

**PROPUESTA PARA IMPLEMENTAR ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE
ENERGÍA A PARTIR DE RESIDUOS SOLIDOS EN COLOMBIA**

JESSICA ANDREA CALDERÓN GAMBOA

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL**

ORIENTADOR

HARVEY ANDRÉS MILQUEZ SANABRIA

INGENIERO QUÍMICO

MSC INGENIERÍA – INGENIERÍA QUÍMICA

PHD CIENCIAS – ENERGÍAS RENOVABLES

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
ESPECIALIZACIÓN GESTIÓN AMBIENTAL
GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre del director

Firma del Director

Nombre

Firma del presidente Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. mayo de 2022

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada Garcia-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macias Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Primero quiero agradecer a mis padres por ser mi ejemplo a seguir, estar siempre junto a mi apoyándome en las decisiones que decido tomar, por ser el pilar en mi vida y educación. Sin ellos jamás hubiese logrado llegar al punto en el que estoy, su lucha y esfuerzo día tras día para brindarme un mejor futuro han sido un apoyo para mí a lo largo de la vida.

A mi abuelita quien ha estado presente en toda mi vida, siendo un apoyo incondicional para seguir cumpliendo mis sueños, quien al pasar de los días me enseña a ser una mejor persona a través de su ejemplo.

A mi hermanita por estar cuando la necesito, depositar su confianza en mí y apoyarme en cada una de las adversidades que se me presentan en la vida.

Finalmente, a Dios por ser la guía de mi camino, a el debo quien soy y las oportunidades que se me presentan. Agradezco por concederme una vida llena de salud y personas que siempre me apoyan para permitirme llegar a este punto en mi vida profesional.

A ellos este proyecto, que sin su compañía no hubiese podido ser.

TABLA DE CONTENIDO

| | pág. |
|---|------|
| RESUMEN | 9 |
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| 1. OBJETIVOS | 13 |
| 1.1. Objetivo General | 13 |
| 1.2. Objetivos específicos | 13 |
| MARCO TEÓRICO | 14 |
| 2.1. Residuos solidos | 14 |
| 2.1.1. <i>Propiedades de los residuos</i> | 17 |
| 2.1.2. <i>Cantidad generada</i> | 18 |
| 2.2. Energía renovable | 20 |
| 2.3. Emisiones | 20 |
| 2.3.1. <i>Afecciones derivadas de los residuos solidos</i> | 22 |
| 2.4. Impacto ambiental | 23 |
| 3. CARACTERIZACIÓN RESIDUOS SOLIDOS EN COLOMBIA | 25 |
| 3.1. Clasificación de los residuos solidos | 25 |
| 3.1.1. <i>Según la peligrosidad de los residuos</i> | 25 |
| 3.1.2. <i>Según el origen de los residuos</i> | 26 |
| 3.1.3. <i>Según su composición</i> | 27 |
| 3.2. Marco normativo de la gestión integral de los residuos solidos | 27 |
| 3.3. Cantidad generada de residuos sólidos en Colombia | 28 |
| 3.3.1. <i>Disponibilidad de residuos orgánicos en Colombia</i> | 30 |
| 3.4. Manejo de los residuos sólidos en la historia de Colombia | 31 |
| 3.4.1. <i>Rellenos sanitarios</i> | 35 |
| 3.4.2. <i>Código de colores para la separación de residuos</i> | 40 |
| 4. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS | 41 |
| 4.1. Conversion térmica | 42 |
| 4.1.1. <i>Incineración</i> | 42 |
| 4.1.2. <i>Pirólisis</i> | 44 |
| 4.1.3. <i>Gasificación</i> | 48 |

| | |
|--|----|
| 4.2. Conversión biológica | 48 |
| 4.2.1. <i>Digestión anaeróbica</i> | 49 |
| 4.2.2. <i>Compostaje</i> | 52 |
| 4.2.3. <i>Conversión de residuos orgánicos por saprófagos</i> | 52 |
| 4.3. Comparación de las técnicas de recuperación de energía | 54 |
| 5. ESTRATEGIA DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS PARA COLOMBIA | 59 |
| 5.1. Aprovechamiento energético de los residuos y economía circular | 59 |
| 5.2. Pirólisis como mejor técnica para implementar en Colombia | 61 |
| 5.2.1. <i>Variables que afectan al proceso</i> | 61 |
| 5.2.2. <i>Tipos de Reactores</i> | 62 |
| 5.2.3. <i>Productos obtenidos</i> | 66 |
| 5.2.4. <i>Impacto social y ambiental</i> | 67 |
| 6.CONCLUSIONES | 69 |
| BIBLIOGRAFIA | 71 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Emisiones de CO ₂ por diferentes tipos de combustibles | 21 |
| Figura 2. Residuos generados, dispuestos y aprovechados en 6 municipios de Colombia | 30 |
| Figura 3. Histórico consolidado de las toneladas diaria dispuestas en los años 2010 a 2018 de los residuos en las ocho ciudades con mayor población de Colombia | 31 |
| Figura 4. Normativa de la disposición final de los residuos sólidos | 34 |
| Figura 5. Panorama de los rellenos sanitarios en Colombia | 35 |
| Figura 6. Tecnologías y rutas de conversión de residuos a energía | .41 |
| Figura 7. Rendimiento proceso de pirólisis | 44 |
| Figura 8. Pirólisis de una partícula de biomasa | 45 |
| Figura 9. Rendimientos de procesos de pirólisis | 47 |
| Figura 10. Etapas del proceso de digestión anaeróbica | 50 |
| Figura 11. Diagrama de bloques del proceso usando la mosca soldado-negra | 53 |
| Figura 12. Principio de la Economía Circular | 64 |
| Figura 13. Esquema Horno Rotatorio | 67 |
| Figura 14. Esquema Horno Ablativo | 68 |
| Figura 15. Esquema Reactor cono rotatorio | 69 |
| Figura 16. Usos del Bioaceite | 71 |

