

Nuevas tecnologías mundiales en transformación de residuos sólidos: Soluciones innovadoras para enfrentar los desafíos contemporáneos del reciclaje en Colombia.

Elaborado por:

Edward Stiven Martin Machuca

Universidad Ean

Escuela de Formación en Investigación

Seminario de Investigación de Posgrado

Bogotá

18/11/2024

Resumen

El presente estudio aborda la viabilidad de implementar tecnologías emergentes para la transformación de residuos sólidos en Colombia, analizando su capacidad para enfrentar los desafíos ambientales y sociales actuales. En un contexto marcado por el aumento en la generación de residuos y una infraestructura de reciclaje insuficiente, se identifican brechas y oportunidades para integrar tecnologías innovadoras que mejoren la gestión de residuos.

La metodología utilizada combina enfoques cuantitativos y cualitativos, apoyándose en análisis documentales, encuestas y entrevistas a actores clave del sector. Los resultados destacan el potencial del Tratamiento Mecánico-Biológico (TMB) como solución versátil e integral, gracias a su capacidad para procesar diversos tipos de residuos, generar subproductos útiles y avanzar hacia una economía circular. Sin embargo, se identifican barreras significativas, como los altos costos de implementación y operación, que requieren estrategias de financiamiento público-privado y cooperación regional para superarlas.

Este estudio enfatiza la necesidad de fortalecer la infraestructura de reciclaje, fomentar la separación en la fuente y promover proyectos piloto para evaluar la viabilidad de tecnologías emergentes. Además, resalta la importancia de alinearse con tendencias globales de sostenibilidad, aprovechando oportunidades internacionales de financiamiento e innovación para convertir los desafíos en ventajas competitivas. La investigación concluye que la adopción de tecnologías como el TMB podría transformar significativamente la gestión de residuos en Colombia, contribuyendo al bienestar ambiental, social y económico.

Palabras clave: tecnologías emergentes, gestión de residuos sólidos, reciclaje, sostenibilidad ambiental, transformación de residuos, infraestructura de reciclaje, innovación tecnológica.

Abstract

This study explores the feasibility of implementing emerging technologies for solid waste transformation in Colombia, assessing their potential to address current environmental and social challenges. In a context characterized by increasing waste generation and insufficient recycling infrastructure, the research identifies gaps and opportunities for integrating innovative technologies to improve waste management.

The methodology combines quantitative and qualitative approaches, including document analysis, surveys, and interviews with key stakeholders in the sector. Findings highlight the potential of Mechanical-Biological Treatment (MBT) as a versatile and comprehensive solution, due to its ability to process various types of waste, generate useful by-products, and support the transition to a circular economy. However, significant barriers such as high implementation and operational costs were identified, indicating the need for public-private financing strategies and regional cooperation.

This study emphasizes the importance of strengthening recycling infrastructure, promoting source separation, and implementing pilot projects to evaluate the feasibility of emerging technologies. It also underlines the need to align with global sustainability trends, leveraging international funding and innovation opportunities to transform challenges into competitive advantages. The research concludes that adopting technologies like MBT could significantly transform waste management in Colombia, contributing to environmental, social, and economic well-being.

Keywords: emerging technologies, solid waste management, recycling, environmental sustainability, waste transformation, recycling infrastructure, technological innovation.

Contenido

1. Problema de Investigación	8
2. Objetivos	10
2.1. Objetivo general	10
2.2. Objetivos específicos	10
3. Justificación	11
4. Marco Teórico	12
4.1. Conversión bioquímica.	22
4.1.1. Digestión anaeróbica (DA)	22
4.1.2. Compostaje:	22
4.1.3. Fermentación del etano	23
4.1.4. Relleno sanitario con captura de gases	23
4.2. Conversión térmica:	23
4.2.1. Incineración:	23
4.2.2. Pirólisis:	23
4.2.3. Gasificación:	24
4.3. Métodos químicos y mecánicos.	24
4.3.1. Esterificación:	24
4.3.2. Tratamiento mecánico biológico (TMB):	24
4.4. Métodos no convencionales.	25
4.4.1. Proceso fotobiológico:	25
4.4.2. Fermentación oscura	25
4.4.3. Celda de combustible microbiana (CCM):	25
4.4.4. Celda de electrólisis microbiana (CEM):	25
5. Metodología:	26
5.1. Primer nivel	26
5.1.1. Enfoque, alcance y diseño de la investigación:	26
5.1.2. Tecnologías de transformación de residuos:	27
5.1.3. Definición de Variables:	27
5.1.4. Impacto ambiental y económico:	28
5.1.5. Población y Muestra:	31
5.1.6. Expertos en gestión de residuos:	31
5.1.7. Participantes del entorno ambiental:	32
5.1.8. Muestra para análisis documental:	32
5.2. Segundo nivel	32
5.2.1. Selección de métodos o instrumentos para recolección de información: ...	32
5.2.2. Revisión documental:	33
5.2.3. Técnicas de análisis de datos	33
5.2.4. Análisis estadístico descriptivo:	34
5.2.5. Análisis cualitativo, análisis de contenido :	35
5.2.6. Matriz multicriterio:	35
6. Análisis y discusión de los resultados	36
6.1. Análisis de contenidos: Casos de estudio:	36
6.1.1. Planta Maresme en Barcelona, España.	36
6.1.2. Planta de Valorización de Residuos de Shenzhen, China.	38

6.1.3. Planta de Composta Bordo Poniente en CDMX, México.....	41
6.2. Resultados para la percepción de tecnologías para la transformación de residuos sólidos	44
6.3. Definición de criterios de la matriz multicriterio	47
7. Conclusiones	52
8. Referencias	55
9. Anexos:	58
9.1. Encuesta sobre la Percepción de Tecnologías Emergentes en la Transformación de Residuos	58

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Tipos de residuos sólidos generados en Colombia</i>	14
Figura 2. <i>Caracterización y comparación de residuos en las principales ciudades de Colombia</i>	15
Figura 3. <i>Tipos de valorización de residuos</i>	20
Figura 4. <i>Clasificación de tecnologías WtE</i>	22
Figura 5. <i>Planta Maresme de TMB (Tratamiento mecánico Biológico) en Barcelona, España</i>	38
Figura 6. <i>Planta de Termovalorización en Shenzhen, China</i>	41
Figura 7. <i>Planta de Composta Bordo Poniente, CDMX</i>	43
Figura 8. <i>Accesibilidad a las tecnologías para la transformación de residuos sólidos</i> . ..	44
Figura 9. <i>Conocimiento de existencia de tecnologías para la transformación de residuos sólidos</i>	45
Figura 10. <i>Opinion sobre efectividad de tecnologías para la transformación de residuos sólidos</i>	45

Lista de Tablas

Tabla 1. Variables de investigación.....	28
Tabla 2. Técnicas de Análisis de Datos.....	33
Tabla 3. Asignación de porcentaje por criterio.....	48
Tabla 4. Matriz de criterios para la Selección de la tecnología más viable en el aprovechamiento de Residuos en Colombia.....	50

1. Problema de Investigación

En América Latina, la gestión de residuos ha aumentado a través de la disposición en rellenos sanitarios y basureros a cielo abierto, prácticas que, si bien ofrecen una solución inmediata, no abordan los desafíos ambientales a largo plazo. A pesar de los claros beneficios que ofrecen las tecnologías de valorización de residuos (Correal & Rihm, 2022), como la reducción de emisiones de carbono, la recuperación de materiales y energía, la prolongación de la vida útil de los vertederos y la creación de empleos sostenibles, su adopción en la región sigue siendo limitada.

El crecimiento poblacional y el aumento de hogares incrementarán la generación de residuos y los costos de gestión de estos mismos. Según un estudio publicado por las Naciones Unidas se estima que la generación de residuos sólidos urbanos que en el 2023 fue de 2.126 millones de toneladas crecerá a 3.782 millones de toneladas en 2050 (Zoë Lenkiewicz, 2024, p.18). En Colombia uno de los problemas más críticos es la insuficiencia de infraestructura para la transformación de residuos. La falta de plantas de reciclaje modernas y de alta capacidad limita la posibilidad de procesar de manera efectiva los residuos reciclables. Según el Reporte Nacional Voluntario (Departamento Nacional de Planeación - DNP, 2018) muchas instalaciones de tratamiento de residuos en el país operan con tecnologías obsoletas y carecen de equipos necesarios para realizar una separación y procesamiento eficientes. Además, la red de recolección y transporte de residuos presenta deficiencias significativas, con una cobertura inadecuada en áreas rurales y periféricas, lo que ha llevado a que solo el 17% de los residuos urbanos se reciclen, mientras que el 83 % restante termine en vertederos o sea incinerado.

Como indica la guía nacional para separación de residuos sólidos (Departamento Nacional de Planeación - DNP, 2022) el déficit en la infraestructura no solo afecta la eficiencia del reciclaje, sino que también tiene consecuencias ambientales. Para la (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - SSPD, 2015) en su mayoría los residuos que no son

recicladamente a menudo terminan en vertederos a cielo abierto, que generan lixiviados y emisiones de gases de efecto invernadero, contaminando el suelo y el agua.

En 2020, el costo global directo de la gestión de estos residuos fue de 252.000 millones de dólares, pero si se consideran los impactos indirectos como la contaminación, los problemas de salud y el cambio climático causados por una mala gestión de los desechos, la cifra asciende a 361.000 millones de dólares, de no implementarse medidas urgentes, este costo global anual podría casi duplicarse para 2050, alcanzando los 640.300 millones de dólares. Sin embargo, el autor sugiere que, si se adoptan medidas de prevención y gestión adecuadas, los costos netos anuales podrían limitarse a 270.200 millones de dólares en 2050. Además, la implementación de un modelo de economía circular, que desvincule la generación de residuos del crecimiento económico mediante la reducción de desechos y prácticas sostenibles, podría generar una ganancia neta de 108.500 millones de dólares anuales. La necesidad de acción inmediata es crucial para evitar los peores escenarios. (Zoë Lenkiewicz, 2024).

Se proyecta que la generación de residuos en áreas urbanas y rurales alcanzará los 18,74 millones de toneladas para el año 2030, lo que equivale a aproximadamente 321 kilogramos por persona anualmente, representando un aumento del 13,4 % en la producción per cápita de residuos sólidos (Consejo Nacional de Política Económica y Social - CONPES, 2016). Ante este escenario, es crucial que Colombia adopte un esquema de gestión de residuos sólidos capaz de hacer frente a esta creciente demanda.

2. Objetivos

2.1. *Objetivo general*

Evaluar la viabilidad de aplicación de tecnologías innovadoras para la transformación de residuos utilizadas a nivel mundial, para proporcionar soluciones sostenibles en los desafíos ambientales y sociales de la gestión de residuos sólidos en Colombia.

2.2. *Objetivos específicos*

- Investigar la infraestructura y las técnicas actuales de manejo de residuos en Colombia, para identificar las brechas y oportunidades donde las tecnologías emergentes puedan integrarse de manera efectiva, que puedan mejorar los procesos de reciclaje y la gestión sostenible de residuos en el país.
- Analizar las tecnologías emergentes a nivel mundial en la transformación de residuos, evaluando su viabilidad y adaptabilidad para ser implementadas en Colombia.
- Evaluar el impacto ambiental y económico de las tecnologías emergentes en la transformación de residuos, identificando aquellas que ofrezcan un equilibrio entre la sostenibilidad ecológica y la viabilidad económica.

3. Justificación

La presente investigación es relevante para Colombia desde la perspectiva de la gerencia de proyectos, dado el impacto positivo que puede generar en los ámbitos ambiental, económico y social. Enfocada en las áreas de Ciencia, Tecnología e Innovación, busca implementar soluciones sostenibles que optimicen la gestión de residuos, con especial importancia para las empresas que operan en este sector. El objetivo es abordar desafíos estratégicos del país mediante tecnologías emergentes que favorezcan la reducción de residuos en vertederos y promuevan prácticas de reciclaje con menor huella ecológica, aportando así a la lucha contra el cambio climático y la degradación ambiental.

A nivel económico, la incorporación de tecnologías de transformación de residuos generará oportunidades de negocio y empleo, beneficiando a la economía nacional y a la fuerza laboral. Capacitar en métodos de gestión sostenible y en el uso de tecnologías avanzadas permitirá que los trabajadores locales adquieran habilidades demandadas en el mercado, fortaleciendo una economía circular y un mercado laboral más competitivo.

Además, frente al crecimiento poblacional y al aumento del consumo, una gestión de residuos adecuada es crucial para evitar problemas de salud pública y mejorar la calidad de vida de las comunidades. Al reducir la contaminación y mejorar la gestión de desechos, este estudio tendrá un impacto directo en la salud pública, promoviendo un ambiente más saludable y sostenible.

Finalmente, la investigación busca identificar deficiencias en la infraestructura de gestión de residuos del país y proponer una guía para su modernización, posicionando a Colombia como líder regional en sostenibilidad e innovación. Esto atraerá inversión extranjera y fortalecerá la cooperación internacional en temas de sostenibilidad, contribuyendo a que Colombia sea un referente en desarrollo sostenible y competitividad global.

4. Marco Teórico

El reciclaje según la definición de la RAE (*REAL ACADEMIA ESPAÑOLA*, 2023) implica someter un material previamente usado a un proceso de transformación para que el resultado se pueda volver a utilizar, requiriendo de una infraestructura en dicho proceso. Esta misma define un residuo como cualquier material o sustancia que ya no tiene valor para su propietario y, por consiguiente, es desechado, pero eso no significa que estos residuos no puedan ser reciclados. Según una investigación publicada por la CAF (Corporación Andina de Fomento) el autor (Pietro Graziani, 2018) afirma que en América latina la gestión de residuos enfrenta desafíos significativos debido a problemas en la recolección, separación y reciclaje, exacerbados por el crecimiento urbano, debido a la falta de infraestructura y procesos de reciclaje ineficientes también el autor destaca la necesidad de adoptar tecnologías innovadoras y sostenibles, como la separación automática, para mejorar la eficiencia y mitigar el cambio climático la experiencia de países avanzados en Asia y Europa, como son, Japón, Corea del Sur, Alemania, Noruega, España, Italia y Suiza, muestra que las tecnologías avanzadas pueden reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mejorar la gestión ambiental.

