en esta etapa (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2019).

Acidogénesis o fermentación

“Los monómeros formados en la fase hidrolítica son tomados por diferentes bacterias facultativas y anaerobias estrictas, y degradados a ácidos orgánicos de cadena corta; moléculas de ácido butírico (C₄H₈O₂), ácido propiónico (C₃H₆O₂), acetato ([C₂H₃O₂]-) y ácido acético (CH₃COOH); alcoholes; H₂ y CO₂. La concentración de los iones de H₂

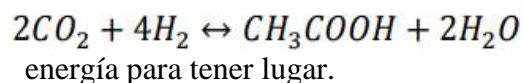
intermediamente formados afecta a los productos de la fermentación”.

(FernándezRodríguez et al., 2016)

Aunque las bacterias acidogénicas descomponen la materia orgánica, esta sigue siendo demasiado grande e inapta para la producción de metano (CH₄), por lo que es necesario que la biomasa atraviese el proceso de acetogénesis (Fernández Rodríguez et al., 2016)

Acetogénesis

Los productos generados durante la acidogénesis se convierten en sustratos esenciales para las bacterias que operan en la etapa de acetogénesis. Las reacciones acetogénicas son de carácter endergónico, lo que significa que requieren una aportación de



En la fase acetogénica, microorganismos como *D. desulfuricans*, *D. termitidis* y *D. multivorans*, conocidos como homoacetogénicos, realizan de manera constante la reducción de H₂ y CO₂ para producir ácido acético (Acosta, 2019).

Las bacterias acetogénicas tienen la capacidad de producir hidrógeno (H₂). La conversión de ácidos grasos de cadena larga en acetato se lleva a cabo de manera autónoma, es

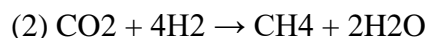
decir, sin necesidad de energía adicional, y, por lo tanto, es termodinámicamente factible solo cuando la presión parcial de hidrógeno es muy baja. Esto significa que las bacterias acetogénicas pueden satisfacer sus necesidades de energía y crecimiento con concentraciones extremadamente bajas de H₂ (Acosta, 2019).

Por esta razón, es fundamental que los microorganismos acetogénicos y los productores de metano coexistan en una relación simbiótica. Es importante destacar que los organismos metanogénicos solo pueden prosperar en condiciones de altas presiones parciales de hidrógeno. (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2019)

Metanogénesis

Tomando la base teórica de (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2019) En la fase final, se produce la formación de metano (CH₄) en condiciones estrictamente anaeróbicas, lo que significa que ocurre sin la presencia de oxígeno. Esta reacción es exergónica, lo que implica que libera energía durante su realización. Dos vías principales están involucradas en la producción de metano en el proceso de metanogénesis, y ambas utilizan como sustrato dos de los principales productos generados en las etapas anteriores de la biodigestión: dióxido de carbono (CO₂) y acetato (CH₃COOH).

La primera reacción implica la conversión de CO₂ y hidrógeno (H₂) en metano (CH₄) y agua (H₂O), según la ecuación (2):



La segunda reacción transforma el acetato (CH₃COOH) en metano (CH₄) y CO₂, según la ecuación (3): (3) CH₃COOH → CH₄ + CO₂

Aunque la conversión de CO₂ en metano y agua es posible, el mecanismo principal para la producción de metano implica la reacción que usa acetato (Ecuación 3). Esta reacción genera metano y CO₂, que son los productos principales de la digestión anaerobia.

Para llevar a cabo estas etapas, se requiere una estructura diseñada específicamente para este propósito, denominada biodigestor, cuyo funcionamiento se explicará en detalle a continuación.

5. Biorreactor

Los biorreactores son dispositivos o estructuras diseñadas para llevar a cabo el proceso de digestión de diversos residuos orgánicos con el propósito de generar biogás, que puede ser utilizado como combustible, y un residuo orgánico concentrado rico en nutrientes conocido como biofertilizante (Vera et al., 2017). Estos biorreactores suelen presentar formas cúbicas o cilíndricas y se construyen empleando diversos materiales como ladrillos, cemento, acero o plástico. Además, son diseñados para ser impermeables al agua y sellados herméticamente para evitar la entrada de oxígeno, ya que la digestión anaerobia se lleva a cabo en ausencia de este gas (Vera et al., 2017).

La elección del tipo de biodigestor depende de varios factores, incluyendo la cantidad de gas requerida, las características del terreno y el presupuesto disponible (Jacobo et al., 2019).

Existen varios tipos de biodigestores, cada uno con particularidades relacionadas con la cantidad de residuos orgánicos disponibles, el tiempo de retención hidráulico y el espacio disponible para su instalación. Entre los tipos más comunes se encuentran los de domo fijo, los de domo flotante,

los de flujo de enchufe, el tipo tubular y los de flujo discontinuo, entre otros (Jacobo et al.,2019).