RESUMEN

A nivel mundial, en las últimas décadas se ha evidenciado un incremento de los residuos sólidos desechados, producto del crecimiento poblacional en las áreas urbanas y el desarrollo económico de los países. Lo anterior ha generado crisis de basuras, ocasionadas por los malos manejos, desconocimiento de alternativas que reduzcan la generación de desechos o la reutilización de estos en otros.

Los objetivos de desarrollo sostenible son objetivos mundiales que apuntan a satisfacer las necesidades de la población sin comprometer la capacidad de las generaciones venideras; uno de los objetivos de desarrollo sostenible es garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos los ciudadanos. El implementar las técnicas de aprovechamiento de residuos sólidos para la generación de energía, es una forma de dar cumplimiento al objetivo anteriormente nombrado, de esta manera, se mitigaría la contaminación causada por una disposición final inadecuada; aunque cabe resaltar que la eficiencia de la conversión de residuos depende de la eficiencia del proceso, y en gran medida a la calidad del residuo.

Se realizó una exhaustiva investigación que abarca todo lo relacionado con las diversas técnicas para el aprovechamiento de residuos con el fin de generar energía y de esta forma mejorar la calidad del aire, disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero y cantidad de residuos en rellenos, razón por la cual se busca dar a conocer cuál de estas es la mejor alternativa que se podría implementar en países como Colombia.

Como mejor alternativa se propone la implementación de la técnica de pirólisis para el aprovechamiento de residuos sólidos debido a que esta presenta un alto potencial para la generación de diversos productos dependiendo las condiciones de operación a las cuales se trabaje, se dan a conocer los tipos de reactores que pueden ser usados para el proceso, las variables que lo afectan y el impacto ambiental y social que trae consigo su implementación.

Se evidencia que en Colombia se implementó ya una planta de valorización energética en San Andrés, la cual tiene capacidad de procesar 80 toneladas al día de principalmente residuos plásticos, esta con los residuos separados genera un 80% de energía a través del proceso de incineración para abastecer a la misma planta. Se asegura que la implementación de esta trae consigo beneficios como el aporte a un ambiente más sano, la generación de energía sostenible, el mejor uso de los recursos y el aumento en la vida útil de los rellenos sanitarios, siendo un proyecto

de energía circular con acciones de reciclaje y aprovechamiento (Serna,2021); Aunque cabe resaltar que no es la única técnica que podría llegar a ser implementada en el país.

Palabras clave: Técnicas, aprovechamiento, residuos sólidos, energía renovable, gestión ambiental.

INTRODUCCIÓN

El consumismo está fuertemente relacionado con el sistema básico de necesidades, cualquier grupo familiar cuenta con alguna de ellas y por ende se presenta una acumulación diaria de desechos, los cuales pueden ser aprovechados hoy en día para evitar un impacto ambiental mayor y reducir la contaminación de los países (Oyuky et al., 2011).

Desde tiempos atrás antes de Cristo, estudios revelaron que tribus nativas ya generaban hasta 5.3 kg/ día de desechos que venían derivados de los huesos de animales que consumían. En la actualidad Colombia cuenta con 1115 municipios, pero algunos de ellos carecen de información, el DANE cuenta con la información de 1086 municipios de los cuales se calcula un promedio de generación de residuos de 700 g/ día por cada persona, siendo esto más de 33 millones de kilogramos diarios generados en solo Colombia (Rodríguez Perdigón, 2014).

La creciente producción de residuos sólidos urbanos está directamente relacionada con el aumento de la población en áreas urbanas y con el desarrollo económico. Se han presentado informes por parte del Banco mundial que estiman que anualmente se generan 1300 toneladas de residuos al año por todo el mundo, y que se tiene proyectado que para el año 2025 esta cantidad aumente hasta 2200 millones de toneladas debido al crecimiento poblacional que se presenta a diario (Moya et al., 2017).