En Colombia, el DANE reporta que se generan 24,8 millones de toneladas de residuos al año, de los cuales el 47 % provienen solamente de los hogares, con una producción per cápita de 515 kilogramos. En 2019, la tasa de reciclaje alcanzó el 11,82 %, mientras que aproximadamente el 39,9 % de los hogares a nivel nacional y el 42,2 % en las áreas urbanas clasifican sus residuos. Además, el 81 % de los hogares indica que separa plásticos, papel y cartón, y el 61,2 % separa vidrio (Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, 2020, p. 6).

En 2015, Colombia se comprometió con la agenda 2030 y su ODS buscando alcanzar un desarrollo sostenible para el año 2030 (Departamento Nacional de Planeación - DNP, 2022).

Este plan pretende impulsar el reciclaje, reducir el impacto ambiental de los residuos, fortalecer la responsabilidad del productor y mejorar la política de residuos sólidos, enfocándose en la mejora de la infraestructura sanitaria y promoviendo la reutilización y valorización de residuos. Bajo la premisa de la ONU “los objetivos de desarrollo sostenible son el plan maestro para conseguir un futuro sostenible para todos. Se interrelacionan entre sí e incorporan los desafíos globales a los que nos enfrentamos día a día” (Naciones Unidas - ONU, 2015, párr. 1) y el compromiso que se asumió, Colombia se enfrenta a diario con el desafío de impulsar una eficiente gestión de residuos.

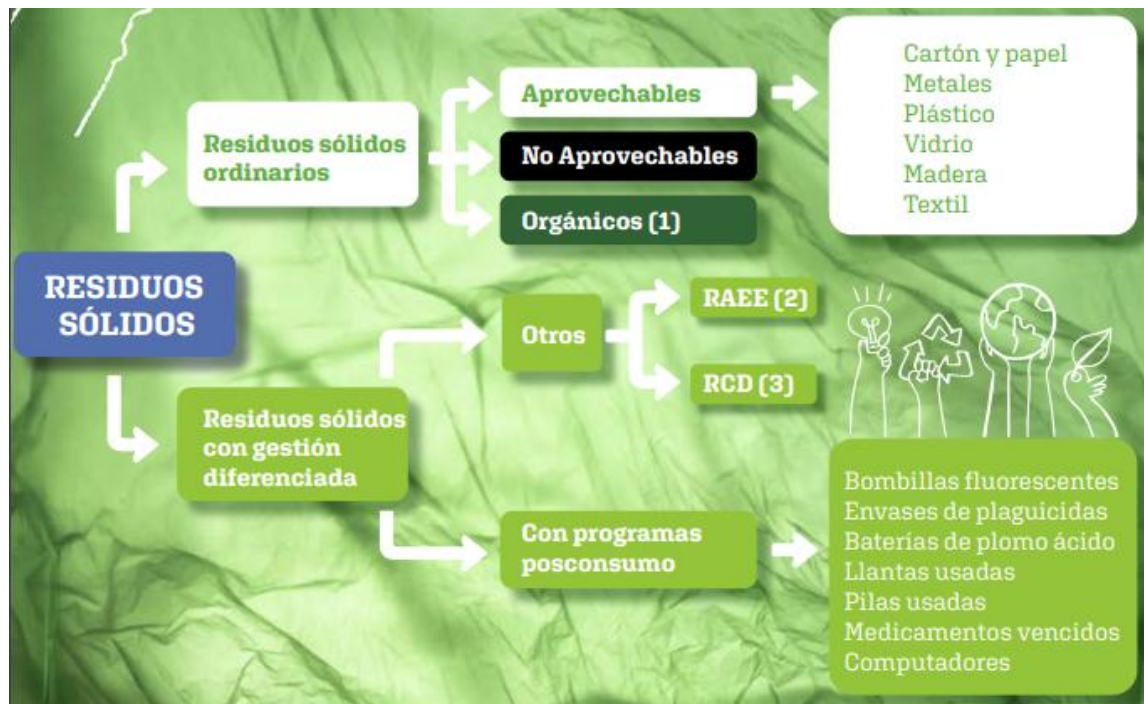
La siguiente figura titulada "Tipos de residuos sólidos generados en Colombia" detalla las diversas categorías de desechos producidos en el país, dividiéndolos en dos grandes grupos: residuos sólidos ordinarios y aquellos con gestión diferenciada. Los residuos sólidos ordinarios incluyen materiales aprovechables para ser reciclados como muestra la ilustración; están los no aprovechables, que son difíciles de reciclar o reutilizar; y orgánicos, que son susceptibles de tratamiento porque su naturaleza biodegradable permite transformarlos mediante procesos como el compostaje o la digestión anaeróbica, generando productos útiles como abono o biogás. El compostaje es un tipo de tratamiento que reduce la cantidad de residuos enviados a los vertederos, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contribuye a una gestión más sostenible de los residuos (Departamento Nacional de Planeación - DNP, 2022).

Por otro lado, los residuos sólidos con gestión diferenciada abarcan aquellos que requieren un manejo especial debido a su naturaleza peligrosa o su impacto ambiental. Estos incluyen residuos como aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y otros residuos gestionados a través de programas posconsumo, diseñados específicamente para asegurar su adecuado tratamiento y disposición final. Esta clasificación como se muestra en la Figura N°1 resalta la necesidad de una infraestructura adecuada y de programas que promuevan la correcta

separación y tratamiento de estos residuos para lograr su transformación.

Figura 1.

Tipos de residuos sólidos generados en Colombia



Nota: tomado de (Departamento Nacional de Planeación - DNP, 2022, p.8)

(1) Orgánicos susceptibles de tratamiento

(2) RAEE: Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

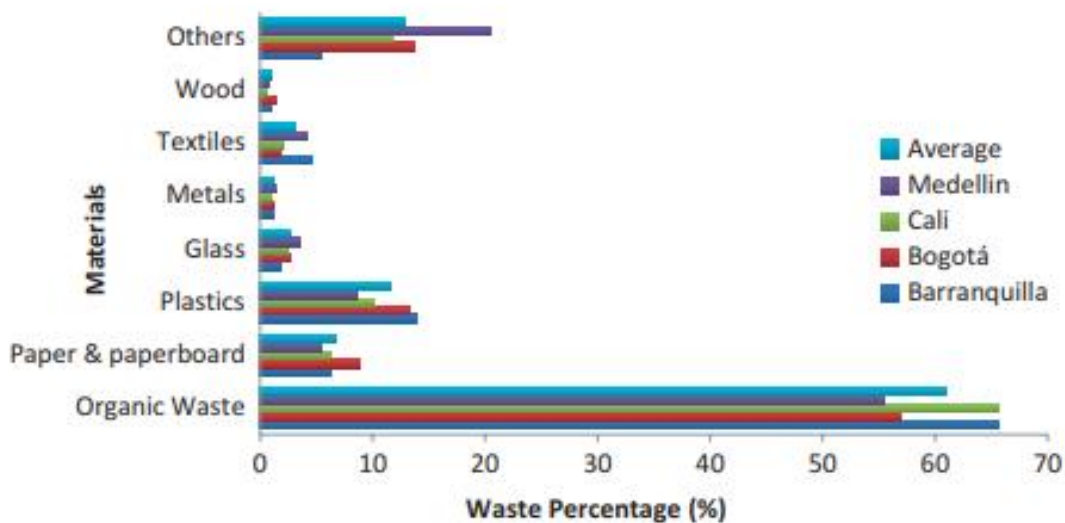
(3) RCD: Residuos de construcción y demolición

Un informe de desempeño indicó que Colombia genera alrededor de 32,000 toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) diariamente, de los cuales el 85% es dispuesto o tratado, mientras que el resto se recicla (Departamento Nacional de Planeación - DNP, 2016). El uso de rellenos sanitarios es actualmente la técnica más empleada para la disposición final en todo el país, y en 2016, casi 11 millones de toneladas de RSU fueron depositadas en rellenos sanitarios colombianos. Los residuos sólidos urbanos (RSU) recolectados por los municipios colombianos generalmente presentan un porcentaje consistentemente alto de residuos

orgánicos. Por ejemplo, Bogotá generó un 51,32% de residuos orgánicos, 16,88% de plásticos, 8,92% de papel y cartón, 4,54% de textiles, 1,60% de madera, 1,13% de metales, 3,67% de vidrio y 1,99% de otros residuos (Alcaldía de Bogotá, 2017, p. 75). La composición de los RSU en los municipios colombianos es relativamente homogénea, como se evidencia en la Figura N°2. Con este alto contenido orgánico en los RSU, gran parte de estos pueden ser valorizados mediante compostaje o producción de biogás (Hettiarachchi et al., 2020).

Figura 2.

Caracterización y comparación de residuos en las principales ciudades de Colombia.



Nota: tomado de (Hettiarachchi et al., 2020, p.26)

Como podemos evidenciar en la figura anterior, Barranquilla y Cali presentan el mayor porcentaje de generación de residuos orgánicos, mientras que Medellín y Bogotá se configuran como las ciudades con mayor generación de residuos aprovechables en especial de metales, madera y vidrio. Barranquilla y Bogotá son las ciudades que más plástico generan en el país, el cual es el residuo con mayor tasa de reciclaje. En la actualidad, las ciudades se han convertido en centros vibrantes de actividad y creatividad, donde convergen personas de diversas culturas y trasfondos. Sin embargo, más allá de su apariencia física, estas ciudades funcionan de

manera similar a organismos vivos porque diariamente se vive la compleja interacción entre factores históricos, económicos y culturales (Neto et al., 2024). En este contexto, es fundamental explorar cómo estas dinámicas no solo afectan el crecimiento urbano, sino que también tienen implicaciones significativas para el entorno natural y la gestión de residuos pues en la vida diaria se generan una gran cantidad de residuos especialmente en las zonas más pobladas.

En la realidad global actual, las ciudades de países en desarrollo, como Colombia, enfrentan retos significativos en la gestión de residuos. A medida que estas áreas urbanas crecen y evolucionan, se vuelve crucial entender los factores que contribuyen a la complejidad de sus sistemas de manejo de residuos. Recientes investigaciones han comenzado a explorar cómo el crecimiento poblacional, el desarrollo económico, la rápida urbanización y la mejora en los niveles de vida están interrelacionados y, a su vez, impulsan un aumento considerable en la generación de residuos sólidos (Minghua et al., 2009). Esta comprensión es esencial para abordar los desafíos ambientales y sociales que surgen en estas dinámicas urbanas.

La gestión de residuos sólidos urbanos comprende diversas fases interrelacionadas que, según la literatura, se extienden desde la generación de residuos hasta su disposición final (Barrena et al., 2020). Este proceso incluye la identificación, clasificación, embalaje, almacenamiento, recolección, transporte y transformación de desechos. Cada una de estas etapas exige una planificación minuciosa para asegurar su efectividad y contribuir a una gestión sostenible. Según Barrena la recolección y el transporte de residuos son fases críticas y costosas en la gestión de residuos, debido a la movilización frecuente de grandes volúmenes desde puntos de generación hasta sitios de tratamiento o disposición final. Estos procesos son desafiantes tanto en áreas urbanas, con tráfico denso, como en zonas rurales con infraestructura limitada. Además, la eficiencia en esta etapa afecta la calidad de los residuos para su reciclaje, ya que una recolección ineficiente puede aumentar la mezcla de materiales

reciclables y no reciclables. Optimizar rutas y utilizar tecnologías avanzadas puede reducir costos y mejorar la sostenibilidad del sistema.

Un desafío clave en la acumulación de residuos sólidos urbanos radica en que tanto la cantidad como la composición de los desechos están fuertemente influenciadas por los hábitos de consumo y las prácticas culturales de las personas, las cuales pueden diferir significativamente entre regiones. En áreas con mayor consumo de productos empacados, por ejemplo, la proporción de plásticos y envases tiende a ser más alta, mientras que, en regiones rurales, los residuos orgánicos pueden predominar debido a actividades agrícolas. Estas diferencias complican la implementación de políticas de gestión de residuos unificadas y exigen soluciones personalizadas para cada contexto local, que consideren los comportamientos y necesidades de la población (Khan et al., 2022).

La variabilidad en la cantidad y composición de los residuos sólidos urbanos representa un obstáculo significativo para los procesos de recolección, transferencia y clasificación. Esta diversidad de desechos dificulta la implementación eficiente de sistemas avanzados de gestión de residuos, como el reciclaje y tecnologías innovadoras de conversión termoquímica, tales como la gasificación de plasma y la pirólisis (Alam et al., 2022). Además, tratamientos mecánicos biológicos (TMB) enfrentan desafíos adicionales debido a las diferencias en la naturaleza de los materiales recogidos. Para maximizar la eficacia de estas tecnologías, es fundamental una mayor uniformidad en la clasificación de residuos en origen, así como la inversión en infraestructuras adaptadas a las particularidades locales. Sin estas medidas, los beneficios potenciales de las tecnologías emergentes de gestión de residuos se ven limitados.