6. Tipos de Residuos Sólidos Orgánicos

Residuos de Alimentos: Incluyen restos de comida y desperdicios de cocinas, tanto de hogares como de restaurantes y servicios de catering. Son ricos en biomasa y tienen un alto potencial de metanización. Su tratamiento requiere separación de contaminantes como plásticos y metales.

Residuos Agrícolas: Constituidos por residuos de cosechas (paja, tallos), estiércol animal, y desechos de procesamiento agrícola. Estos residuos tienen un alto potencial de biogás, pero su composición varía estacionalmente, lo que puede afectar la producción de biogás.

Lodos de Aguas Residuales: Producidos en plantas de tratamiento de aguas residuales, contienen materia orgánica que puede ser digerida anaeróbicamente. Su manejo es desafiante debido a su alto contenido de agua y posibles contaminantes.

Residuos de Jardinería y Parques: Comprenden hojas, césped y ramas. Aunque son biodegradables, su composición lignocelulósica requiere pretratamientos para mejorar su biodegradabilidad.

Residuos Industriales Orgánicos: Subproductos de industrias como la alimentaria y de bebidas. A menudo son ricos en nutrientes y materia orgánica, pero pueden contener sustancias que inhiben la digestión anaeróbica.

7. Procesos de Pretratamiento y Separación

Trituración y Homogeneización: Reducir el tamaño de los residuos facilita su manejo y aumenta la superficie disponible para la acción microbiana, mejorando la eficiencia de

la digestión.

Separación de Contaminantes: Es esencial para evitar daños a los equipos y mejorar la calidad del biogás. Se utilizan técnicas como tamizado, separación magnética y flotación.

Hidrólisis Ácida: Pretratamiento químico que descompone los polímeros complejos en azúcares más simples, facilitando su fermentación. Es especialmente útil para residuos lignocelulósicos.

Acondicionamiento de pH y Temperatura: Mantener condiciones óptimas es crucial para el crecimiento de microorganismos metanogénicos. El pH generalmente se ajusta entre 6.5 y 7.5, y las temperaturas óptimas varían según el tipo de digestor (mesofílico o termofílico).

8. Costos Asociados

Costos de Capital: Incluyen la construcción de digestores anaeróbicos y sistemas de pretratamiento. Los costos varían según la tecnología y la capacidad de la planta.

Costos Operativos: Incluyen energía, mantenimiento, mano de obra y tratamiento de los digestatos. Estos costos son recurrentes y dependen del tamaño y eficiencia del sistema.

Costos de Logística: Son significativos, especialmente en áreas urbanas donde la recolección y transporte de residuos representa un desafío logístico y económico.

9. Estrategias de Financiamiento

Subvenciones Gubernamentales y Ayudas: Pueden cubrir una parte significativa de los costos iniciales, facilitando la implementación de proyectos.

Inversiones del Sector Privado: Empresas interesadas en sostenibilidad o responsabilidad social corporativa pueden ser fuentes de financiamiento.

Créditos y Préstamos Verdes: Ofrecidos por bancos y otras instituciones financieras, estos préstamos suelen tener condiciones favorables para proyectos de energía renovable.

Programas de Incentivos: Como tarifas preferenciales por la energía generada o créditos de carbono, que pueden mejorar la viabilidad económica de los proyectos.

Estos elementos proporcionan un marco comprensivo para entender y desarrollar proyectos de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos, destacando la importancia de una planificación y gestión eficaz en todas las etapas del proceso.

Metodolo

gía Tipo de investigación – MONOGRAFÍA

El tipo de Investigación que vamos a utilizar para nuestro proyecto será la recopilación y comparación de estudios de investigación, anteriormente desarrollados, sobre la bioenergía a partir de residuos sólidos orgánicos (RSO) como fuente de aprovechamiento y su potencial energético en Colombia, esto nos permitirá evaluar la información o datos de múltiples fuentes y generar un análisis completo sobre el tema, los cuales serán descritos a continuación.

FASE I. Revisión de la información

Iniciamos la búsqueda de información referente a la obtención de energías alternativas a partir de residuos orgánicos en Colombia, esas búsquedas conforman el estado del arte del proyecto, para asegurar la selección de buenas fuentes de información se utilizaron las bases de datos como Scielo y redalyc.

FASE II. Categorización de la información

La segunda fase consistió en la categorización de la información, esta se realizó por medio de una compilación de la información obtenida en la primera fase a través de la cual se identifican cada una de las técnicas de investigación aplicadas en cada uno de los documentos seleccionados.

Resulta

dos Primer resultado desarrollo primer objetivo

1. Establecer el estado actual de la bioenergía a partir de residuos sólidos orgánicos y su contribución como fuente de energía renovable.