Al obtener energía a partir de biomasa se involucran diferentes procesos en los cuales se generan también emisiones de CO₂ que pueden ser provenientes de la maquinaria usada, pero las emisiones de estas pueden considerarse como neutras si se emplean cantidades iguales a la producción neta de biomasa del ecosistema (Romero Salvador, 2010).

Otra de las problemáticas que más afecta al mundo, es la elevada cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero causadas por los altos consumos energéticos; estos gases son compuestos químicos en estado gaseoso como el vapor de agua, el dióxido de carbono, metano y el óxido nitroso que se acumulan en la atmosfera de la tierra y son capaces de absorberla radiación infrarroja del sol aumentando y reteniendo de esta forma el calor en la atmosfera (Miniambiente,2022).

En la actualidad ya existen técnicas que pueden ayudar a reducir los impactos negativos, como lo son las conversiones biológicas y térmicas, sin embargo, estas no son reconocidas y por consiguiente no son implementadas (Stella, 2015).

La presente investigación busca describir y relacionar la problemática ambiental asociada a la generación de residuos sólidos en Colombia, dando a conocer por ello las diferentes técnicas de aprovechamiento de residuos sólidos, con el fin de hacer saber cómo se genera energía de una manera más amigable para el ambiente. De igual manera, se pretende exponer las ventajas que trae consigo la implementación de este tipo de técnicas, a través de la información documental recolectada de los últimos años.

En el primer capítulo se desarrolla el marco teórico de la investigación, el cual muestra la recopilación de los diferentes conceptos que van a ser claves para comprender la problemática a presentar.

En el segundo capítulo se realiza una caracterización más detallada de los residuos sólidos que son generados en Colombia, dando a conocer los tipos de residuos sólidos, el marco normativo de la gestión integral de los residuos sólidos, los impactos ambientales, las afecciones derivadas de los residuos sólidos y la cantidad que es generada de los mismos; con lo cual se dará a conocer la importancia de la ejecución de este proyecto, para mitigar la huella de contaminación generada por el mal manejo que se le otorga, razón por la cual se considera como alternativa usar energías renovables que reducen dicho impacto.

Por consiguiente, en el tercer capítulo se describen las diferentes técnicas de aprovechamiento de residuos para obtener energía, mostrando una comparación de las diferencias de implementar procesos térmicos o biológicos, las ventajas que proporcionan. De igual forma se presenta un cuadro comparativo de las diversas tecnologías teniendo en cuenta los aspectos ambientales y técnicos. Y finalmente se da a conocer el proyecto implementado ya en Colombia de aprovechamiento energético.

1. OBJETIVOS

1.1.Objetivo General

Proponer la implementación de una estrategia para la obtención de energía usando residuos sólidos en Colombia.

1.2.Objetivos específicos

2. Realizar una caracterización de los residuos sólidos generados en Colombia.
2. Identificar las técnicas utilizadas para la obtención de energía usando residuos sólidos generados.
2. Establecer la técnica de tratamiento de residuos sólidos que sea más conveniente para el cuidado del ambiente.

MARCO TEÓRICO

Un residuo es algo que carece de valor de uso, por tanto, de valor de cambio. Más aún, como los desperdicios resultan molestos y estamos dispuestos a pagar para que nos libren de ellos, podemos concluir que tienen un valor negativo, es decir, son un mal para la sociedad viéndolo desde este punto de vista (André & Cerdá, 2015).

Los residuos son materiales cuya utilidad después de un tiempo no es buena, debido a que han perdido su funcionalidad para la que fueron creados. Esta palabra es usada como un sinónimo de basura en la actualidad, ya que son los desechos que los seres humanos producimos día a día.

La composición de los residuos puede verse influenciada debido a varios factores como lo son: el número de habitantes, el poder adquisitivo, el nivel educacional, los hábitos y costumbres de la población, las condiciones climáticas y estacionales, y los cambios en la política económica de un país (Poluto & Da Silva, 2009).

2.1. Residuos solidos

Los Residuos Sólidos Urbanos, se refieren principalmente a los materiales desechados por los domicilios, pero también incluye algunos desechos comerciales e industriales que son de similar naturaleza, los cuales son depositados en un vertedero municipal y contienen una fracción significativa de papel, desechos alimenticios, madera y recortes de poda, algodón y cuero, metales y vidrios, como también derivados del petróleo como plásticos, gomas y telas sintéticas, entre otros (Moratorio et al., 2012).

Los residuos sólidos urbanos son tratados principalmente a través de vertederos e incineración en la mayoría de los países. Dado que la eficacia de la clasificación de residuos en el punto de origen no siempre puede estar garantizada, especialmente en los países en desarrollo, la introducción de sistemas de tratamiento mecánico-biológico es una posible solución para ellos, ya que estos métodos pueden lograr una separación de las fracciones biodegradables y realizar la recuperación de los materiales reciclables de corrientes de residuos mixtos (Fei et al., 2018).