En muchos países en desarrollo, la gestión de residuos se enfrenta a desafíos financieros y logísticos que los llevan a optar por métodos más básicos como los rellenos sanitarios y la incineración para reducir costos y simplificar las operaciones. Aunque estos enfoques permiten una reducción de costos a corto plazo, generan efectos negativos considerables tanto para la

salud humana como para el medio ambiente (World Bank Group, 2022). Los rellenos sanitarios suelen producir lixiviados y emisiones de (GEI), mientras que la incineración libera contaminantes tóxicos en la atmósfera. Además, la sostenibilidad financiera es un desafío clave en la gestión de residuos, por lo que el diseño de estructuras fiscales adecuadas y la planificación a largo plazo son esenciales para ayudar a los gobiernos a contener costos y recuperar inversiones.

El compromiso ciudadano también es crucial, ya que el cambio de comportamiento y la participación pública son vitales para el funcionamiento eficaz de un sistema de residuos. Por ello, es importante diseñar incentivos y campañas de concienciación que promuevan la reducción de desechos, la separación en la fuente y la reutilización de materiales. Asimismo, la inclusión social es un factor relevante, ya que, en muchos países en desarrollo, los trabajadores informales desempeñan un papel esencial al recuperar entre el 15 % y el 20 % de los residuos generados (World Bank Group, 2022). Los proyectos deben integrar a estos recicladores en el sistema formal y garantizarles condiciones laborales seguras, redes de protección social, restricciones al trabajo infantil y acceso a la educación.

Para el caso de Colombia, acorde con la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en 2020:

Se gestionaron 32.580,96 toneladas diarias de residuos sólidos dentro del servicio público de aseo en el país, lo que representó un aumento del 0,89% en comparación con el año 2019. Este mismo informe dice que del total de toneladas diarias dispuestas el 45,23% corresponde a las 8 ciudades con mayor población: Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, San José de Cúcuta, Soacha y Soledad. En la cual se destaca una disminución respecto al año 2019 en la disposición de residuos en las siguientes ciudades: Bogotá (-9,5%), Cali (-11,2%), Barranquilla (-2,1%) y Cartagena de Indias (-7,9%); y un aumento en las ciudades de Medellín (15,91%), San José de Cúcuta

(5,55%), Soacha (9,7%) y Soledad (20,3%). (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - SSPD, 2021, p.18),

El principal obstáculo para la adopción de estas soluciones radica en la dependencia de la situación financiera de los municipios. La gestión de residuos sólidos está intrínsecamente ligada a la capacidad de los gobiernos locales para recaudar fondos a través de tasas o impuestos municipales. Sin embargo, en muchos países de la región, los sistemas de recaudación son deficientes. A menudo, los niveles de cobro no superan el 50% de los valores facturados, y los ingresos obtenidos no cubren los costos reales del servicio, lo que compromete la sostenibilidad de las operaciones (Correal Magda & Rihm, 2022). Esta brecha financiera limita significativamente la posibilidad de introducir mejoras en la calidad del servicio, como la incorporación de tecnologías avanzadas de tratamiento de residuos. Para revertir esta situación, es necesario fortalecer los mecanismos de recaudación y asegurar una relación más cercana entre el costo real del servicio y el valor cobrado, lo que permitiría financiar proyectos innovadores en la gestión de residuos y mejorar la eficiencia del sistema en su conjunto. Estas tecnologías no solo mejorarían la sostenibilidad ambiental, sino también podrían generar un impacto positivo en la economía y la salud pública.

Para evaluar la implementación de estas tecnologías, es fundamental comprender a qué se refiere la valorización de residuos. La Directiva 2008/98/CE de residuos (modificada por la Directiva (UE) 2018/851), define la valorización de residuos como una operación en la cual un residuo se transforma para cumplir una función útil, sustituyendo a otros materiales que habrían sido utilizados para esa misma función (Unión Europea, 2018, p. 9). Este concepto está estrechamente relacionado con el objetivo de que los residuos dejen de ser considerados como tales, en el contexto de los objetivos establecidos por las Directivas sobre valorización y reciclaje. Los materiales que ya no se clasifican como residuos, gracias a un proceso de

valorización o reciclaje, deben contabilizarse para cumplir con los objetivos de valorización y reciclado definidos en dichas normativas, de acuerdo con los métodos de cálculo aplicables.

Es decir que este concepto implica la transformación de residuos en nuevos recursos, buscando maximizar el aprovechamiento de materiales y energía, así como minimizar el impacto ambiental. En función de su objetivo final, existen dos tipos de valorización de residuos como podemos ver la figura N°3, el tipo de valorización dependerá de la composición del residuo:

Figura 3.

Tipos de valorización de residuos



Nota: Elaboración propia con información de (George Tchobanoglous et al., 1994)

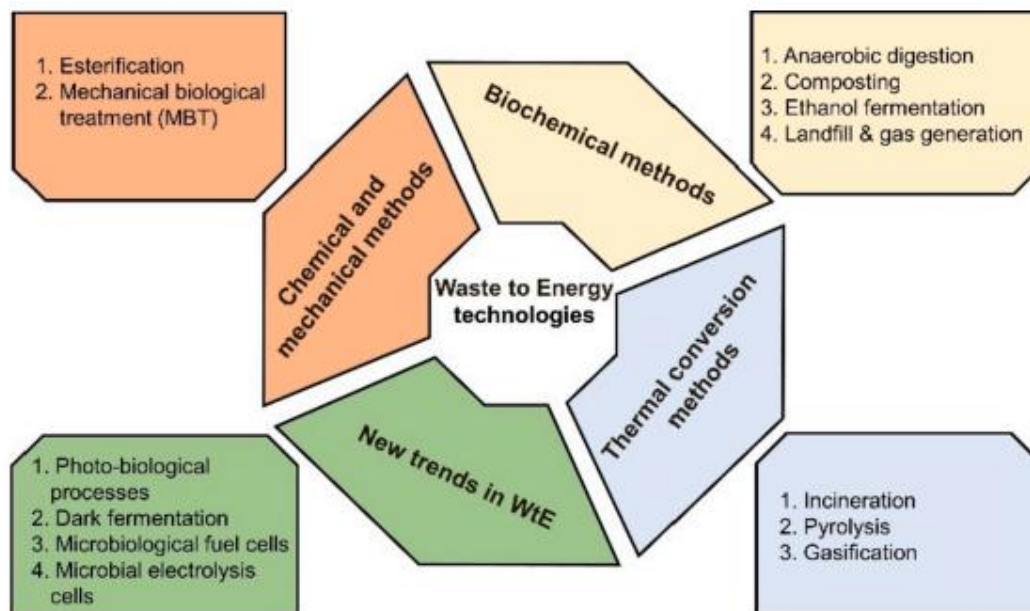
Existen algunas tecnologías de gestión de residuos, como los vertederos y la incineración, han sido utilizadas por muchos años. Sin embargo, con el crecimiento poblacional, las necesidades cambiantes y el desarrollo tecnológico, la sociedad ha generado residuos más complejos que no pueden ser gestionados eficientemente con métodos tradicionales. Esta situación ha impulsado la creación de nuevas tecnologías o la mejora de las ya existentes. Las tecnologías de conversión de residuos en energía (WtE, Waste to Energy) representan una oportunidad tanto económica como ambiental (Khan et al., 2022). Si se emplean los procesos adecuados, es posible extraer productos valiosos como biogás, aceite líquido, carbón, biodiésel, bioetanol, compost, calor y vapor.

Las tecnologías WtE tradicionales se dividen en tres categorías principales: conversión bioquímica, térmica y métodos químico-mecánicos (Beyene et al., 2018). La conversión bioquímica, como la digestión anaeróbica, la fermentación de etanol, la captura de gas en vertederos y el compostaje, emplea microorganismos como bacterias o enzimas para descomponer la materia orgánica. Los tratamientos térmicos, como la incineración, la pirólisis y la gasificación, utilizan el calor para transformar los residuos en energía y productos útiles. Los métodos químicos y mecánicos, como la esterificación y el tratamiento bioquímico-mecánico, se centran en procesos químicos para obtener biodiésel a partir de residuos aceitosos, o combinan tratamientos mecánicos y biológicos para producir biogás, como es el caso de la tecnología de Tratamiento Mecánico Biológico (TMB).

Para poder ampliar la información sobre las tecnologías WtE en la figura N°4 se encuentra la clasificación de estas tecnologías teniendo en cuenta el componente científico que las relaciona, además se incluyen una serie de nuevas tendencias que permiten aprovechar la materia orgánica y otros desechos, transformándolos mediante procesos térmicos, biológicos o químicos en energía para reducir el volumen de residuos que va a vertederos, WtE contribuye a la generación de energía limpia y apoya la economía circular.

Figura 4.

Clasificación de tecnologías WtE.



Nota: tomado de(Khan et al., 2022, p. 3)

Como se puede evidenciar en la figura N°4 podemos agrupar todas las tecnologías de transformación de residuos en 4 categorías: Conversión bioquímica, conversión térmica, métodos químicos y mecánicos y por último nos métodos no convencionales y que a su vez son nuevas tendencias. A continuación, una ampliación de cada categoría y sus tecnologías.

4.1. Conversión bioquímica.

4.1.1. Digestión anaeróbica (DA): La digestión anaeróbica es un proceso biológico en el que la fracción orgánica de los residuos se descompone en ausencia de oxígeno, produciendo biogás, que se puede convertir en energía, y un digestato rico en nutrientes, útil como fertilizante. Este proceso ocurre en tres etapas: primero, la materia orgánica se descompone en moléculas simples; luego, estas moléculas se transforman en productos más básicos, como dióxido de carbono y ácidos orgánicos; y finalmente, los ácidos orgánicos se convierten en metano (Dalke et al., 2021). Su implementación creciente, como en Estados Unidos, impulsa la generación de energía y la reducción de residuos en vertederos, promoviendo una economía circular.

4.1.2. Compostaje: El proceso de compostaje está regulado por la acción microbiana dirigida a biodegradar los Food waste (FW) o residuos alimentarios, siendo el compostaje la técnica de

tratamiento de desechos orgánicos, que convierte esta materia en compost rico en nutrientes bajo condiciones controladas de temperatura, humedad, aireación y equilibrio de carbono/nitrógeno. Este proceso ayuda a mitigar problemas ambientales como malos olores, lixiviados y emisiones de gases de efecto invernadero. Existen dos tipos principales: compostaje tradicional y lombricompostaje (Awasthi et al., 2020). Aunque es una solución ecológica y beneficiosa para la fertilidad del suelo, aún presenta desafíos relacionados con la generación de emisiones y la producción de lixiviados durante el proceso.

4.1.3. Fermentación del etanol: Esta fermentación convierte la glucosa y fructosa presentes en la fracción orgánica de los residuos, como cáscaras de plátano, papaya y cítricos, en alcohol etílico mediante la acción de enzimas. Tras la fermentación, el producto es destilado para obtener bioetanol anhidro, un combustible alternativo. Para mejorar la producción, se utilizan técnicas como pretratamientos con álcali, ácidos o disolventes para aumentar la solubilidad de la celulosa, así como catalizadores y ultrasonidos. El reto principal es lograr precios de bioetanol competitivos (Naved et al., 2022).

4.1.4. Relleno sanitario con captura de gases: El vertedero se ha utilizado como método de tratamiento de residuos; incluso con técnicas de reciclaje y procesamiento de residuos, este sistema prevalece principalmente en países en desarrollo debido al aspecto económico (Rasi et al., 2007). Un relleno sanitario bien construido y gestionado no solo reduce el volumen y peso de los residuos, sino que también genera biogás, compuesto principalmente de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), que puede aprovecharse para la producción de energía. Este sistema incluye procesos como compactación, impermeabilización y captación de biogás. Un ejemplo notable de su implementación exitosa es el de Yakarta, Indonesia, donde se ha integrado en iniciativas WtE para generar electricidad y calor (Kurniawan et al., 2022).

4.2. Conversión térmica:

4.2.1. Incineración: Es un proceso térmico que quema residuos en presencia de oxígeno a temperaturas entre 850 y 1100 °C, reduciendo significativamente su peso y volumen mientras se recupera el calor y la energía generados. Existen diferentes tipos de incineradores, como los de parrilla, lecho fluidizado y rotatorios, y su eficiencia depende de la optimización de la transferencia de masa y energía, así como de parámetros como la temperatura mínima de combustión y el tiempo de residencia. Aunque la incineración puede generar calor (80%), vapor (20–30%) y electricidad (20%), también presenta desventajas, ya que puede liberar contaminantes como gases ácidos, dioxinas, óxidos de nitrógeno y metales pesados (Beyene et al., 2018). Por lo tanto, es esencial abordar estos problemas para garantizar que la incineración se realice de manera segura para la salud humana y el medio ambiente.

4.2.2. Pirólisis: Consiste en descomponer térmicamente los residuos en ausencia de oxígeno, utilizando el oxígeno contenido en los propios residuos. Este proceso opera a temperaturas que varían entre 300 °C y 800 °C y se clasifica en dos tipos: la pirólisis convencional, que se realiza a 500 °C con una velocidad de calentamiento de 0,5 °C/s, y la pirólisis flash, que se lleva a cabo a 765 °C con una velocidad de calentamiento de 100 °C/s (Safdari et al., 2019). La temperatura y la tasa de calentamiento son factores críticos que influyen en los rendimientos y la composición de los productos generados durante la pirólisis. Los productos resultantes incluyen gases ligeros como CO, CO₂, CH₄ y H₂, así como compuestos aromáticos. En comparación con la pirólisis lenta, la rápida genera mayores rendimientos de ciertos

compuestos y gases, ofreciendo una alternativa eficiente para el tratamiento de residuos orgánicos (Khan et al., 2022).