El potencial de generación de biogás en Colombia a partir de biomasa es significativo y presenta un área de oportunidad amplia para el desarrollo de energías renovables. Aunque la industria de biogás y biometano en Colombia se encuentra aún en una etapa temprana, hay varios proyectos en marcha para implementarlos como recursos renovables, lo que indica un futuro promisorio para estos energéticos. Los departamentos con mayor disponibilidad de biogás en Colombia son Antioquia, Cundinamarca, Valle del Cauca, Meta, Santander, Casanare, Cesar, Atlántico, Bolívar, Risaralda y Cauca. El potencial de generación de biogás a partir de las biomásas residuales en estos departamentos se estima en 10.447 terajulios/año, lo cual equivale al 8% de la energía suministrada por el gas natural en 2012. (Semana, s. f.)

El biogás en Colombia se genera principalmente a partir de materia orgánica como residuos agrícolas, desechos de alimentos y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Este recurso está disponible de manera continua y abundante, lo que lo convierte en una opción sostenible a largo plazo. Además, es una fuente de energía limpia, ya que su combustión produce bajas emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos comparado con los combustibles fósiles. (Semana, s. f.)

Sectores como la caña de azúcar, la industria de palma de aceite, y el sector porcicultor están contribuyendo al desarrollo del biogás en Colombia. Por ejemplo, la industria de palma de aceite produce biogás a partir de la digestión anaerobia de aguas residuales de plantas extractoras de aceite de palma, alcanzando una producción de 133 millones de metros

cúbicos/año. En el sector porcicultor, se produce biogás con residuos orgánicos (porcinaza), procesando 1.200 toneladas de efluentes por día y generando 576.000 kW/mes. Además, hay iniciativas en el sector agroindustrial, como la industria cervecera y láctea, que están aprovechando la materia orgánica para producir biogás. (Semana, s. f.)

En cuanto a proyectos específicos, hay al menos 10 proyectos en Colombia que generan 40MW a partir de la biomasa, impulsados por estímulos de la Ley 1715. Esta ley y otras regulaciones, como la Resolución 240 de 2016, establecen un marco legal para el desarrollo de proyectos de biogás y biometano. (Semana, s. f.)

A pesar de estos desarrollos, se estima que el 59% del potencial de biogás en Colombia aún no se ha explotado. Esto indica una amplia área de oportunidad para futuros proyectos de generación de biogás en el país. (Semana, s. f.)

En cuanto a proyectos programados para 2023 y 2024, SER Colombia reporta que hay 80 proyectos de energía renovable no convencional en marcha, aunque la mayoría son de energía solar y solo dos son proyectos de energía eólica, lo que sugiere un enfoque limitado en el biogás dentro de este grupo específico de proyectos. (Semana, s. f.)

En resumen, el potencial de biogás en Colombia es considerable y hay varios sectores y proyectos en desarrollo que están contribuyendo a su aprovechamiento. Sin embargo, aún existe un gran potencial sin explotar, lo que ofrece oportunidades significativas para futuros desarrollos en este campo. (Semana, s. f.)

Segundo resultado desarrollo segundo objetivo

3. Identificar las tecnologías de conversión más adecuadas para transformar los residuos sólidos orgánicos en bioenergía, considerando aspectos técnicos y

económicos.

La elección de la tecnología para la conversión de residuos sólidos orgánicos en bioenergía depende de diversos factores, incluyendo la composición de los residuos, la escala del proyecto, los recursos disponibles y los objetivos económicos. Aquí te presentamos algunas tecnologías comunes, considerando aspectos técnicos y económicos:

Digestión Anaeróbica:

Descripción Técnica: Proceso biológico en el cual microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando biogás (principalmente metano y dióxido de carbono) y un residuo digerido.

Aspectos Técnicos: Eficiente para materiales ricos en contenido orgánico. Requiere control de temperatura, pH y tiempo de retención.

Aspectos Económicos: La inversión inicial puede ser moderada a alta, pero los ingresos derivados de la venta de biogás y subproductos pueden hacer que la operación sea rentable.

Gasificación:

Descripción Técnica: Conversión térmica de materia orgánica en un gas combustible (syngas) en presencia de oxígeno limitado.

Aspectos Técnicos: Puede gestionar una variedad de residuos orgánicos, pero requiere tecnologías más complejas y un control preciso.

Aspectos Económicos: La inversión inicial suele ser más alta, pero puede generar ingresos significativos si se utiliza para la generación de energía.

Pirólisis:

Descripción Técnica: Descomposición térmica de materia orgánica en ausencia

deoxígeno para producir biochar, aceite pirolítico y gas.

Aspectos Técnicos: Adecuada para diversos residuos orgánicos y tiene un tiempo de proceso relativamente corto.

Aspectos Económicos: La inversión inicial puede ser moderada, y los ingresos pueden provenir de la venta de productos derivados como el biochar y el aceite pirolítico.

Compostaje:

Descripción Técnica: Proceso biológico aeróbico que descompone los residuos orgánicos en compost, un material rico en nutrientes.