La composición de los residuos sólidos urbanos puede variar entre los diferentes municipios del mundo, sin embargo, por lo general va a comprender materiales biodegradables como No biodegradables de fuentes orgánicas e inorgánicas. Son recolectados como anteriormente

se menciona de hogares, oficinas, empresas comerciales, entre muchas más entidades (Nanda & Berruti, 2021), y se pueden llegar a clasificar como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1.

Clasificación de los diversos residuos

| CATEGORÍA | FUENTES COMUNES |
|--------------------|--|
| Residuos orgánicos | <ul style="list-style-type: none"> • Residuos de cocina (Por ejemplo: Residuos de alimentos, incluidos los residuos de frutas y verduras) • Residuos de alimentos (Por ejemplo: Residuos sólidos de procesamiento de alimentos) • Desechos de jardín (Por ejemplo: hojas, hierba, recortes de árboles y madera de barbacoa) |
| Papel | <ul style="list-style-type: none"> • Papel de desecho • Periódico • Revistas • Libros • Bolsas de papel • Toallitas húmedas • Servilletas y papel de seda • Papel pergamino • Papel de regalo • Cartulina • Cajas de embalaje |
| Plástico | <ul style="list-style-type: none"> • Botellas • Recipientes, tapas, tapones de recipientes • Cajas • Envolturas transparentes • Bolsas Ziploc • Bolsas de polietileno • Poliestireno • Cable de alambre • Tubería • CDs, DVDs, discos de vinilo |

Tabla 1. (Continuación)

| CATEGORÍA | FUENTES COMUNES |
|-----------|---|
| Vasos | <ul style="list-style-type: none"> • Botellas • Cristalería rota • Utensilios • Espejos • Bombillas • Objetos decorativos • Paneles de ventana |
| Metal | <ul style="list-style-type: none"> • Latas • Láminas de aluminio • Utensilios • Utensilios de cocina • Tapas de contenedores • Accesorios • Barandillas • Bicicletas |
| Diversos | <ul style="list-style-type: none"> • Residuos electrónicos (Por ejemplo: computadores, monitores, tabletas, teléfonos, relojes, baterías y otros artículos electrónicos destrozados) • Electrodomésticos rotos • Textiles • Cuero • Caucho • Arena para mascotas • Productos de higiene personal • Productos para el cuidado de la salud • Productos farmacéuticos • Productos cosméticos • Muebles desechados • Materiales inertes (Por ejemplo: construcción, residuos de demolición y renovación, paredes secas y cenizas) |

Nota. La tabla constituye un breve resumen sobre la clasificación de los residuos.

Como anteriormente se pudo evidenciar la cantidad y variedad de residuos que se generan día a día son bastantes, dentro de los cuales se pueden encontrar residuos metálicos, plásticos, orgánicos, sólidos, líquidos, entre muchos otros más, Hecho por el cual se realiza una clasificación respectiva de los mismos para poder diferenciar cuales son aptos para ser usados como materia prima en los procesos de generación de energía, creando procesos que sean más sostenible y amigables para el ambiente.

2.1.1. Propiedades de los residuos

Las propiedades físicas, químicas y biológicas de los residuos, y las transformaciones se deben tener en cuenta ya que pueden afectar la forma y la composición de estos, deben ser tenidas en cuenta para diseñar y desarrollar un plan para la gestión de estos.

Las propiedades físicas son el peso específico aparente que este dado en kg/m^3 , el cual indica la relación entre el peso del residuo que no está compactado y el volumen ocupado del mismo. La generación per cápita dada en kg/hab/día , que va a ser la cantidad diaria, cuyo valor es significativo para realizar el dimensionamiento de los rellenos sanitarios o las plantas de incineración. La composición gravimétrica que va a relacionar la proporción del material que es dado respecto a la masa total de los residuos. Es usado fundamentalmente para conocer cuál es la proporción de cada material para poder realizar una correcta recolección selectiva. Y el contenido de humedad va a presentar la cantidad de agua presente en la masa del residuo y es expresada como el porcentaje respecto al peso del residuo seco o al peso del residuo húmedo (Escobar et al., 2015).

Dentro de las características químicas se encuentran, el potencial de hidrógeno, para el cual se tiene en cuenta la capacidad tampón del medio que va a determinar cuánto puede soportar el material sin sufrir alteración en su pH. La composición la cual va a presentar los valores de carbono, nitrógeno, el contenido de cenizas, potasio, calcio, fósforo, residuos minerales totales, grasas y residuos minerales solubles. También se puede encontrar el poder calorífico, que es la capacidad que presentan los materiales para realizar un desprendimiento de energía al ser sometidos a procesos térmicos.

Y finalmente las características biológicas, son las que van a expresar la población microbiana que existe en el medio. Acorde al agente oxidante que esté presente en el residuo, la

materia orgánica es metabolizada por los microorganismos en medios anaerobios, lo que quiere decir que carecen de oxígeno, pero están presente sulfatos y dióxido de carbono, también en medios anóxicos, en los cuales se va a dar una presencia de nitratos o en un medio aerobio que va a contar con la presencia de oxígeno (Escobar et al., 2015).