4.2.3. Gasificación: La gasificación es un proceso termoquímico que convierte residuos sólidos urbanos con alto contenido de carbono en un gas sintético (syngas) a altas temperaturas, utilizando un agente de gasificación. La composición del syngas varía, típicamente conteniendo entre 30-60% de CO, 25-30% de H₂, y menores cantidades de CH₄, CO₂ y otros contaminantes (Belgiorno et al., 2003). El proceso incluye varias etapas: primero, se seca el residuo para eliminar la humedad; luego, se realiza la desvolatilización, liberando componentes volátiles; y finalmente, el carbono restante reacciona con el agente gasificante (aire, oxígeno o vapor) a temperaturas de 760 a 1200 °C. La elección del agente afecta la calidad del syngas, con el aire produciendo un gas de bajo poder calorífico, mientras que el oxígeno puro genera una mezcla rica en CO e hidrógeno, y el vapor resulta en un syngas rico en hidrógeno y CO₂. A pesar de sus ventajas, como la producción de syngas para generación de electricidad y productos químicos, la gasificación enfrenta desafíos en su operación, escalabilidad y flexibilidad.

4.3. Métodos químicos y mecánicos.

4.3.1. Esterificación: La esterificación es un método químico y mecánico utilizado para producir biodiésel, un combustible líquido derivado de diversas materias primas, que incluyen aceites de primera generación como comestibles, aceites de segunda generación no comestibles, como aceites de cocina usados (WCO) y grasas animales y aceites de tercera generación biomasa de algas (Abdul Hakim Shaah et al., 2021). La reacción básica implica mezclar aceite con alcohol, generando biodiésel y glicerina.

La producción de biodiésel puede emplear diferentes tipos de catalizadores. Los catalizadores homogéneos son utilizados a nivel industrial debido a su rápida reacción y alto rendimiento, aunque generan aguas residuales y no se pueden recuperar fácilmente. Los catalizadores heterogéneos, en cambio, permiten una fácil separación y reutilización en múltiples ciclos, mientras que los catalizadores enzimáticos están ganando popularidad por su eficacia con aceites y grasas de baja calidad. La elección del catalizador influye en la eficiencia y el impacto ambiental del proceso (Mandari & Devarai, 2022).

4.3.2. Tratamiento mecánico biológico (TMB): Es un método químico y mecánico que se utiliza para el tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU), especialmente en regiones donde las instalaciones de reciclaje son limitadas. A pesar de que el vertedero sigue siendo la principal opción para la eliminación de RSU a nivel mundial, la TMB se presenta como una solución para reducir el impacto ambiental de los vertederos. Este proceso implica la estabilización de la fracción orgánica de los residuos y la reducción de su volumen, lo que puede disminuir la generación de lixiviados y gases de vertedero (Trulli et al., 2018). La implementación de la TMB puede aumentar la vida útil del sitio de disposición, logrando reducciones significativas en la contaminación ambiental y en la masa de residuos, permitiendo que se aprovechen los materiales inorgánicos.

En Italia, donde el sistema de recolección separada es a menudo ineficaz, la TMB ha demostrado ser una estrategia eficaz para tratar los RSU antes de su disposición final (Di Lonardo et al., 2016). La regulación de la Unión Europea establece que la disposición de residuos sólidos solo es permitida tras un pretratamiento, lo que refuerza la importancia de la TMB. Este método no solo contribuye a la reducción de contaminantes y mejora la sostenibilidad del vertedero, sino que también puede transformar los RSU en un recurso

energético al priorizar la producción de biogás y electricidad. La TMB se convierte así en una opción valiosa en la gestión de residuos, ofreciendo soluciones que pueden ser replicadas en regiones en desarrollo y contribuyendo a un manejo más eficiente y sostenible de los residuos sólidos.

4.4. Métodos no convencionales.

4.4.1. Proceso fotobiológico: Se usa para generar combustibles limpios, destacándose en la producción de biohidrógeno a partir de agua y materia orgánica mediante microorganismos específicos. Este proceso puede llevarse a cabo a través de dos principales vías: la fotofermentación y la fotólisis (Khan et al., 2022). En la fotofermentación, bacterias fotosintéticas, como *Rhodobacter sphaeroides* y *Rhodospirillum rubrum*, utilizan la luz solar para convertir la materia orgánica en biomasa, liberando simultáneamente CO₂ y H₂ en condiciones anaeróbicas. La producción de hidrógeno se potencia en condiciones de deficiencia de nitrógeno, donde las bacterias púrpuras sin azufre (PNS) generan hidrógeno como subproducto gracias a la actividad de la nitrogenasa. La fotólisis, por otro lado, involucra a cianobacterias y algas verdeazuladas que realizan un proceso similar a la fotosíntesis, utilizando clorofila y otros pigmentos. Este proceso se divide en fotólisis directa e indirecta. La eficiencia en la producción de hidrógeno depende de factores como la intensidad y longitud de onda de la iluminación, así como de las condiciones adecuadas para el crecimiento de las bacterias (Singh & Wahid, 2015).

4.4.2. Fermentación oscura: Este método para la producción de biohidrógeno a partir de residuos orgánicos, destacándose por su capacidad de operar a temperatura y presión ambiente utilizando consorcios bacterianos, lo que reduce significativamente los costos de producción. Este proceso ocurre en condiciones anaeróbicas y de oscuridad, empleando bacterias como *Bacillus*, *Clostridium*, *Klebsiella*, y *Enterobacter* (Singh et al., 2013). A diferencia de la digestión anaeróbica, en la fermentación oscura se recupera el hidrógeno generado durante las primeras etapas, evitando su consumo por bacterias metanogénicas. Las etapas del proceso son similares a las de la digestión anaeróbica, donde la materia orgánica se degrada mediante hidrólisis en moléculas más simples y se convierte en ácidos orgánicos y alcoholes de interés comercial, como el ácido acético y el etanol.

4.4.3. Celda de combustible microbiana (CCM): Son biorreactores que utilizan microorganismos exoelectrógenos para transformar la energía química de la materia orgánica en energía eléctrica. Estos microorganismos, alimentados por desechos orgánicos como residuos domésticos, desechos animales y lodos, generan electrones durante su actividad metabólica, que son transferidos a un electrodo (Kumar et al., 2018). La configuración más común es la de doble cámara, donde el biorreactor tiene un ánodo, donde ocurre un proceso anaeróbico con los microorganismos como catalizadores, y un cátodo, donde se lleva a cabo un proceso aeróbico. En este sistema, los protones generados en el ánodo atraviesan una membrana de intercambio de protones hacia el cátodo, donde se combinan con oxígeno para formar agua, y se genera electricidad a través de un circuito externo que conecta los electrodos. Este método permite la generación de energía limpia y la biorremediación de materia orgánica.

4.4.4. Celda de electrólisis microbiana (CEM): Es una tecnología sostenible que integra un reactor anaeróbico de biomasa con una celda electroquímica para realizar la electrólisis del agua. Estas celdas constan de dos electrodos (ánodo y cátodo) separados por una membrana de intercambio iónico y requieren una fuente de energía externa (0,5-1,23 V) para funcionar. En

la cámara del ánodo, los microorganismos oxidan la materia orgánica de los residuos, mientras que en la cámara del cátodo, se reducen protones para producir hidrógeno y otros productos valiosos. Las investigaciones han demostrado que las CEM pueden lograr más del 90% de producción de hidrógeno, con rendimientos del 87,73% en configuraciones específicas (Singh et al., 2021). Además, estos sistemas pueden combinarse con otras tecnologías para generar energía y degradar contaminantes simultáneamente.

5. Metodología:

5.1. Primer nivel

5.1.1. Enfoque, alcance y diseño de la investigación:

La presente investigación se enmarca en un enfoque mixto, que integra metodologías cuantitativas y cualitativas. Esta elección nos permitirá abordar de manera integral el problema de la ineficiencia en la gestión de residuos en Colombia. La componente cuantitativa permitirá la recolección de datos medibles y estadísticos sobre la percepción y el uso de tecnologías emergentes en el reciclaje. Por otro lado, la dimensión cualitativa ofrecerá una comprensión más profunda de los desafíos y experiencias relacionadas con la implementación de estas tecnologías (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018). De esta forma, se busca no solo medir, sino también contextualizar y enriquecer el análisis de la situación actual en el manejo de residuos en el país.

El diseño de la investigación es no experimental, ya que no se manipularán variables; en cambio, se realizará una observación de la realidad. Este enfoque es apropiado para estudiar situaciones complicadas, como la gestión de residuos, donde muchas variables diferentes están relacionadas y afectan el sistema en su conjunto (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p.213). En este tipo de contextos, es importante considerar cómo estas variables interactúan entre sí para entender mejor el problema.

La investigación es de tipo descriptivo y correlacional, lo que implica que se busca no solo describir las tecnologías emergentes de transformación de residuos y la infraestructura de reciclaje existente, sino también evaluar la relación entre ambos. Este enfoque permitirá

identificar cómo las tecnologías innovadoras pueden impactar la eficiencia del reciclaje en el país.

Se realiza una definición de etapas para desarrollar la investigación y de esta manera ejecutar cada instrumento de recolección de datos de manera ordenada y proceder a realizar su respectivo análisis:

- a. Revisión bibliográfica de artículos, revistas científicas, informes, libro y documentos similares que contengan la información que se requiere para el objeto de estudio. Para realizar esta búsqueda se utilizarán base de datos confiables y se tendrán en cuenta las palabras claves definidas las cuales son: tecnologías emergentes, gestión de residuos sólidos, reciclaje, sostenibilidad ambiental, transformación de residuos, infraestructura de reciclaje, innovación tecnológica.
- b. Identificar percepciones sobre la gestión de residuos en el país buscando obtener la información necesaria para realizar un análisis de contenido.
- c. Con las técnicas de análisis de datos identificar cuál podría ser la solución más prometedora para la transformación de residuos en el país.

5.1.2. Tecnologías de transformación de residuos:

Se analizarán las tecnologías emergentes a nivel mundial, revisando su viabilidad y adaptabilidad para su implementación en Colombia.

5.1.3. Definición de Variables:

Las variables para investigar son esenciales para cumplir los objetivos específicos planteados ya que definen qué aspectos se medirán y cómo se relacionan entre sí. En este estudio, se considerarán las siguientes variables:

5.1.4. Impacto ambiental y económico:

Se evaluará el impacto de las tecnologías emergentes, identificando aquellas que logran un equilibrio entre sostenibilidad ecológica y viabilidad económica.

Infraestructura de manejo de residuos en Colombia: Se investigarán las técnicas y la infraestructura actuales, con el objetivo de identificar brechas y oportunidades donde las tecnologías emergentes puedan integrarse.

La tabla 1 resume las variables clave que guiarán esta investigación, se presentan las definiciones conceptuales y operacionales de cada variable, junto con sus dimensiones, para proporcionar un marco claro que permita entender cómo se abordarán los distintos aspectos del problema de la ineficiencia en la gestión de residuos en el país.

Tabla 1.
Variables de investigación

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones
Tecnologías de transformación de residuos	Se refiere a los métodos y procesos innovadores utilizados globalmente para convertir residuos en recursos útiles, como energía, compost o materiales reciclables. Este análisis incluye tecnologías como la digestión anaeróbica, la pirólisis y la gasificación, evaluando su viabilidad y adaptabilidad en el	Se medirá a través de la identificación de tecnologías específicas, recopilando información de estudios de caso y artículos científicos que documentan su eficacia y aplicabilidad en diferentes contextos. Se considerará la implementación actual en Colombia y su comparación	Estrategias de Implementación: Se analizarán las estrategias y planes utilizados por empresas y gobiernos para integrar tecnologías emergentes en la gestión de residuos, identificando barreras y facilitadores en su adopción. Acceso a Información: Se

contexto colombiano, con ejemplos considerando factores exitosos como infraestructura, internacionales. cultura y normativas.

evaluará la disponibilidad y accesibilidad de información sobre tecnologías emergentes, utilizando encuestas a expertos y revisión de literatura.

Impacto en la Comunidad: Se evaluará cómo las nuevas tecnologías han influido en la percepción de la comunidad sobre la gestión de residuos, a través de testimonios, encuestas y estudios de caso que reflejen cambios en la actitud hacia el reciclaje.

Impacto ambiental y económico

Se enfoca en evaluar el impacto de las tecnologías emergentes en la sostenibilidad ecológica y su viabilidad económica, buscando identificar aquellas que

Se llevará a cabo mediante la recopilación y análisis de datos existentes sobre la eficacia de tecnologías emergentes, centrándose en

Eficiencia Ecológica: Se medirá el impacto ambiental positivo de las tecnologías emergentes, como la reducción de residuos.

Percepción de

equilibran estos dos aspectos. Esto implica analizar cómo las tecnologías pueden reducir residuos y emisiones, al tiempo que ofrecen beneficios económicos y sociales.

estudios previos que documenten sus impactos positivos en el medio ambiente y la economía local. Se utilizarán encuestas para obtener información sobre la percepción de los beneficiarios respecto a estos impactos.

Sostenibilidad: Se evaluará la percepción de las comunidades y actores del sector sobre la sostenibilidad de las tecnologías emergentes, a través de encuestas y análisis de datos.

Infraestructura de reciclaje en Colombia	Se refiere a las instalaciones, técnicas y sistemas actuales en Colombia destinados a la gestión de residuos, incluyendo reciclaje, compostaje y vertederos. Este análisis busca identificar brechas y oportunidades para la integración de tecnologías emergentes, evaluando la eficacia de la infraestructura existente y su adecuación a las	Se analizarán informes existentes sobre la infraestructura actual, su capacidad de gestión de residuos, utilizando estadísticas de organismos gubernamentales y estudios previos. Se buscará información sobre el volumen de residuos manejados y la eficiencia en el proceso de reciclaje.	Tecnología utilizada: Mediante la revisión documental se identificará el tipo de tecnologías y métodos empleados en las instalaciones de reciclaje. Impacto en la Comunidad: Se evaluará la percepción de la comunidad sobre la infraestructura de manejo de residuos, utilizando encuestas y análisis de testimonios que
---	---	---	--

necesidades actuales.

reflejen su
satisfacción y los
desafíos percibidos.