Aspectos Técnicos: Es una opción más sencilla en comparación con otras tecnologías, pero requiere espacio y gestión adecuada.

Aspectos Económicos: Puede ser una opción más económica en términos de inversión inicial, y los ingresos pueden provenir de la venta de compost.

Incineración con Recuperación de Energía:

Descripción Técnica: Quema controlada de residuos sólidos orgánicos con recuperación de calor para generar electricidad o calor.

Aspectos Técnicos: Eficiente en la reducción de volumen de residuos y generación de energía.

Aspectos Económicos: La inversión inicial puede ser alta, pero la venta de electricidad o calor puede ser una fuente de ingresos.

La elección entre estas tecnologías dependerá de la situación específica, considerando la disponibilidad de recursos, las características de los residuos, los incentivos gubernamentales y los objetivos del proyecto. Un análisis detallado de viabilidad, que tenga en cuenta tanto los aspectos técnicos como los económicos, es esencial para tomar

decisiones informadas. (Tecnológico De & Rica, 2018)

La elección de la digestión anaeróbica como la mejor alternativa para la conversión de residuos sólidos orgánicos (RSO) en bioenergía, en comparación con otras tecnologías como la gasificación, pirólisis, compostaje, e incineración con recuperación de energía, se basa en varios aspectos técnicos y económicos que la hacen particularmente atractiva. A continuación, se detallan las razones que pueden hacer de la digestión anaeróbica la opción más adecuada:

Ventajas Técnicas de la Digestión Anaeróbica

- **Flexibilidad en la Gestión de Residuos:** La digestión anaeróbica es eficiente en el manejo de una amplia gama de residuos orgánicos, incluyendo residuos de alimentos, lodos de aguas residuales y residuos agrícolas, lo cual la hace adaptable a diferentes contextos y necesidades de gestión de residuos.
- **Producción de Biogás:** El biogás producido (principalmente metano y dióxido de carbono) es una fuente de energía versátil que puede utilizarse para generar electricidad, calor o incluso ser refinado y utilizado como biocombustible.
- **Generación de Subproductos Útiles:** Además del biogás, el proceso genera un residuo digerido (digestato) que puede ser utilizado como fertilizante, enriqueciendo su valor añadido.
- **Control Ambiental:** La digestión anaeróbica se lleva a cabo en condiciones controladas, lo que minimiza las emisiones de olores y reduce el impacto ambiental en comparación con procesos como la incineración.
- **Reducción de la Huella de Carbono:** Al capturar el metano (un potente gas de efecto invernadero), la digestión anaeróbica contribuye a la mitigación del cambio climático.

Ventajas Económicas de la Digestión Anaeróbica

- **Ingresos por Venta de Biogás y Digestato:** La posibilidad de generar ingresos a través de la venta de biogás y del digestato como fertilizante mejora la rentabilidad del proyecto.
- **Incentivos Gubernamentales y Subsidios:** En muchos lugares, existen incentivos para la producción de energías renovables, lo que puede incluir subvenciones o tarifas preferenciales para la energía generada a partir de biogás.
- **Costos Operativos Relativamente Bajos:** Una vez establecida, la planta de digestión anaeróbica puede tener costos operativos más bajos en comparación con tecnologías como la gasificación o la incineración, que requieren más energía y mantenimiento.
- **Viabilidad en Diversas Escalas:** La digestión anaeróbica puede ser implementada tanto en pequeña como en gran escala, lo que la hace adecuada para una amplia gama de aplicaciones, desde comunidades rurales hasta grandes centros urbanos.

Se puede concluir diciendo que la digestión anaeróbica se destaca como una opción tecnológica eficiente y económicamente viable para la conversión de residuos sólidos orgánicos en bioenergía. Su capacidad para manejar una variedad de RSO, junto con la producción de biogás y digestato como subproductos útiles, la hace una opción atractiva. Además, su contribución a la sostenibilidad ambiental y la posibilidad de adaptarse a diferentes escalas y contextos la convierten en una solución prometedora para la gestión de residuos y la producción de energía renovable.

Tercer resultado desarrollo tercer objetivo

3. Analizar proyectos exitosos de bioenergía a partir de RSO en diferentes contextos geográficos aplicables a Colombia.

Hasta el momento no se tiene acceso a información sobre proyectos específicos de bioenergía a partir de residuos sólidos orgánicos (RSO) exitosos en Colombia, Sin embargo, se pueden presentar ejemplos generales de proyectos exitosos de bioenergía en diversas ubicaciones que podrían ofrecer lecciones valiosas para aplicar en el contexto colombiano. (Vargas-Pineda et al.,2019).

-Proyecto de Biogás en Alemania:

Contexto Geográfico: Alemania es líder en la implementación de tecnologías de biogás.