2.1.2. Cantidad generada

Se han presentado informes por parte del Banco mundial que estiman que anualmente se generan 1300 toneladas de residuos al año por todo el mundo, y que se tiene proyectado que para el año 2025 esta cantidad aumente hasta 2200 millones de toneladas debido al crecimiento poblacional que se presenta a diario (Moya et al., 2017).

El Banco Mundial (2019) indica que “en el mundo se generan al año 2.010 millones de toneladas de desechos sólidos municipales, y al menos 33% de ellos no son tratados. Se proyecta que la rápida urbanización, el crecimiento de la población y el desarrollo económico harán que la cantidad de desechos a nivel mundial aumenten un 70% en los próximos 30 años si no se toman medidas urgentes. Un futuro donde convivir con basura podría ser la nueva normalidad” (p.1). En diversos países se presenta una disponibilidad de biomasa y residuos sólidos urbanos en diferentes regiones que son generados al año como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2

Disponibilidad de biomasa y residuos sólidos en diferentes países generadas al año

| PAÍS | MATERIAL | CANTIDAD DE PRODUCCIÓN MILLONES DE Ton/ Año | POTENCIAL PARA PRODUCIR ENERGÍA |
|--------|----------------|---|---|
| Europa | Biomasa leñosa | 205 | La alimentación tiene el potencial para producir el 81% de la demanda energética total en 39 estados de Europa. |

Tabla 2 (Continuación)

| PAÍS | MATERIAL | CANTIDAD DE PRODUCCIÓN MILLONES DE Ton/ Año | POTENCIAL PARA PRODUCIR ENERGÍA |
|----------|-------------------------------|---|--|
| Pakistán | Residuos agrícolas | 20,494 | El potencial total es de 50 mil GWh por año que puede cubrir en 36% del requerimiento energético total del país. Los residuos domésticos pueden subsidiar aproximadamente 14 mil GWh de generación de energía. |
| | Residuos lignocelulósicos | 25,271 | |
| | Residuos de madera | 1121 | |
| | Residuos sólidos urbanos | 8536.4 | |
| China | Biomasa (residuos de cultivo) | 530-850 | Si se utilizan los residuos totales disponibles, se puede fabricar aproximadamente 65 toneladas métricas por año de etanol celulósico. |
| | Residuos sólidos urbanos | 180 | |
| India | Residuos municipales | >55 | La posibilidad general de producir energía es de 35 GW y aproximadamente se producen a partir de los residuos de cultivos y el estiércol de ganado |
| | Residuos de biomasa | 600 | |

Nota. La tabla constituye un breve resumen sobre la disponibilidad de biomasa en diferentes países que son generadas en un año.

Teniendo en cuenta la información presentada en la tabla 2, se puede observar que los residuos sólidos generados en los diversos países son enormes, basados en esto se puede deducir que se tiene un potencial para generar energía enorme a partir de diversos tipos de residuos.

2.2. Energía renovable

Las energías renovables son fuentes de energía que provienen de recursos naturales como lo puede ser el sol, el viento, el agua y la biomasa animal o vegetal, están caracterizadas por no emplear combustibles fósiles sino recursos naturales capaces de renovarse.

Una de las principales ventajas de las energías renovables es que, además de ser inagotables, presentan un nulo o bajo impacto negativo sobre el medio ambiente, por lo que se consideran energías limpias. En la actualidad las energías renovables son una realidad presente en nuestra sociedad y sus beneficios para el medio ambiente son más que evidentes (cuidemos el planeta, 2018).

Cuidemos al planeta (2018) indica que las energías renovables pueden ser aplicadas y explotadas a nivel local, lo que va a ayudar a disminuir la dependencia de las poblaciones hacia los grandes productores de energía, favoreciendo el desarrollo económico y la creación de empleo.

El uso de energías renovables va a ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, poniéndole una pausa al calentamiento global, son consideradas como energías limpias ya que cuidan al medio ambiente

2.3. Emisiones

Los residuos sólidos urbanos son considerados como la tercera fuente más grande de gas metano antropogénico en el medio ambiente, lo que representa casi el 3-4% de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero a nivel mundial y el total de los sectores de los desechos son responsables de aproximadamente el 18% de las emisiones de metano al ambiente a nivel global (Kumar & Samadder, 2017).