Nota: Elaboración propia. Cada variable ha sido seleccionada por su relevancia en el análisis de la gestión de residuos en Colombia y su interrelación con las tecnologías emergentes.

5.1.5. Población y Muestra:

La población objetivo de esta investigación está compuesta por diversos actores clave en el sector de la gestión de residuos en Colombia. La inclusión de múltiples perspectivas es esencial para obtener una visión integral del panorama actual y de las oportunidades para implementar tecnologías emergentes. A continuación, se detallan los principales grupos que se considerarán:

5.1.6. Expertos en gestión de residuos:

Este grupo está conformado por investigadores, académicos y/o profesionales que se especializan en tecnologías de reciclaje y sostenibilidad. Su conocimiento profundo sobre las tendencias globales en la transformación de residuos proporcionará un contexto crítico para evaluar la viabilidad y la adaptabilidad de estas tecnologías en el entorno colombiano.

El tamaño de la población para la recolección de datos corresponderá a un muestreo no probabilístico por conveniencia, lo que implicará seleccionar expertos sobre el tema y en disposición a colaborar en el estudio. Este tipo de muestreo permite acceder de manera más rápida y eficiente a la información necesaria (Etikan, 2016). Se incluirán al menos las entrevistas de 4 expertos, procurando que la muestra sea diversa en términos del sector en el que posean experiencia.

5.1.7. Participantes del entorno ambiental:

Este grupo está compuesto por diversos actores clave en el sector de la gestión de residuos, abarca ciudadanos locales, estudiantes, empleados que interactúan en el entorno. La inclusión de múltiples perspectivas es esencial para obtener una visión integral del panorama actual y de las oportunidades para implementar tecnologías emergentes. Se espera encuestar a una población de 20 participantes del entorno ambiental.

5.1.8. Muestra para análisis documental:

Este grupo estará compuesto por el muestreo de la bibliografía que incluye estudios de caso, informes existentes sobre la gestión de residuos en el país. El estudio de estos documentos brindará a la investigación herramientas para describir, evaluar y comparar la aplicabilidad de las metodologías para el aprovechamiento de residuos.

Para el cumplimiento de los objetivos del presente documento se establece analizar 3 estudios de caso y 5 documentos (entre informes y artículos) pertenecientes a la bibliografía de esta investigación

5.2. Segundo nivel

5.2.1. Selección de métodos o instrumentos para recolección de información:

La recolección de datos es una etapa crucial en la investigación, ya que proporciona la base sobre la cual se analizarán y discutirán los hallazgos. Para garantizar una cobertura completa de las variables y contextos estudiados, se realizará una combinación de tres métodos los cuales se describen a continuación:

5.2.1.1. Encuestas:

Se diseñó un cuestionario estructurado (Anexo 1) que medirá la percepción sobre la efectividad de las tecnologías emergentes en la transformación de residuos. El cuestionario incluirá una combinación de preguntas cerradas, que permitirán obtener datos cuantitativos precisos, y preguntas abiertas, que darán a los encuestados la oportunidad de expresar sus

opiniones y experiencias de manera más detallada. Esta dualidad en el diseño facilitará un análisis tanto numérico como cualitativo. La encuesta se distribuirá en línea.

5.2.1.2. Entrevistas semiestructuradas:

Se elaboró un formato de entrevista (Anexo 1) que incluye preguntas clave, diseñadas para profundizar en la experiencia de los expertos. Este enfoque flexible permitirá que la conversación se adapte a las respuestas de los entrevistados, lo que facilitará la exploración de líneas de conversación relevantes que puedan surgir durante la entrevista. Como resultado, se obtendrá información rica y contextualizada sobre los desafíos y oportunidades actuales en el reciclaje, así como sobre la percepción de las tecnologías emergentes en el sector.

5.2.2. Revisión documental:

Se llevará a cabo un análisis de artículos científicos, estudios de caso, informes con datos estadísticos relacionados con la infraestructura de reciclaje y la generación de residuos buscando conocer el estado del arte del objeto en investigación. Este análisis de contenido permitirá identificar tendencias y patrones, así como entender un poco sobre los desafíos y oportunidades que se han presentado en la gestión de residuos y en particular en la implementación de tecnologías.

5.2.3. Técnicas de análisis de datos

Una vez completada la recolección de datos, se emplearán diversas técnicas de análisis para garantizar una comprensión de la información obtenida. En la Tabla 2 se relaciona cada técnica de análisis de datos con un método de recolección de información que a su vez se relaciona con un objetivo específico.

Tabla 2

Técnicas de Análisis de Datos

Objetivo específico	Método recolección de	Técnica de análisis de datos
----------------------------	----------------------------------	---

	información	
Investigar la infraestructura y las técnicas actuales de manejo de residuos en Colombia, para identificar las brechas y oportunidades donde las tecnologías emergentes puedan integrarse de manera efectiva, que puedan mejorar los procesos de reciclaje y la gestión sostenible de residuos en el país	Revisión documental	Análisis de contenido
	Entrevistas semiestructuradas	
Analizar las tecnologías emergentes a nivel mundial en la transformación de residuos, evaluando su viabilidad y adaptabilidad para ser implementadas en Colombia.	Revisión documental	Análisis de contenido
	Entrevistas semiestructuradas	
Evaluar el impacto ambiental y económico de las tecnologías emergentes en la transformación de residuos, identificando aquellas que ofrezcan un equilibrio entre la sostenibilidad ecológica y la viabilidad económica.	Encuestas	Análisis estadístico descriptivo
	Análisis de casos de estudio	Matriz multicriterio

Nota. Elaboración propia a partir de fuentes bibliográficas.

A continuación, se realiza una breve descripción de las técnicas de análisis de datos seleccionadas:

5.2.4. Análisis estadístico descriptivo:

Para los datos cuantitativos obtenidos de las encuestas, se llevará a cabo análisis estadístico descriptivo. Este enfoque incluirá el cálculo de diversas medidas de tendencia central, como la media y la mediana, que proporcionarán una idea clara del comportamiento general de los datos. Además, gracias a este método se ordenará la información por medio de

gráficas y medios visuales. Este análisis ofrecerá un resumen conciso y accesible, permitiendo identificar tendencias generales y patrones en las respuestas de los encuestados.

5.2.5. Análisis cualitativo, análisis de contenido :

Los datos recopilados a partir de las entrevistas y la preguntas con respuestas abiertas se someterán a un análisis cualitativo, específicamente mediante el análisis del discurso o contenido. Esta técnica permitirá identificar patrones, temas y categorías relevantes en las narrativas de los participantes. Al centrarse en la interpretación de las experiencias y percepciones de los entrevistados y encuestados sobre el uso de tecnologías en la gestión de residuos, se buscará comprender las dinámicas subyacentes y las realidades contextuales que afectan su implementación. Este enfoque enriquecerá el análisis, proporcionando una visión más profunda y matizada de los desafíos y oportunidades en el sector de transformación de residuos.

5.2.6. Matriz multicriterio:

Esta herramienta de análisis de datos facilita la evaluación y comparación de diversas alternativas mediante la ponderación de criterios previamente definidos. La matriz multicriterio se estructura en cuatro filas, que representan las tecnologías más destacadas, y ocho columnas, correspondientes a los criterios evaluados. Cada celda de la matriz contiene un puntaje del 1 al 10, asignado a cada tecnología con base en su desempeño respecto a cada criterio. Asimismo, se ha determinado un nivel de relevancia para cada criterio, lo que permite calcular la ponderación. Una vez obtenido el resultado ponderado para cada tecnología, se realiza un análisis que identifica la opción más adecuada según los datos obtenidos. En consecuencia, esta herramienta resulta fundamental para la toma de decisiones, ya que permite un análisis sistemático y objetivo de múltiples alternativas considerando diversos criterios clave.

6. Análisis y discusión de los resultados

6.1. Análisis de contenidos: Casos de estudio:

6.1.1. Planta Maresme en Barcelona, España.

La Planta de Tratamiento de Residuos del Maresme es un ejemplo destacado de tecnología avanzada y sostenibilidad en la gestión de residuos urbanos. Ubicada en Cataluña, España, sirve a 28 municipios con una población aproximada de 470.000 habitantes. La planta combina métodos de tratamiento mecánico-biológico y valorización energética, optimizando el manejo de más de 280.000 toneladas de residuos al año, integrando principios de economía circular y generación de energía renovable (veolia, 2019).

El Desafío: La operación y mantenimiento de una planta de esta envergadura supone varios retos:

1. Gestión eficiente de grandes volúmenes de residuos con diversa composición.
2. Optimización energética mediante el aprovechamiento máximo de los residuos.
3. Cumplimiento normativo dentro de un marco de sostenibilidad y economía circular.
4. Concienciación pública, a través de visitas pedagógicas y comunicación activa.

Beneficios Clave:

6.1.1.1. Impacto Ambiental Positivo:

- Reducción de emisiones de CO₂ en aproximadamente 5.160 toneladas al año mediante la valorización energética y digestión anaeróbica.
- Producción de energía suficiente para cubrir las necesidades de 30.000 hogares.

6.1.1.2. Visibilidad y Educación:

- Programa de visitas pedagógicas para fomentar la concienciación ciudadana sobre el reciclaje y la sostenibilidad.

6.1.1.3. Economía Circular:

- Recuperación y reutilización de materiales desde la fracción resto y residuos voluminosos.
- Minimización del impacto ambiental de los residuos no reciclables.

6.1.1.4. Contribución Energética Local:

- Generación de energía renovable para la región, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles.

6.1.1.5. Lecciones Clave:

1. Integración Tecnológica: La combinación de procesos avanzados (mecánicos, biológicos y energéticos) maximiza la eficiencia del tratamiento de residuos.
2. Colaboración Público-Privada: La participación de actores como Veolia facilita la implementación de soluciones innovadoras.
3. Modelo Replicable: Este enfoque puede adaptarse a otras regiones para enfrentar desafíos similares en la gestión de residuos urbanos.

El Centro Integral de Valorización de Residuos del Maresme es un modelo exitoso de gestión sostenible de residuos urbanos. En la figura N°5 se muestra su capacidad para integrar tecnología, sostenibilidad y participación comunitaria lo posiciona como un referente en Europa, alineándose con los objetivos globales de lucha contra el cambio climático y transición hacia una economía circular.

Figura 5.

Planta Maresme de TMB (Tratamiento mecánico Biológico) en Barcelona, España



Nota: tomado de (Maresme Circular, 2019)

El Centro Integral de Valorización de Residuos del Maresme es un modelo exitoso de gestión sostenible de residuos urbanos. Su capacidad para integrar tecnología, sostenibilidad y participación comunitaria lo posiciona como un referente en Europa, alineándose con los objetivos globales de lucha contra el cambio climático y transición hacia una economía circular.

6.1.2. Planta de Valorización de Residuos de Shenzhen, China.

La planta de valorización energética de Shenzhen se proyecta como la mayor instalación de su tipo en el mundo. Diseñada para tratar un mínimo de 5.000 toneladas diarias de residuos, aborda de manera integral el desafío de gestionar los desechos generados por una población de más de 10 millones de personas. Esta instalación, que combina incineración con generación de energía, integra elementos de diseño sostenible y tecnologías avanzadas, convirtiéndose en un modelo innovador en la gestión de residuos urbanos a gran escala como se puede evidenciar en la figura N°6 el nivel de infraestructura de la planta nos permite apreciar el desarrollo de ingeniería del país (CTR Mediterraneo, 2016).

El Desafío: Shenzhen, una de las ciudades más pobladas y desarrolladas de China, enfrenta retos significativos:

1. Generación masiva de residuos: La ciudad produce más de 15.000 toneladas diarias de basura.
2. Espacio insuficiente para vertederos: El crecimiento urbano ha reducido la disponibilidad de terrenos adecuados para la disposición final de desechos.
3. Demanda energética creciente: Shenzhen necesita fuentes de energía sostenibles para mantener su desarrollo económico y urbano.
4. Expectativas ambientales: La sociedad y la comunidad internacional exigen soluciones alineadas con los principios de sostenibilidad y reducción de emisiones.

Solución Implementada: La planta de Shenzhen combina incineración avanzada con generación de energía, integrando elementos de diseño arquitectónico y sostenibilidad. Sus características principales incluyen:

6.1.2.1. Capacidad Operativa:

- Tratamiento diario de 5.000 toneladas de residuos sólidos, aproximadamente un tercio de los desechos de la ciudad.
- Proceso basado en un ciclo termodinámico para convertir el calor generado en energía eléctrica.

6.1.2.2. Generación de Energía Renovable:

- Techo de 1,6 kilómetros de longitud con 44.000 m² de paneles solares, capaces de generar electricidad limpia adicional.
- Integración de tecnologías modernas que aprovechan al máximo los residuos.

6.1.2.3. Diseño Arquitectónico y Educación:

- Ganador de un concurso internacional, el diseño prioriza la funcionalidad y la estética.

- La planta está diseñada para recibir visitas turísticas y educativas, promoviendo la transparencia y la sensibilización pública.

6.1.2.4. Sostenibilidad e Innovación:

- Incorporación de tecnologías de filtración y control de emisiones para minimizar el impacto ambiental.
- Promoción de un enfoque circular en la gestión de residuos, al tiempo que se aprovechan los desechos para generar electricidad.