Descripción del Proyecto: Plantas de biogás han sido instaladas en granjas y plantas de tratamiento de aguas residuales para convertir residuos orgánicos en biogás. Este biogás se utiliza para generar electricidad y calor.

Lecciones para Colombia: Se podría considerar la implementación de sistemas similares en zonas rurales con una alta concentración de actividades agrícolas y ganaderas.

- Proyecto de Digestión Anaeróbica en Estados Unidos:

Contexto Geográfico: Estados Unidos ha implementado diversas iniciativas de gestión de residuos.

Descripción del Proyecto: Plantas de digestión anaeróbica han sido utilizadas en

áreas urbanas para procesar residuos orgánicos y producir biogás y fertilizantes.

Lecciones para Colombia: Este enfoque podría ser relevante para las ciudades colombianas que buscan gestionar sus residuos orgánicos de manera sostenible y generar energía.

-Proyecto de Compostaje Energético en Japón:

Contexto Geográfico: Japón ha implementado tecnologías avanzadas para el manejo de residuos.

Descripción del Proyecto: Sistemas de compostaje controlados se utilizan para producir calor, que a su vez se utilizan para generación de energía.

Lecciones para Colombia: Este enfoque podría aplicarse en comunidades donde la generación de calor puede ser aprovechada para necesidades locales, como calefacción en invernaderos o instalaciones industriales

- Proyecto de Biogás en India:

Contexto Geográfico: India ha adoptado tecnologías de biogás en áreas rurales.

Descripción del Proyecto: Pequeñas instalaciones de biogás se han utilizado en comunidades rurales para gestionar residuos orgánicos y proporcionar una fuente de energía descentralizada.

Lecciones para Colombia: Este modelo podría adaptarse en áreas rurales colombianas donde la electrificación es un desafío y hay una abundancia de residuos orgánicos.

Es importante destacar que cada contexto geográfico tiene sus propias características y desafíos específicos, por lo que cualquier iniciativa en Colombia debe tener en cuenta factores como la infraestructura existente, la disponibilidad de recursos y la participación de la comunidad. Además, el apoyo gubernamental y la colaboración entre sectores público y privado suelen ser clave para el éxito de proyectos de bioenergía. (Vargas-Pineda et al., 2019).

Análisis de resultados

Gestión de Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia

En Colombia para el año 2021, se gestionaron un promedio de 33,939 Ton/día de residuos sólidos en todo el territorio nacional según los reportes del SUI y teniendo en cuenta que aproximadamente el 61% de los desechos producidos por la población colombiana son de naturaleza orgánica y considerando que en el año 2019 se gestionaron alrededor de 11.5 millones de toneladas de residuos urbanos en el Colombia, (Ministerio de Vivienda & Banco Mundial, 2021), se estima que aproximadamente 7 millones de toneladas corresponden a residuos sólidos orgánicos. Es fundamental resaltar que la fracción orgánica de los residuos guarda una estrecha relación con la producción de gases de efecto invernadero en el ámbito de la gestión de residuos, ya que su descomposición libera emisiones de metano y dióxido de carbono a la atmósfera, según lo señalado en un informe del (Javier et al., 2023).

Potencial de Aprovechamiento de Residuos y Generación de Biogás

El panorama tanto de generación de residuos, como las cifras importantes en el estado actual de los rellenos sanitarios y la continuidad de su funcionamiento, presenta dos condiciones críticas que acrecientan la problemática de la gestión y manejo de los residuos sólidos, lo que lleva a la búsqueda de alternativas eficientes para abordar adecuadamente la gestión de los residuos, por lo que al analizar las fracciones generadas y su potencial de aprovechamiento, hacer énfasis en gestionar los residuos orgánicos puede ser un buen comienzo para afrontar la problemática de la gestión de los residuos sólidos, puesto que se

disminuirían considerablemente el volumen de residuos a disponer en los vertederos, se contribuiría a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, se reducirían otros impactos ambientales, y la búsqueda de alternativas de aprovechamiento eficiente que genere ganancia ambientales y económicas, entre otros beneficios. Al abordar esta problemática teniendo en cuenta los componentes técnicos, normativos, inclusión de desarrollos tecnológicos e innovación, con el enfoque de economía circular, se puede encontrar una alternativa que aporte una solución a esta problemática y a su vez represente una ganancia ambiental, social y económica.

Producción de Biogás a partir de Residuos Orgánicos

Tomando en cuenta que la producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos se ubica en un rango estimado de 21 a 65 metros cúbicos de gas metano por cada tonelada de residuos orgánicos, según un estudio realizado por (Al-Addous et al., 2018), podemos realizar un cálculo aproximado para determinar la cantidad de biogás generado en los rellenos sanitarios de Colombia en el año 2019. Si tomamos en consideración la cantidad de residuos sólidos orgánicos dispuestos en los rellenos sanitarios durante ese período, se calcula que se generaron entre 147 y 246 millones de metros cúbicos de biogás (Ministerio de Vivienda & Banco Mundial, 2021).