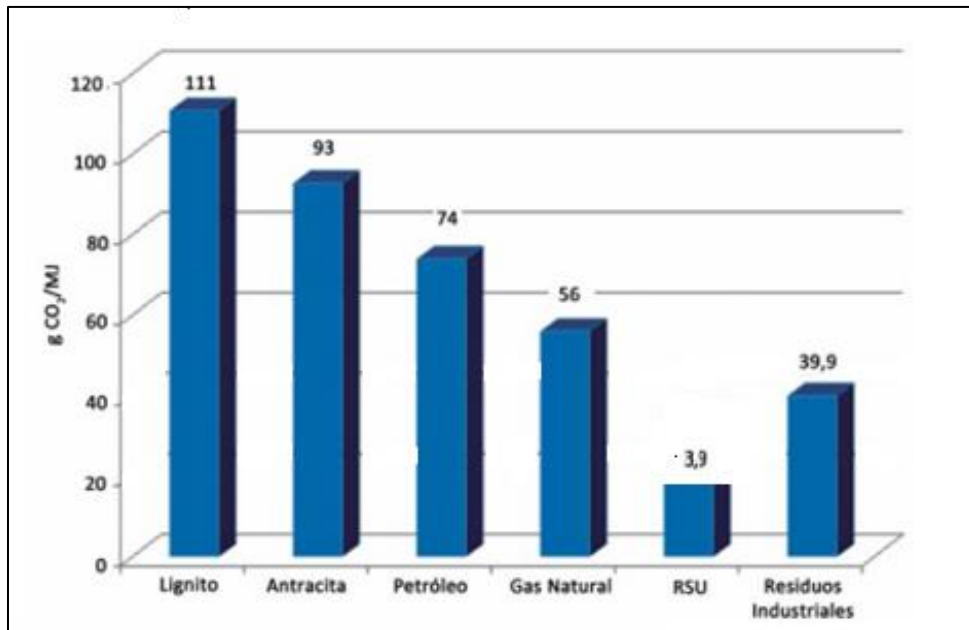
Según EPA (2021) se indica que el dióxido de carbono se hace presente de manera natural en la atmósfera como parte del ciclo del carbono de la Tierra (la circulación natural de carbono entre la atmósfera, los océanos, la tierra, las plantas y los animales). Las actividades del ser humano

están alterando el ciclo del carbono: tanto porque suman más CO₂ a la atmósfera como influenciando la capacidad de los disipadores naturales (como los bosques) para eliminar el CO₂ de la atmósfera e influyendo sobre la capacidad de las tierras para almacenar carbono. Si bien las emisiones de CO₂ provienen de diversas fuentes naturales, las emisiones relacionadas con las actividades del ser humano son las responsables del aumento que se ha registrado en la atmósfera desde la revolución industrial. La principal actividad del ser humano que emite CO₂ es la combustión de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) para generar energía y con fines de transporte, aunque ciertos procesos industriales y cambios en el uso de la tierra también emiten CO₂.

Las emisiones presentadas de dióxido de carbono producidas durante la combustión de residuos sólidos urbanos para la producción de energía son mucho menores a las obtenidas a partir de combustibles fósiles convencionales como lo son el lignito, petróleo, entre otros, esto puede ser evidenciado a través de la Figura 1 presentada a continuación (Escobar et al., 2015).

Figura 1.

Emisiones de CO₂ por diferentes tipos de combustibles



Nota. La figura representa las emisiones de dióxido de carbono producidas durante la combustión de residuos sólidos urbanos para la producción de energía.

Las emisiones generadas por los diversos tipos de residuos son enormes, el Lignito presenta una emisión de 111 g de monóxido de carbono por metro cuadrado, de igual forma la antracita, el petróleo, el gas natural son combustibles que generan una contaminación al ambiente sin algún tratamiento en específico con cifras elevadas. Los residuos sólidos urbanos e industriales generan una emisión un poco menor, como se puede evidenciar los residuos sólidos urbanos generan 3.9 g CO₂/MJ lo cual se podría llegar a mitigar usándolos como materia prima en técnicas de aprovechamiento para obtener energía partir de los mismos y sustituyendo los combustibles convencionales.

2.3.1. Afecciones derivadas de los residuos solidos

Los residuos sólidos han existido a través de toda la existencia de la humanidad, los cuales al pasar de los años han tenido una transformación, debido a que las civilizaciones han pasado de ser nómadas a ser civilizaciones sedentarias, lo cual conlleva la generación de miles de afectaciones tanto hacia el ser humano como así el medio ambiente.

La importancia de los desechos sólidos como transmisores de enfermedades está asociada a efectos directos e indirectos a la salud de los seres humanos. Dentro de los efectos directos se va a hacer referencia a los que tienen contacto como su nombre lo indica directo con los residuos que contienen agentes que pueden ser agentes de transmisión de enfermedades de los cuales las personas encargadas del servicio de recolección se ven en mayor proporción afectadas. También se tienen en cuenta los efectos indirectos que están vinculados a la proliferación de vectores de importancia sanitaria y molestias públicas (moscas, ratas, cucarachas) que se encuentran en los residuos, transmitiendo enfermedades como fiebre, tifoidea, salmonelosis, dengue, entre muchas más (Valverde, 2021).

2.3.1.a. Efecto en el medio ambiente. Los problemas que trae consigo el inadecuado manejo de los residuos sólidos son negativos o contaminantes, presentan consecuencias como lo son la producción de gases debido a la descomposición de los residuos, especialmente orgánicos, que se presentan como emisiones atmosféricas y reciben el nombre de biogás; y la producción de lixiviados, es decir, subproductos líquidos provenientes de la descomposición, que aumentan el volumen debido a las lluvias o a la humedad (Montes, 2018).