6.1.2.5. Lecciones Clave:

Escalabilidad en la Gestión de Residuos:

- Las ciudades con altos niveles de generación de desechos requieren soluciones tecnológicas integrales que combinen gestión de residuos con producción de recursos útiles como energía.

Diseño como Herramienta Educativa:

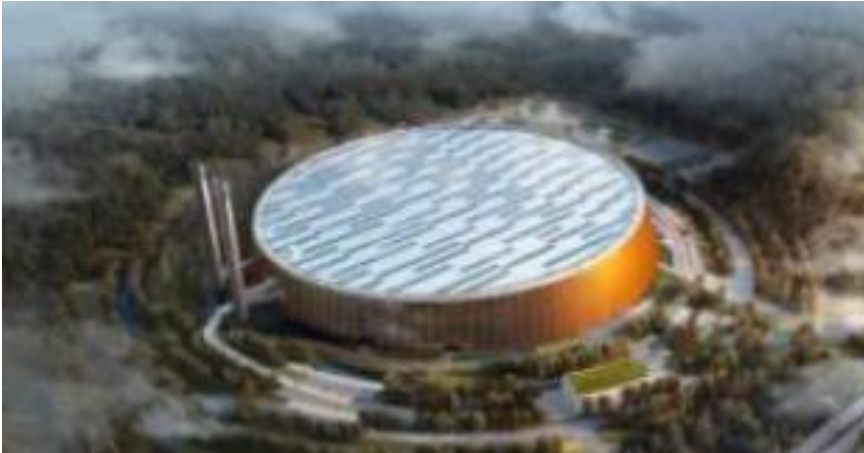
- Integrar elementos arquitectónicos que permitan la interacción con el público promueve la transparencia y sensibilización ambiental.

Complemento en la Economía Circular:

- Las plantas de valorización energética son una pieza clave, pero no deben sustituir estrategias más amplias de reciclaje y reducción de residuos.

Figura 6.

Planta de Termovalorización en Shenzhen, China.



Nota: tomado de (Residuos Profesional, 2016)

La planta de valorización energética de Shenzhen representa un avance significativo en la gestión de residuos urbanos a gran escala, al tiempo que contribuye al suministro de energía sostenible para la ciudad. Aunque no es una solución definitiva a todos los desafíos ambientales, su enfoque innovador y capacidad para procesar grandes volúmenes de basura la posicionan como un modelo a seguir para otras ciudades enfrentando problemas similares. Este proyecto destaca la importancia de integrar tecnología, diseño y sostenibilidad en la búsqueda de soluciones al creciente problema global de los residuos (CTR Mediterraneo, 2016).

6.1.3. Planta de Composta Bordo Poniente en CDMX, México.

La planta de composta de Bordo Poniente, ubicada en el kilómetro 3.5 de la autopista Peñón-Texcoco, es una de las principales iniciativas de la Ciudad de México para la gestión sostenible de residuos orgánicos. Desde su apertura en 2012, ha producido más de 106 mil toneladas de composta, contribuyendo a mejorar las áreas verdes de la ciudad y reduciendo la cantidad de residuos enviados a rellenos sanitarios (Ricardo Rubí, 2023). Este caso refleja un modelo funcional de economía circular aplicado a una de las metrópolis más grandes de América Latina.

El Desafío: La Ciudad de México enfrenta importantes retos en la gestión de residuos sólidos:

1. Volumen masivo de residuos: A diario, llegan miles de toneladas de basura al relleno sanitario de Bordo Poniente desde el área metropolitana.
2. Necesidad de infraestructura: La capital requiere instalaciones para procesar eficazmente los desechos orgánicos y minimizar su impacto ambiental.
3. Recuperación de espacios verdes: La falta de mantenimiento y recursos ha afectado parques, bosques y áreas naturales de la ciudad.
4. Concienciación ciudadana: Fomentar la separación adecuada de residuos y la participación de los ciudadanos en las estrategias de reciclaje.

Impacto y Beneficios:

6.1.4. Mejoras Ambientales:

- Reducción de la cantidad de residuos orgánicos enviados a rellenos sanitarios.
- Producción de más de 106 mil toneladas de composta que favorecen la calidad del suelo y el crecimiento vegetal.

6.1.5. Fomento de la Economía Circular:

- Transformación de residuos en recursos útiles para la ciudad.
- Impulso a la sostenibilidad urbana mediante el reaprovechamiento de desechos.

6.1.5.1. Recuperación de Espacios Verdes:

- Contribución al mantenimiento y reforestación de parques y áreas naturales, beneficiando la calidad de vida en la CDMX.

6.1.5.2. Educación y Participación Ciudadana:

- Incremento en la conciencia sobre la separación de residuos y el manejo adecuado de desechos orgánicos.

6.1.5.3. Lecciones Clave:

1. Valor del Compostaje Urbano:

- Las plantas de composta son una herramienta clave para reducir la presión sobre los rellenos sanitarios y mejorar las áreas verdes urbanas.

2. Importancia de la Infraestructura Logística:

- Los centros de transferencia y un sistema de recolección eficiente son fundamentales para el éxito de este tipo de iniciativas.

3. Complementariedad de Estrategias:

- Iniciativas de compostaje deben integrarse con otras estrategias de gestión de residuos, como reciclaje y reducción de desechos.

4. Participación Comunitaria:

- La separación de residuos en la fuente es esencial para maximizar el impacto positivo de estas plantas.

Figura 7.

Planta de Composta Bordo Poniente, CDMX



Nota: tomado de (yadin xolalpa, 2011)

La planta de composta Bordo Poniente, con una producción de 456 toneladas diarias, es un modelo de gestión sostenible de residuos orgánicos en la CDMX. Desde 2012, ha transformado desechos provenientes de estaciones de transferencia y plantas de selección en composta útil para áreas verdes, contribuyendo a mejorar la imagen urbana, reducir la fauna nociva, evitar la obstrucción de coladeras y fomentar la separación de residuos. Este proyecto no solo reduce el impacto ambiental de los rellenos sanitarios, sino que también promueve la economía circular, resaltando la necesidad de ampliar estas iniciativas y fortalecer la participación ciudadana para maximizar su impacto positivo en el medio ambiente y la calidad de vida urbana (Ricardo Rubí, 2023).

6.2. Resultados para la percepción de tecnologías para la transformación de residuos:

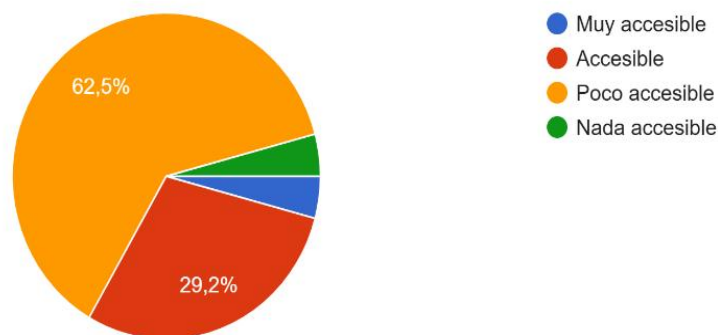
Se realizó una encuesta con el fin de medir el nivel de aceptación cultural sobre las tecnologías emergentes.

Figura 8

Accesibilidad a las tecnologías para la transformación de residuos sólidos.

¿Cuál es su opinión sobre la accesibilidad de estas tecnologías en su región?

24 respuestas



Nota. Elaboración propia con datos obtenidos de la encuesta

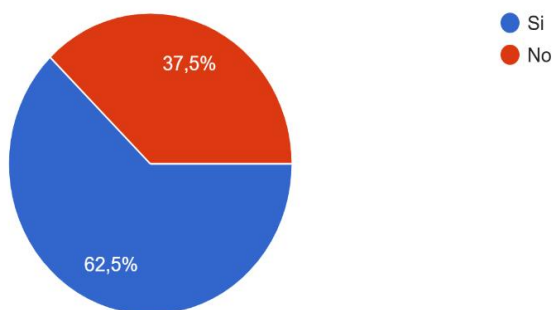
Figura 9.

Conocimiento de existencia de tecnologías para la transformación de residuos

sólidos

¿Conoce alguna tecnología emergente utilizada para la transformación de residuos?

24 respuestas



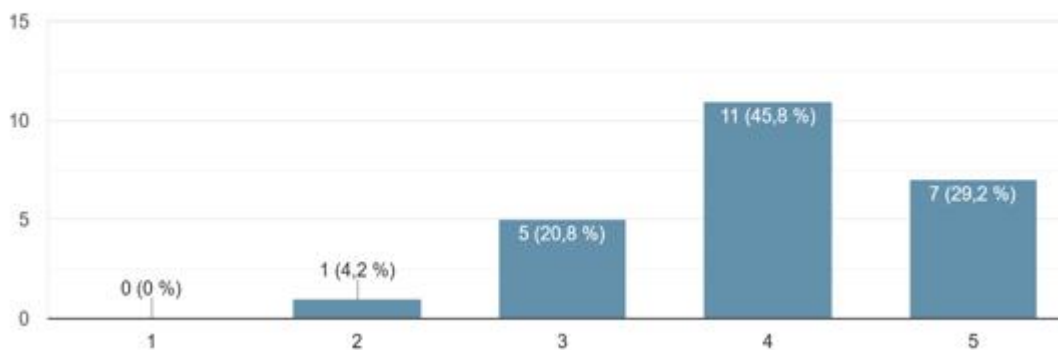
Nota. Elaboración propia con datos obtenidos de la encuesta.

Figura 10.

Opinion sobre efectividad de tecnologías para la transformación de residuos sólidos

En una escala del 1 al 5, ¿cómo calificaría la efectividad de las tecnologías emergentes en la transformación de residuos?

24 respuestas



Nota. Elaboración propia con datos obtenidos de la encuesta

Los resultados de la encuesta reflejan una realidad compleja en torno al conocimiento, la accesibilidad y la percepción de efectividad de las tecnologías emergentes para la transformación de residuos. De los 24 encuestados, solo el 37% indicó conocer estas tecnologías, mientras que el 62.5% considera que su accesibilidad es "muy poca", y apenas el 29.2% las encuentra accesibles. Esto evidencia barreras importantes, posiblemente relacionadas con costos, infraestructura o disponibilidad, que limitan su adopción.

Sin embargo, la percepción de efectividad es mayoritariamente positiva. En una escala del 1 al 5, el 45.8% calificó la efectividad de estas tecnologías con un puntaje de 4, y el 29.2% con el máximo puntaje de 5, lo que sugiere que quienes las conocen reconocen su alto potencial. Solo el 4.2% les asignó una calificación baja (2), y nadie las calificó con el puntaje mínimo (1), lo que refuerza esta tendencia favorable.

El análisis demográfico muestra que el 66.7% de los encuestados tiene entre 18 y 30 años, seguido por un 20.8% en el rango de 31 a 45 años y un 12.5% entre 46 y 60 años, destacando la predominancia de una población joven en la muestra. En cuanto al sector laboral, el 62.5% trabaja en el sector privado, lo que sugiere que las perspectivas reflejan en gran medida las opiniones de este ámbito, mientras que el sector público y los demás grupos tienen menor representación.

Gracias a los resultados de esta encuesta, fue posible definir algunos criterios clave para la elaboración de una matriz multicriterio que facilite la evaluación y priorización de acciones relacionadas con la implementación y mejora de estas tecnologías. Estos criterios toman en cuenta factores como el conocimiento, la accesibilidad, la efectividad percibida y las diferencias demográficas y sectoriales.

En conclusión, aunque el conocimiento y la accesibilidad a estas tecnologías son áreas críticas para mejorar, la percepción positiva de su efectividad abre una ventana de oportunidad para promover su difusión y uso. Sería clave implementar estrategias de sensibilización,

capacitación y generación de incentivos que aborden las barreras actuales, enfocándose tanto en el ámbito privado como público, y en diferentes grupos de edad, para facilitar su adopción y maximizar su impacto en la gestión de residuos.

6.3. Definición de criterios de la matriz multicriterio

Para llevar a cabo la matriz multicriterio, se considerarán diversos criterios de evaluación que incluyen: funcionamiento, tipos de residuos aprovechados, capacidad de aprovechamiento, escalabilidad, subproductos útiles, aceptación social y cultural, viabilidad económica e impacto ambiental. Estos criterios serán valorados mediante una escala numérica o de puntuación, ponderándose según su importancia relativa en el análisis multicriterio. La matriz resultante permitirá realizar una evaluación objetiva y comparativa de diferentes metodologías, facilitando la selección de la más adecuada para el manejo de residuos sólidos en el contexto colombiano.

A continuación, se presentan y describen los criterios seleccionados:

1. **Funcionamiento:** Analiza la efectividad y eficiencia operativa de la metodología, evaluando su factibilidad en la gestión de residuos sólidos en Colombia.
2. **Tipos de residuos aprovechados:** Considera la diversidad de residuos que puede procesar la metodología, identificando si es específica o general en su aplicación.
3. **Capacidad de aprovechamiento:** Mide la habilidad de la metodología para procesar residuos sólidos, tanto en términos de cantidad como de calidad de los materiales recuperados o transformados.
4. **Escalabilidad:** Analiza el potencial de la metodología para ser implementada en diferentes contextos o a mayor escala.
5. **Subproductos útiles:** Evalúa los productos derivados del proceso y su potencial para generar valor o ser aprovechados comercialmente.

6. Aceptación social y cultural: Examina el nivel de aceptación de la metodología por parte de las comunidades, considerando factores culturales y sociales que pueden influir en su adopción.

7. Viabilidad económica: Valora los costos de implementación, operación y mantenimiento, así como los beneficios económicos asociados.