Este valor representa una estimación significativa de la producción de biogás a partir de los residuos orgánicos en el país durante ese año.

Importancia de la Gestión Efectiva de Residuos Orgánicos

Este dato subraya la importancia de gestionar de manera efectiva los residuos sólidos orgánicos y aprovechar su potencial para la generación de biogás, lo que no solo contribuye a la mitigación del impacto ambiental de los rellenos sanitarios, sino que también ofrece una

fuentes de energía renovable valiosas.

La gestión inadecuada de residuos sólidos orgánicos (RSO) en Colombia conlleva una serie de impactos ambientales, sociales y económicos significativos, al tiempo que plantea desafíos específicos que afectan tanto al bienestar general como al desarrollo sostenible del país. El tratamiento y manejo ineficiente de estos residuos tiene consecuencias directas y puede ser un factor limitante para la explotación de su potencial energético en la forma de bioenergía.

Impactos Ambientales

Uno de los impactos ambientales más evidentes de una gestión inadecuada de los RSO es la contaminación. Los vertederos no controlados o mal gestionados pueden ser fuentes significativas de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas debido a lixiviados, que son líquidos contaminantes generados por la descomposición de residuos. Además, estos vertederos emiten gases de efecto invernadero, principalmente metano, contribuyendo al cambio climático. La descomposición incontrolada de RSO en vertederos también resulta en la emisión de olores desagradables y puede ser un foco de infecciones y plagas, afectando la biodiversidad local.

Impactos Sociales

Socialmente, la mala gestión de los RSO puede tener un impacto negativo en la calidad de vida de las comunidades cercanas a los vertederos. Estos impactos incluyen problemas de salud pública debido a la contaminación del aire, el agua y el suelo, así como el riesgo de enfermedades asociadas a vectores que prosperan en entornos de residuos no gestionados adecuadamente. Además, en muchos casos, la gestión deficiente de los residuos perpetúa ciclos de pobreza, especialmente en comunidades que dependen de la recolección informal de residuos.

Impactos Económicos

Económicamente, la gestión ineficiente de los RSO representa una pérdida de potenciales recursos valiosos. Los residuos orgánicos podrían ser utilizados para producir compost o generar bioenergía, pero cuando se gestionan inadecuadamente, estos recursos se pierden. Además, los costos asociados con la mitigación de la contaminación y los problemas de salud pública pueden ser significativos, lo que afecta al presupuesto público y reduce los fondos disponibles para otros servicios esenciales.

Desafíos Específicos en Colombia

Colombia enfrenta desafíos específicos en la gestión de RSO, incluyendo la falta de infraestructura adecuada para la recolección, separación y tratamiento eficiente de residuos. Esto se agrava por un bajo nivel de conciencia y participación ciudadana en la segregación de residuos en el origen. Además, el país tiene limitaciones en términos de tecnologías avanzadas y capacidades para el tratamiento y conversión eficiente de RSO en bioenergía. Estos desafíos se ven reflejados en una tasa relativamente baja de reciclaje y aprovechamiento de residuos orgánicos.

Bioenergía como Solución Sostenible

La bioenergía surge como una solución sostenible a estos desafíos, ofreciendo una forma de transformar el problema de la gestión de residuos en una oportunidad para la generación de energía limpia. A través de tecnologías como la digestión anaeróbica, es posible convertir RSO en biogás, un recurso renovable que puede ser utilizado para la generación de electricidad o como combustible. Además, este proceso produce digestato, que puede ser utilizado como fertilizante, cerrando el ciclo de nutrientes y contribuyendo a la economía circular. La

implementación exitosa de proyectos de bioenergía en Colombia podría, por lo tanto, no solo mitigar los impactos negativos de la gestión inadecuada de RSO sino también proporcionar beneficios ambientales, sociales y económicos, contribuyendo a los objetivos de desarrollo sostenible del país.

Conclusiones

Colombia, con su notable potencial en la generación de biogás a partir de biomasa, se encuentra en un punto crucial para la expansión de su sector de energías renovables. Aunque una parte significativa de este potencial aún no se ha explotado, la nación presenta una oportunidad considerable para el desarrollo y la aplicación de tecnologías de biogás. La necesidad de inversión y avances tecnológicos es clave para hacer que esta industria sea rentable y ecológicamente sostenible. Sectores como la caña de azúcar y la palma de aceite desempeñan un papel fundamental, subrayando la importancia de los residuos agrícolas como fuente energética. El marco legal y regulatorio de Colombia, destacado por la Ley 1715 de 2014 y la Resolución 240 de 2016, apoya la integración de energías renovables no convencionales, proporcionando un camino para el desarrollo de la industria del biogás.