Dentro de los efectos ambientales provocados por los residuos sólidos generados en las ciudades se encuentra el deterioro estético del paisaje natural y de la ciudad, y, sobre todo, la contaminación de agua, suelo y aire.

2.3.1.b. Alteración del sistema hídrico. Este efecto es el más grave problema en cuanto a la contaminación ambiental por los residuos sólidos; sin embargo, es el menos reconocido. Afecta las aguas superficiales y subterráneas, por el vertido directo de las basuras a los ríos y quebradas y por la mala disposición de líquido percolado (lixiviado), producto de los botaderos a cielo abierto; estas descargas provocan el incremento de la carga orgánica y disminuyen el oxígeno disuelto, aumentando los niveles de nutrientes y algas que dan lugar al fenómeno de eutrofización en los cuerpos béticos de aguas y causando la muerte de peces, la generación de malos olores, el deterioro del aspecto estético y la pérdida del recurso agua como fuente de abastecimiento a poblados (Valverde, 2021).

Por otro lado, las descargas de basura a las corrientes de agua en el vertido a las vías públicas traen consigo la disminución de los cauces naturales, los canales y la obstrucción de las alcantarillas, provocando inundaciones y, con ello, pérdida de bienes e inclusive vidas humanas.

2.3.1.c. Alteración del sistema edafológico. El abandono y la acumulación de desechos sólidos a cielo abierto es causa del deterioro estético y la desvalorización del terreno propio, y de las áreas adyacentes. Esto es debido a la contaminación causada por distintas sustancias contenidas en la basura, sin algún control respectivo.

2.3.1.d. Alteración del aire. Es evidente el impacto negativo que causan los vertederos a cielo abierto, los incendios y el humo que reduce la visibilidad, causando irritaciones nasales y de la vista, además de incremento de afecciones pulmonares, aunado a las molestias originadas por los malos olores (Valverde, 2021).

2.4. Impacto ambiental

Las energías renovables son aquellas que se obtiene a partir de fuentes naturales que producen energía de forma inagotable e indefinida (cuidemos el planeta, 2018), no poseen un impacto ambiental considerable, presentan un bajo impacto sobre el ambiente.

El uso de energías renovables permite reducir los efectos de gases invernadero, así como también el consumo energético que está basado en combustibles fósiles, mejorando de esta forma la calidad de vida de las personas, ya que no producen gases de efecto invernadero ni emisiones contaminantes no van a afectar al cambio climático.

La biomasa puede usarse en lugar de carbón mineral en diversos tipos de instalaciones térmicas, paliando así el impacto ambiental de este combustible fósil que es usado de manera convencional (Romero Salvador, 2010).

El uso de los residuos en plantas para la producción de energía contribuye significativamente en la reducción del CO₂ en la atmósfera. La energía obtenida a partir del tratamiento térmico de residuos sólidos urbanos reduce las emisiones de gases que contribuyen al fenómeno de efecto invernadero (Escobar et al., 2015).

3. CARACTERIZACIÓN RESIDUOS SOLIDOS EN COLOMBIA

Los residuos sólidos como anteriormente se mencionó son aquellos materiales que son desechados tras su vida útil y que carecen de un valor económico. Están compuestos principalmente de desechos procedentes de materiales que fueron usados en la fabricación transformación o utilización de bienes de consumo.

3.1. Clasificación de los residuos solidos

Los residuos sólidos tienen una clasificación cambiante puesto que dependen de la terminología que sea aplicada debido a que estos no solo son generados en las ciudades sino también en las zonas rurales o donde se presente cualquier tipo de interacción con el ambiente.

3.1.1. Según la peligrosidad de los residuos

3.1.1.a. Residuos inertes: Son aquellos residuos que no experimentan ninguna transformación ya sea física, química o biológica de manera significativa. No son solubles, combustibles no presentan reacciones físicas ni químicas, no son biodegradables y de igual forma no van a afectar de manera negativa a otras materias con las que entre en contacto, por ende pueden dar lugar a una contaminación para el ambiente o perjudicar la salud humana (Rivas Arias, 2018).

3.1.1.b. Residuos peligrosos: Un residuo o desecho peligroso es aquel que , por sus características ya sean corrosivas, reactivas, explosivas, toxicas, inflamables, entre otras, puede llegar a causar algún tipo de riesgo a la salud humana o al ambiente cuando no se le proporciona un manejo adecuado (Agencia Presidencial de Cooperación Internacional de Colombia, 2015).

3.1.1.c. Residuos no peligrosos : Se pueden definir como aquellos residuos que no son ni inertes ni peligrosos. Los residuos como el plástico, el papel o cartón pueden entrar dentro de esta clasificación desde que no se encuentren contaminados por alguna sustancia peligrosa.

3.1.2. Según el origen de los residuos

3.1.2.a. Residuos domésticos: Son los residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas; también son considerados los residuos con similitudes generados en las industrias. Se incluyen de igual manera los aparatos eléctricos, electrónicos, ropa, muebles y enseres como residuos y escombros de obras menores de construcción y reparación domiciliaria (QAEC, 2021).