8. Impacto ambiental: Considera los efectos de la metodología en la reducción de contaminación y su contribución a prácticas sostenibles

Finalmente, el análisis incluirá casos de éxito y una revisión bibliográfica de metodologías innovadoras, lo que servirá como base para completar la matriz multicriterio.

Tabla 3.

Asignación de porcentaje por criterio.

Criterios	
Funcionamiento	Tipos de residuo
15%	10%
Capacidad	Escalabilidad
15%	20%
Subproductos útiles	Aceptación social y cultural
10%	5%
Viabilidad económica	Impacto ambiental
10%	15%

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se detallan los pasos considerados en la construcción de la matriz, una vez definidos los criterios y las alternativas:

1. Asignación del valor de relevancia a los criterios

Se asignaron valores de relevancia a cada criterio para reflejar su importancia relativa en el proceso de toma de decisiones. Esta asignación se fundamentó en la investigación desarrollada a lo largo del estudio. Los valores de relevancia establecidos fueron los siguientes:

- Funcionamiento: 0.15 (15%)
- Tipos de residuos que aprovecha: 0.1 (10%)
- Capacidad de aprovechamiento: 0.15 (15%)
- Escalabilidad: 0.2 (20%)
- Subproductos útiles: 0.1 (10%)
- Aceptación social y cultural: 0.05 (5%)
- Viabilidad económica: 0.1 (10%)
- Impacto ambiental: 0.15 (15%)

Es importante destacar que el criterio con mayor peso es la escalabilidad (20%), ya que el objetivo principal del estudio es identificar la tecnología más prometedora para el país, que además sea aplicable a nivel nacional. Sin embargo, también se consideraron aspectos como un funcionamiento eficiente, alta capacidad de aprovechamiento de residuos y un impacto ambiental significativo.

6.3.1. Determinación de la escala de puntaje

Se estableció una escala de puntaje para evaluar el grado de cumplimiento de cada criterio por parte de las alternativas. Esta escala mide el desempeño de cada opción en función de los criterios definidos, permitiendo compararlas de manera objetiva. Los valores asignados fueron los siguientes:

- 1: Bajo desempeño
- 5: Desempeño medio
- 10: Alto desempeño

Los puntajes se asignaron con base en el rendimiento observado de cada alternativa frente a los criterios establecidos.

3. Elaboración de la matriz

Con los criterios, alternativas, pesos asignados y escala de desempeño definidos, se procedió a construir la matriz. El objetivo fue calcular las puntuaciones ponderadas de cada alternativa, lo que permitió identificar las metodologías con mayor aplicabilidad en Colombia.

A continuación, se presenta la tabla que muestra los resultados obtenidos en la matriz.

Tabla 4.

Matriz de criterios para la Selección de la tecnología más viable en el aprovechamiento de Residuos en Colombia.

Tecnologías	Funcionamiento	Tipos de residuo	Capacidad	Escalabilidad	
Proyectos de digestión anaeróbica o producción de biogás	Relevancia	0,15	0,10	0,15	0,20
	Puntaje (de 1 a 10)	6	7	10	6
	Sub total	0,90	0,70	1,50	1,20
Plantas de compostaje	Relevancia	0,15	0,10	0,15	0,20
	Puntaje (de 1 a 10)	5	5	5	8
	Sub total	0,75	0,50	0,75	1,60
Plantas de Termovalorización	Relevancia	0,15	0,10	0,15	0,20
	Puntaje (de 1 a 10)	10	10	10	8
	Sub total	1,50	1,00	1,50	1,60
Plantas de tratamiento mecánico biológico	Relevancia	0,15	0,10	0,15	0,20
	Puntaje (de 1 a 10)	10	10	10	7
	Sub total	1,50	1,00	1,50	1,40

Subproductos útiles	Aceptación social y cultural	Viabilidad económica	Impacto ambiental	Puntuación Total
0,10	0,05	0,10	0,15	7,85
10	7	7	10	
1,00	0,35	0,70	1,50	
0,10	0,05	0,10	0,15	6,70
5	10	6	10	
0,50	0,50	0,60	1,50	
0,10	0,05	0,10	0,15	8,75
10	5	4	10	
1,00	0,25	0,40	1,50	
0,10	0,05	0,10	0,15	8,90
10	8	6	10	
1,00	0,40	0,60	1,50	

Nota. Elaboración propia a partir de análisis de entrevistas a expertos.

El Tratamiento Mecánico-Biológico (TMB) emerge como una solución integral y versátil para la gestión de residuos sólidos en Colombia. Este sistema tiene la capacidad de procesar distintos tipos de residuos, permitiendo la recuperación de materiales reciclables, la producción de compost y la generación de energía. Estas características lo convierten en una herramienta clave para avanzar hacia una economía circular. Sin embargo, su implementación enfrenta barreras significativas, como los altos costos de construcción y operación de las plantas, la necesidad de técnicos especializados y la limitada capacidad de los municipios para financiar estas infraestructuras.

Para superar estas dificultades, se podrían implementar estrategias como:

- Promover esquemas de cooperación regional, donde varios municipios compartan instalaciones de TMB.
- Buscar apoyo financiero mediante fondos internacionales y alianzas con el sector privado.
- Realizar estudios de viabilidad económica que demuestren los beneficios a largo plazo, como la reducción de costos de disposición final en rellenos sanitarios y el aumento de ingresos por la venta de subproductos.

7. Conclusiones

Avances en investigación y desarrollo (I+D): Aunque se han logrado importantes avances en investigación y desarrollo para el tratamiento de residuos orgánicos, las tecnologías disponibles aún enfrentan limitaciones para su implementación en escenarios reales. Estas restricciones incluyen altos costos de inversión inicial, falta de infraestructura adecuada y desafíos regulatorios que dificultan la valorización energética. Sin embargo, existe un gran potencial para integrar estos desarrollos en sistemas de gestión de residuos, especialmente si se alinean con las necesidades locales y se adaptan a contextos económicos y sociales específicos. Es fundamental que las políticas públicas fomenten la financiación y el apoyo técnico a la investigación aplicada, incentivando a universidades, empresas privadas y gobiernos a trabajar conjuntamente en soluciones escalables.

Fomento de proyectos público-privados: Las alianzas entre el sector público y privado son clave para impulsar tecnologías innovadoras que promuevan una economía circular. Proyectos colaborativos podrían enfocarse en la creación de plantas piloto que sirvan como casos de estudio, promoviendo la transferencia de conocimiento y la reducción de riesgos financieros para las empresas interesadas. Además, estas alianzas podrían facilitar el acceso a subsidios, beneficios tributarios y financiamiento internacional, como fondos para el desarrollo sostenible o bonos verdes, que ayuden a mitigar el impacto económico inicial. La combinación de esfuerzos permitiría acelerar la adopción de tecnologías sostenibles, impactando positivamente tanto el medio ambiente como las comunidades locales.

Sensibilización sobre la separación en la fuente: La separación en la fuente es uno de los principales desafíos para la correcta gestión de residuos orgánicos en Colombia. Actualmente, muchas personas desconocen la importancia de esta práctica, lo que reduce significativamente la eficiencia de los sistemas de tratamiento. Es necesario desarrollar

programas de educación ambiental dirigidos a hogares, empresas y comunidades, destacando los beneficios ambientales, sociales y económicos de clasificar correctamente los residuos. Estos programas deben estar acompañados de incentivos tangibles, como descuentos en tarifas de recolección para quienes adopten prácticas responsables. Además, se requiere fortalecer la normatividad que regula la separación en la fuente, con mecanismos de seguimiento y sanciones para garantizar su cumplimiento.

Aprovechamiento de oportunidades del entorno exterior: El entorno internacional ofrece una ventana de oportunidades financieras y tecnológicas para mejorar la gestión de residuos en Colombia. Por ejemplo, el acceso a mercados de bonos de carbono o programas de cooperación internacional en sostenibilidad podría financiar proyectos innovadores. Al mismo tiempo, las crecientes exigencias globales en términos de reducción de emisiones y economía circular posicionan a los países que invierten en soluciones sostenibles como receptores potenciales de inversión extranjera. Colombia podría beneficiarse si logra alinear sus estrategias de gestión de residuos con estas tendencias, convirtiendo los desafíos actuales en oportunidades competitivas.

Potencial del Tratamiento Mecánico-Biológico (TMB): Se destaca como una solución integral y versátil para la gestión de residuos sólidos en Colombia, gracias a su capacidad para procesar diversos tipos de residuos y generar materiales reciclables, compost y energía. Su desempeño es sólido en aspectos como funcionamiento, capacidad de aprovechamiento y tipos de residuos tratados. Sin embargo, su principal desafío radica en los altos costos de inversión y operación, que requieren un compromiso financiero significativo por parte de los sectores público y privado, así como personal técnico especializado y recursos municipales adecuados para su implementación.

Aunque a gran escala aún no se ha identificado una tecnología de transformación de residuos que resulte completamente prometedora y viable para ser implementada de manera

masiva, es importante resaltar el potencial que existe en las pequeñas comunidades y en proyectos a menor escala. En estos contextos, la adopción de tecnologías emergentes para la gestión y transformación de residuos ha demostrado ser factible y efectiva. Esto se debe a que las necesidades locales, los volúmenes de residuos generados y la disponibilidad de recursos suelen ajustarse mejor a soluciones descentralizadas y de menor complejidad operativa.

La implementación de estas tecnologías a pequeña escala no solo permite un manejo más sostenible de los residuos dentro de las comunidades, sino que también genera un efecto multiplicador al servir como ejemplo para otras localidades cercanas. A medida que estas iniciativas locales logran resultados positivos, como la reducción de residuos destinados a rellenos sanitarios, la generación de subproductos útiles (compost, biogás, materiales reciclables) o la mejora de las condiciones ambientales, otras comunidades pueden verse motivadas a replicar o adaptar estas soluciones.

Además, estos proyectos locales fomentan la participación activa de las comunidades en la gestión de sus propios residuos, promoviendo la educación ambiental, la sensibilización sobre prácticas responsables, y la creación de modelos de economía circular que contribuyan al desarrollo sostenible. Por ejemplo, el uso de biodigestores, pequeñas plantas de compostaje, o sistemas de reciclaje organizados por las comunidades, son soluciones que no solo mejoran la calidad de vida, sino que también generan empleos locales y fortalecen el tejido social.

En este sentido, si bien la transformación de residuos a gran escala puede enfrentar barreras económicas, tecnológicas y logísticas, las iniciativas a pequeña escala ofrecen una oportunidad tangible y accesible para comenzar a abordar la problemática de la gestión de residuos. A largo plazo, el crecimiento y la integración de múltiples iniciativas locales podrían construir una base sólida para transitar hacia modelos más ambiciosos y amplios de manejo sostenible de residuos, contribuyendo significativamente a la reducción del impacto ambiental y a la adopción de prácticas más responsables en el país.

8. Referencias

- Abdul Hakim Shaah, M., Hossain, Md. S., Salem Allafi, F. A., Alsaedi, A., Ismail, N., Ab Kadir, M. O., & Ahmad, M. I. (2021). A review on non-edible oil as a potential feedstock for biodiesel: physicochemical properties and production technologies. *RSC Advances*, 11(40), 25018–25037. <https://doi.org/10.1039/D1RA04311K>
- Alam, S. S., Husain Khan, A., & Khan, N. A. (2022). Plastic waste management via thermochemical conversion of plastics into fuel: a review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(3), 1–20. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2097750>
- Alcaldía de Bogotá. (2017). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Bogotá, Colombia*. [https://www.habitatbogota.gov.co/sites/default/files/archivos-adjuntos/Informe%203\(2\).pdf](https://www.habitatbogota.gov.co/sites/default/files/archivos-adjuntos/Informe%203(2).pdf)
- Awasthi, S. K., Sarsaiya, S., Awasthi, M. K., Liu, T., Zhao, J., Kumar, S., & Zhang, Z. (2020). Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 299, 122555. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122555>
- Barrena, E., Canca, D., Ortega, F. A., & Piedra-De-La-Cuadra, R. (2020). Solidarity Behaviour for Optimizing the Waste Selective Collection. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 15(2), 133–140. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.150202>
- Belgiorno, V., De Feo, G., Della Rocca, C., & Napoli, R. M. A. (2003). Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management*, 23(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00149-6](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00149-6)
- Beyene, H. D., Werkneh, A. A., & Ambaye, T. G. (2018). Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. *Renewable Energy Focus*, 24, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2017.11.001>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social - CONPES. (2016). *Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/conpes-3874-de-2016.pdf>
- Correal Magda, & Rihm, A. (2022). *Hacia la valorización de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. Conceptos básicos, análisis de viabilidad y recomendaciones de políticas públicas*. <https://doi.org/10.18235/0003971>
- CTR Mediterraneo. (2016). La mayor planta de valorización energética de residuos del mundo, en China. *Ctrmediterraneo*. <http://www.ctrmediterraneo.com/noticias/la-mayor-planta-de-valorizacion-energetica-de-residuos-del-mundo-en-china/#:~:text=La%20mayor%20planta%20de%20valorizaci%C3%B3n%20energ%C3%A9tica%20de%20residuos%20del%20mundo%2C%20en%20China,-5%20abril%2C%202016&text=Se%20ubicar%C3%A1%20en%20la%20ciudad,m%C3%ADnimo%20de%205.000%20toneladas%20diarias>
- Dalke, R., Demro, D., Khalid, Y., Wu, H., & Urgun-Demirtas, M. (2021). Current status of anaerobic digestion of food waste in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111554. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111554>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2020). *Encuesta Nacional de Calidad de Vida 2020*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/calidad-de-vida-ecv/encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-ecv-2020>
- Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2016). *Nueva Medición de Desempeño Municipal – Resultados*. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Territorial/MDM/Resultados_MDM_2016_Final.pdf
- Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2018). *Reporte Nacional Voluntario 2018*. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/20338RNV_Versio769n_revisada_31.07.18.pdf
- Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2022). *Guía nacional para la adecuada separación de residuos sólidos 2022*. 1–64. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Vivienda%20Agua%20y%20Desarrollo%20Urbano/Guia_Residuos%20Solidos_Digital.pdf
- Di Lonardo, M. C., Franzese, M., Costa, G., Gavasci, R., & Lombardi, F. (2016). The application of SRF vs. RDF classification and specifications to the material flows of two mechanical-biological treatment plants of Rome: Comparison and implications. *Waste Management*, 47, 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.018>
- Etikan, I. (2016). Comparison of Convenience Sampling and Purposive Sampling. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.11648/j.ajtas.20160501.11>
- George Tchobanoglous, Hilary Theisen, & Samuel Vigil. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos* (McGraw-Hill).

- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación : las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. México.
- Hettiarachchi, H., Caucci, S., & Schwärzel, K. (Eds.). (2020). *Organic Waste Composting through Nexus Thinking*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36283-6>
- Khan, A. H., López-Maldonado, E. A., Alam, S. S., Khan, N. A., López, J. R. L., Herrera, P. F. M., Abutaleb, A., Ahmed, S., & Singh, L. (2022). Municipal solid waste generation and the current state of waste-to-energy potential: State of art review. *Energy Conversion and Management*, 267, 115905. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115905>
- Kumar, R., Singh, L., Zularisam, A. W., & Hai, F. I. (2018). Microbial fuel cell is emerging as a versatile technology: a review on its possible applications, challenges and strategies to improve the performances. *International Journal of Energy Research*, 42(2), 369–394. <https://doi.org/10.1002/er.3780>
- Kurniawan, T. A., Liang, X., Singh, D., Othman, M. H. D., Goh, H. H., Gikas, P., Kern, A. O., Kusworo, T. D., & Shoqeir, J. A. (2022). Harnessing landfill gas (LFG) for electricity: A strategy to mitigate greenhouse gas (GHG) emissions in Jakarta (Indonesia). *Journal of Environmental Management*, 301, 113882. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113882>
- Mandari, V., & Devarai, S. K. (2022). Biodiesel Production Using Homogeneous, Heterogeneous, and Enzyme Catalysts via Transesterification and Esterification Reactions: a Critical Review. *BioEnergy Research*, 15(2), 935–961. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10333-w>
- Maresme Circular. (2019). *El Centro Integral de Valorización de Residuos*. Consorcio Para El Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos Del Maresme. . <https://maresmecircular.cat/es/consorcio-para-el-tratamiento-de-residuos-solidos-urbanos-del-maresme/el-centro-integral-de-valorizacion-de-residuos/#1607940945359-6ae43967-758d>
- Minghua, Z., Xiumin, F., Rovetta, A., Qichang, H., Vicentini, F., Bingkai, L., Giusti, A., & Yi, L. (2009). Municipal solid waste management in Pudong New Area, China. *Waste Management*, 29(3), 1227–1233. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.016>
- Naciones Unidas - ONU. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Naved, M. M., Azad, A. M., Wathore, R., Bherwani, H., & Labhassetwar, N. (2022). *Ethanol Derived from Municipal Solid Waste for Sustainable Mobility* (pp. 77–95). https://doi.org/10.1007/978-981-16-8747-1_5
- Neto, A. B. P. S., Simões, C. L., & Simoes, R. (2024). Optimization of municipal solid waste collection system: systematic review with bibliometric literature analysis. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(4), 1906–1917. <https://doi.org/10.1007/s10163-024-01966-y>
- Pietro Graziani. (2018). Economía circular e innovación tecnológica en residuos sólidos: Oportunidades en América Latina. *CAF*, 1–92.
- Rasi, S., Veijanen, A., & Rintala, J. (2007). Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy*, 32(8), 1375–1380. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.10.018>
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. (2023). Diccionario de la lengua española, 23.ª ed., [versión 23.7 en línea]. <<https://dle.rae.es>> [Fecha de la consulta].
- Residuos Profesional. (2016). China construye la mayor planta de valorización de residuos del mundo. *Residuos Profesional*. <https://www.residuosprofesional.com/china-mayor-planta-valorizacion-residuos/>
- Ricardo Rubí. (2023). Planta de Bordo Poniente ha producido 106 mil toneladas de composta en CDMX. *El Heraldo de Mexico*. <https://heraldodemexico.com.mx/nacional/2023/10/25/planta-de-bordo-poniente-ha-producido-106-mil-toneladas-de-composta-en-cdmx-549646.html>
- Safdari, M.-S., Amini, E., Weise, D. R., & Fletcher, T. H. (2019). Heating rate and temperature effects on pyrolysis products from live wildland fuels. *Fuel*, 242, 295–304. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.040>
- Singh, L., Miller, A. G., Wang, L., & Liu, H. (2021). Scaling-up up-flow microbial electrolysis cells with a compact electrode configuration for continuous hydrogen production. *Bioresource Technology*, 331, 125030. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125030>
- Singh, L., Siddiqui, M. F., Ahmad, A., Rahim, M. H. Ab., Sakinah, M., & Wahid, Z. A. (2013). Application of polyethylene glycol immobilized Clostridium sp. LS2 for continuous hydrogen production from palm oil mill effluent in upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Biochemical Engineering Journal*, 70, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2012.10.010>

- Singh, L., & Wahid, Z. A. (2015). Methods for enhancing bio-hydrogen production from biological process: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.05.035>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - SSPD. (2015). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2015*. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informedisposicionfinalano2015-sspdp1%20%281%29.pdf>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - SSPD. (2021). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2020*. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_df_2020%20%281%29.pdf
- Trulli, E., Ferronato, N., Torretta, V., Piscitelli, M., Masi, S., & Mancini, I. (2018). Sustainable mechanical biological treatment of solid waste in urbanized areas with low recycling rates. *Waste Management*, 71, 556–564. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.018>
- Unión Europea. (2018). *Diario Oficial de la Unión Europea: DIRECTIVA (UE) 2018/851 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos*.
- veolia. (2019). Centro Integral de Valorización de Residuos del Maresme. *Veolia*. <https://www.latinoamerica.veolia.com/es/casos-estudio/centro-integral-valorizacion-residuos-maresme>
- World Bank Group. (2022). *Solid Waste Management*. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>
- yadin xolalpa. (2011). Bordo Poniente. *Punto Por Punto*.
- Zoë Lenkiewicz. (2024). *Global Waste Management Outlook 2024 - Beyond an age of waste: Turning rubbish into a resource* (John Smith, Ed.). United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939>

9. Anexos:

Anexo 1: Diseño de instrumentos para recolección de información

En este anexo, se presentan los instrumentos diseñados para la recolección de datos en el marco de la investigación que busca explorar y evaluar la percepción sobre la efectividad de las tecnologías emergentes en el contexto del reciclaje, así como identificar oportunidades para su implementación en Colombia.

Se incluyen dos formatos de recolección de datos: una encuesta estructurada y un protocolo de entrevista semiestructurada. La encuesta tiene como objetivo capturar las opiniones y experiencias de diversos participantes, permitiendo la obtención de datos tanto cuantitativos como cualitativos que reflejen la realidad del sector de gestión de residuos en el país. A través de preguntas cerradas y abiertas, se busca entender cómo se perciben las tecnologías emergentes y su impacto en la gestión de residuos.

El formato de entrevista, por su parte, está diseñado para facilitar una conversación más profunda con expertos en el campo ambiental. Las preguntas clave permitirán explorar en detalle sus experiencias y perspectivas, proporcionando información contextualizada sobre los desafíos y oportunidades actuales en la transformación de residuos.

9.1. Encuesta sobre la Percepción de Tecnologías Emergentes en la Transformación de Residuos

Agradecemos su disposición para participar en esta encuesta sobre la percepción y efectividad de las tecnologías emergentes en la transformación de residuos. Nuestro objetivo es recopilar información valiosa que nos ayude a entender cómo estas tecnologías pueden contribuir a mejorar la gestión de residuos en Colombia. La encuesta incluye una serie de preguntas tanto cerradas como abiertas, que nos permitirán obtener datos cuantitativos precisos y perspectivas cualitativas ricas.

Su opinión es fundamental para identificar desafíos y oportunidades en el sector del reciclaje.

La información recopilada será confidencial y se utilizará exclusivamente con fines de investigación. Agradecemos su colaboración y el tiempo que dedique a completar este cuestionario.

Sección 1: Información General

1. Edad:
 - Menos de 18 años
 - 18-30 años
 - 31-45 años
 - 46-60 años
 - Más de 60 años
2. Género:
 - Masculino
 - Femenino
 - Otro
 - Prefiero no decir
3. Nivel educativo:
 - Primaria
 - Secundaria
 - Técnico
 - Universitario
 - Postgrado
4. Sector en el que trabaja:
 - Público
 - Privado
 - Académico
 - Otro (especifique): _____
5. ¿En qué ciudad/municipio habita?

Sección 2: Percepción sobre Tecnologías Emergentes

6. ¿Conoce alguna tecnología emergente utilizada para la transformación de residuos?
 - Sí
 - No
7. Si respondió "Sí", por favor, mencione las tecnologías que conoce:
 - _____
8. En una escala del 1 al 5, ¿cómo calificaría la efectividad de las tecnologías emergentes en la transformación de residuos?
 - 1 (Nada efectivo)
 - 2 (Poco efectivo)
 - 3 (Moderadamente efectivo)
 - 4 (Efectivo)
 - 5 (Muy efectivo)
9. ¿Qué beneficios considera que ofrecen las tecnologías emergentes en la gestión de residuos? (Puede seleccionar más de una opción)
 - Reducción de residuos
 - Generación de energía

- Creación de empleo
- Mejora de la salud pública
- Otro (especifique): _____
- 10. ¿Cuál es su opinión sobre la accesibilidad de estas tecnologías en su región?
 - Muy accesible
 - Accesible
 - Poco accesible
 - Nada accesible
- 11. ¿Cree que las tecnologías emergentes pueden integrarse efectivamente en la gestión de residuos en Colombia?
 - Sí
 - No
 - No estoy seguro

Sección 3: Opiniones y Experiencias

- 11. ¿Ha tenido alguna experiencia personal con tecnologías emergentes en la gestión de residuos? Si es así, por favor compártala:
 - _____
- 12. Desde su perspectiva, ¿cuáles son los principales obstáculos para la implementación de tecnologías emergentes en Colombia?
 - _____
- 13. ¿Qué sugerencias daría para mejorar la adopción de tecnologías emergentes en la gestión de residuos?
 - _____
- 14. ¿Hay algo más que le gustaría agregar sobre su percepción de las tecnologías emergentes en la gestión de residuos?
 - _____

¡Agradecemos su participación! Su opinión es muy valiosa para nuestra investigación.

Notas para la implementación:

La encuesta se puede distribuir a través de plataformas en línea o en formato impreso según sea necesario.

Se realizará un pre-test de la encuesta con un grupo pequeño para ajustar cualquier pregunta que no sea clara o que pueda ser confusa.

Entrevista Semiestructurada sobre Gestión de Residuos y Tecnologías Emergentes para aplicar con un profesional en el campo ambiental

Introducción para la Entrevista

Estimado/a [Nombre del entrevistado]:

Le agradecemos sinceramente por aceptar participar en esta entrevista semiestructurada sobre la gestión de residuos y las tecnologías emergentes. Su experiencia y conocimientos en este ámbito son extremadamente valiosos para nuestro estudio, que busca explorar los desafíos y oportunidades actuales en el reciclaje en Colombia. Durante esta entrevista, le haremos preguntas sobre su experiencia, las tecnologías que considera más prometedoras y las estrategias que se están implementando en su región. La conversación será flexible, lo que nos permitirá profundizar en los temas que surjan y explorar su perspectiva de manera más completa.

Apreciamos su tiempo y disposición para compartir su visión sobre este importante tema. La información proporcionada será tratada de forma confidencial y se utilizará únicamente para fines de investigación.

Sección 1: Información General

- 1. Nombre:
 - _____
- 2. Cargo/Posición:
 - _____
- 3. Institución/Organización:
 - _____
- 4. Región/Ciudad/Municipio:
 - _____

Sección 2: Experiencia y Perspectivas

5. ¿Cuál es su experiencia en el campo de la gestión de residuos?
o [Espacio para respuesta]
6. ¿Qué tecnologías emergentes en la transformación de residuos considera más prometedoras? ¿Por qué?
o [Espacio para respuesta]
7. ¿Cuáles son los principales desafíos que enfrenta su organización o sector en la implementación de estas tecnologías?
o [Espacio para respuesta]
8. Desde su perspectiva, ¿cómo evalúa el impacto ambiental de las tecnologías emergentes en comparación con las técnicas tradicionales de gestión de residuos?
o [Espacio para respuesta]
9. ¿Qué estrategias se están implementando para promover la adopción de estas tecnologías en su región?
o [Espacio para respuesta]
10. ¿Ha observado cambios en la percepción de las comunidades locales hacia el reciclaje y la gestión de residuos? Si es así, ¿qué factores cree que han influido en estos cambios?
o [Espacio para respuesta]

Sección 3: Reflexiones Finales

11. ¿Qué recomendaciones haría para mejorar la gestión de residuos en su región, especialmente en relación con la adopción de tecnologías emergentes?
o [Espacio para respuesta]
12. ¿Hay algún aspecto que no hayamos cubierto y que considere relevante mencionar?
o [Espacio para respuesta]

Cierre

Agradecemos sinceramente su tiempo y disposición para participar en esta entrevista. Sus aportes son valiosos para nuestro estudio sobre la gestión de residuos y las tecnologías emergentes.