Enfrentando desafíos operativos y de infraestructura en la implementación de proyectos de biogás, Colombia se esfuerza por superar estos obstáculos para asegurar una ejecución y operación eficiente. La contribución del biogás a la sostenibilidad y a los esfuerzos contra el cambio climático es significativa, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y disminuyendo la huella de carbono. La creciente inversión en proyectos de energía renovable refleja un cambio en la matriz energética del país hacia un futuro más sostenible. Con políticas y estrategias adecuadas, Colombia no solo puede fortalecer su posición como líder regional en el uso de energías renovables, sino también avanzar hacia una economía baja en carbono, sirviendo como modelo para otros países en la región.

Respecto a las tecnologías a implementar para el aprovechamiento del potencial

energético de la biomasa se tiene que para realizar una transformación industrial eficiente de labiomasa residual en biogás, se requiere el uso de tecnologías adecuadas que maximicen la eficiencia y sostenibilidad del proceso. Una de las tecnologías más efectivas es la digestión anaeróbica, que implica descomponer la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendobiogás compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono.

Esta tecnología se beneficia del uso de biodigestores, que pueden ser diseñados en variasformas, incluyendo sistemas de tanque continuo, sistemas de lote y biodigestores de tipo bolsa ocúpula. La elección del tipo de biodigestor dependerá de la naturaleza y cantidad de la biomasa residual, así como de las condiciones específicas de operación.

Adicionalmente, para mejorar la eficiencia y reducir los impactos ambientales, se puedenimplementar tecnologías de pretratamiento para incrementar la biodegradabilidad de la biomasa y sistemas de purificación del biogás para aumentar la concentración de metano. Estas tecnologías avanzadas permiten un aprovechamiento más eficaz de la biomasa residual y contribuyen a la producción de biogás de alta calidad que puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica o como combustible.

La selección de la digestión anaeróbica como la tecnología preferente para la conversión de residuos sólidos orgánicos (RSO) en bioenergía se sustenta en una serie de ventajas técnicas y económicas que la distinguen de otras metodologías como la gasificación, pirólisis, compostaje, e incineración con recuperación de energía. Esta preferencia se fundamenta en una evaluación integral que considera tanto la eficiencia del proceso como su viabilidad económica.

Desde el punto de vista técnico, la digestión anaeróbica presenta una notable flexibilidad en el manejo de una amplia gama de RSO, lo que la hace adaptable a distintos contextos y necesidades. Esta tecnología es particularmente eficiente en el tratamiento de materiales ricos en

contenido orgánico, como residuos alimenticios, lodos de aguas residuales y desechos agrícolas. Además, el biogás producido, compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono, es una fuente de energía versátil, capaz de ser utilizada para la generación de electricidad, calor o incluso como biocombustible. Un aspecto adicionalmente favorable es la generación de digestato, un subproducto que puede emplearse como fertilizante, aportando un valor añadido significativo al proceso.

En términos de sostenibilidad ambiental, la digestión anaeróbica ofrece ventajas notables. Al operar en un entorno cerrado y controlado, minimiza las emisiones de olores y reduce el impacto ambiental en comparación con métodos como la incineración. Esta tecnología también juega un papel crucial en la reducción de la huella de carbono al capturar metano, un potente gas de efecto invernadero, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático.

Desde la perspectiva económica, la digestión anaeróbica se destaca por su potencial de rentabilidad. La posibilidad de generar ingresos mediante la venta de biogás y digestato puede equilibrar la inversión inicial, que aunque puede ser moderada a alta, se ve compensada por los retornos económicos a largo plazo. Además, esta tecnología se beneficia frecuentemente de incentivos gubernamentales y subsidios destinados a la producción de energías renovables. En comparación con otras tecnologías, los costos operativos de la digestión anaeróbica son relativamente bajos, especialmente en términos de energía y mantenimiento. Su aplicabilidad en diversas escalas, desde pequeñas comunidades rurales hasta grandes centros urbanos, amplía aún más su atractivo.

En conclusión, la digestión anaeróbica se consolida como una solución tecnológica óptima para la transformación de RSO en bioenergía, equilibrando eficiencia técnica y viabilidad económica. Su capacidad para adaptarse a diferentes tipos de residuos, junto con la producción

de biogás y digestato, subraya su potencial como una opción sostenible y económicamente favorable en el panorama de la gestión de residuos y la generación de energía renovable.

Referencias Bibliográficas

- Acosta, Y. L. A. (2019). La digestion anaerobia. *Icidca*, XXXIX.
- Al-Addous, M. , N., Saidan, M. B., & Alnaief, M. (2018). *Evaluation of Biogas Production from the Co-Digestion of Municipal Food Waste and Wastewater Sludge at Refugee Camps Using an Automated Methane Potential Test System. Energies.*
- Al-Addous, M., Saidan, M. N., Bdour, M., & Alnaief, M. (2018). Evaluation of Biogas Production from the Co-Digestion of Municipal Food Waste and Wastewater Sludge at Refugee Camps Using an Automated Methane Potential Test System. *Energies*, 12(1), 32. <https://doi.org/10.3390/en12010032>
- Ávila-Hernández, M., Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., & Jiménez-Morales, M. F.(2018). Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(2), 159. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i2.3633>
- Cárdenas-Valbuena, R. del P., López-Quemba, G. A., Talero-Moreno, D., Cely-Grijalba, A. P., Murillo-Naranjo, L. M., Velasco-Quiroga, G. A., & Contreras-Pacheco, F. (2022). Impacto ambiental y riesgos potenciales generados en los rellenos Sanitarios – Revisión narrativa de la literatura. *Revista Investigación En Salud Universidad de Boyacá*, 9(2). <https://doi.org/10.24267/23897325.746>
- Ley 1715 de 2014, (2014).
- Corficolombiana, & Casa de Bolsa. (2023). *Informe Perspectiva Sectorial-Energía Actualidad del sector energético colombiano.*

De Pinto, A., Loboguerrero, A. M., Londoño, M., Ovalle Sanabria, K., & Suarez Castaño, R.

(2018). Informing climate policy through institutional collaboration: reflections on the preparation of Colombia's nationally determined contribution. *Climate Policy*, 18(5), 612–626. <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1321521>

Devia, K. Y., & Vidales, L. F. (2023). *Propuesta de Gestión Ambiental para Contribuir con el Mejoramiento de la Empresa Asociativa de Recuperadores de Residuos Sólidos ASOMUFAMEDIO, en el Municipio de Planadas Tolima, Colombia.*

Fernández Rodríguez, C., Martínez Torres, E. J., Morán Palao, A., & Gómez Barrios, X. (2016). Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno. Revisión bibliográfica. *Revista ION*, 29(1), 47–62. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016004>

Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38–50. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2019.01.006>

Jacobo, O. A., Jimenez, U. E., & Vargas, A. (2019). Modelo matemático para la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos. *AMCA*.

Javier, S., Germán, S., Garcés, A. R., Emigdio, M., Oviedo, D., David, J., & Torres, A. (2023). Evaluación energética de la formación de biogás obtenido de residuos sólidos urbanos del relleno sanitario mediante el modelo LandGEM. *Revista Investigación e Innovación En Ingenierías*, 11, 16–27. <https://doi.org/10.17081/invinno.11.2.6373>

Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), 1737–1744. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>

Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2019). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos.

Parte I. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 39(1).

MADS, M. de A. y D. Sostenible. (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC) . Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/informe-actualizacion-contribucion-determinada-Colombia-ndc-2020.pdf>

Ministerio de Vivienda, C. y T. de C., & Banco Mundial. (2021). *Tratamiento de residuo sólidos en el marco de Servicio Publico de Asea*.

Nava Escudero, C. (2016). El acuerdo de París. Predominio del soft law en el régimen climático. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, 49(147), 99–135.

<https://doi.org/10.22201/IIJ.24484873E.2016.147.10641>

ONU Medio Ambiente. (2018). *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe. Programa de Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente, Oficina Para América Latina y El Caribe*.

Organización de las Naciones Unidas. (2019). *The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019_Spanish. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DESA)*.

Palau, C. V. (2016). *Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás. Fundamentos. Universidad Politecnica de Valencia*.

Pham, T. P. T., Kaushik, R., Parshetti, G. K., Mahmood, R., & Balasubramanian, R. (2015).

- Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions. *Waste Management*, 38, 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.004>
- Real Academia Española. (n.d.). *Biomasa*. Retrieved October 11, 2023, from <https://dle.rae.es/biomasa>
- Renewable Energy Agency, I. (2019). *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050(2019 Edition)*. www.irena.org
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2020). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2019*.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2021). *COLOMBIA INFORME NACIONAL DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS 2020 Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios Colombia Elaborado y publicado 2021 Contenido*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD). (2023). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021*.
- Tong, Z., Wang, L., & Olson, C. B. (2018). Bio-based Products from Biomass. *EDIS*, 2011(10). <https://doi.org/10.32473/edis-ae483-2011>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2014). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*.
- Vera, L., Anchundia, G., & Scipia, M. (2017). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos de las frutas mediante digestión anaerobia. *Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada YACHASUN., 1*.

Ffrench-Davis, R. (2019). *Financiación del desarrollo Hambre Mitigación de la pobreza Evaluación América Latina*.

Naciones Unidas. (2021). *La economía circular: un modelo económico que lleva al crecimiento y al empleo sin comprometer el medio ambiente | Noticias ONU*.

<https://news.un.org/es/story/2021/03/1490082>

Vera-Acevedo, L. D., & Raufflet, E. (2022). Análisis de la Estrategia Nacional de Economía Circular de Colombia a partir de dos modelos. *Estudios Políticos (Medellín)*, 64, 27–52.

<https://doi.org/10.17533/udea.espo.n64a02>