3.1.2.b. Residuos industriales : La ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados, define los “residuos industriales” como aquellos residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre (ECOLEC, 2022).

3.1.2.c. Residuos de demolición y construcción: Son los residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras locativas generados en obras civiles o actividades conexas (Pacheco, Fuentes, Sánchez & Rondón, 2016).

3.1.2.d Residuos agrícolas : Se conocen como residuos agrícolas y forestales, todos aquellos que se generan a partir de cultivos de leña o de hierba y los producidos en el desarrollo de actividades propias de estos sectores, se obtienen de los restos de cultivos o de limpiezas que se hacen del campo para evitar las plagas o los incendios y pueden aparecer en estado sólido, como la leña, o en estado líquido, como los purines u otros elementos residuales obtenidos en actividades agropecuarias. Proviene de cultivos leñosos o herbáceos, que se caracterizan por una marcada estacionalidad, tanto por razón del momento de su producción como por la necesidad de retirarlos del campo en el menor tiempo posible para no interferir en otras tareas agrícolas y evitar la propagación de plagas e incendios (ambiente,2019).

3.1.2.e. Residuos hospitalarios Son aquellas sustancias, materiales, subproductos sólidos, líquidos, gaseosos, que son el resultado de una actividad ejercida por el generador; que se define como la persona natural o jurídica que produce residuos hospitalarios relacionados con la prestación de servicios de salud (Rivas Arias, 2018).

3.1.3. Según su composición

3.1.3.a. Residuos orgánicos : Son biodegradables, y están compuestos naturalmente por restos de comida y vegetales de origen domiciliario; presentan propiedades que les permiten desintegrarse o degradarse de una forma rápida transformándose así en otra materia orgánica.

3.1.3.b. Residuos inorgánicos :Son los residuos de origen no biológico, de origen industrial o de procesos no naturales, que al estar expuestos a condiciones ambientales tardan mucho tiempo en degradarse, no se integran a la tierra sino tras un periodo de tiempo considerable.

3.2. Marco normativo de la gestión integral de los residuos sólidos

Para el tratamiento de residuos sólidos en Colombia se tienen en cuenta diferentes leyes, artículos y decretos regidos mediante políticas establecidas en el país que son expuestos en la tabla 3 del presente documento.

Tabla 3

Marco normativo de la gestión integral de residuos sólidos en Colombia

| NORMA | DESCRIPCIÓN |
|--------------------------|--|
| Ley 99 de 1993 | Por la cual se crea el Ministerio de Ambiente y el sistema nacional ambiental SINA |
| Ley 142 de 1994 | Ley de los servicios públicos domiciliarios |
| Decreto 596 de 2016 | La cual trata el incrementar las tasas de aprovechamiento de los residuos sólidos en el país. |
| Decreto ley 2811 de 1974 | Se dicta el código nacional de recursos naturales renovables y la protección al medio ambiente |

Tabla 3. (Continuación)

| NORMA | DESCRIPCIÓN |
|----------------------------|---|
| Decreto 1077 de 2015 | Se expide el decreto único reglamentario del sector de vivienda, ciudad y territorio |
| Resolución CRA 720 de 2015 | Se incluyen aspectos de operación eficiente de las diferentes actividades de servicio público de aseo y se contemplan aspectos ambientalmente razonables. |
| Resolución 330 de 2017 | Se adopta el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. |
| Resolución 472 de 2017 | Se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición. |
| COMPES 3974 de 2016 | Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. |

Nota. La tabla constituye un breve resumen sobre las resoluciones y decretos establecidos para la gestión de residuos.

Como se muestra en la tabla 3, una de las normativas a regir es el COMPES 3974 de 2016 la cual se convirtió en el principal orientador de acciones ambientales en materia de residuos sólidos, ya que plantea estrategias relevantes como lo son el desarrollo de programas de minimización en el origen, articulados con los programas de producción más limpia de los cuales forma parte, la modificación de los patrones de consumo y producción sostenibles, la creación de nuevos canales de comercialización de materias aprovechables y promoción de los existentes, y el fortalecimiento de las cadenas de reciclaje, programas existentes y apoyo a nuevas estrategias para el aprovechamiento de residuos (INERCO Consultoría Colombia, 2018)

3.3. Cantidad generada de residuos sólidos en Colombia

En Colombia, en el día se generan más de 32.000 t de RSU y de las cuales más de 19.000 ton son residuos orgánicos (60 % de los residuos urbanos); de estas, más del 41 % de las toneladas diarias se producen en las en las 4 ciudades más grandes de Colombia: Bogotá (23,6 %), Cali (8 %), Medellín (7,3 %) y Barranquilla (2,1 %) . Asimismo, se estima que un 30 % de todos los rellenos sanitarios del país no cumplen con las normas ambientales, y un gran número alcanzará la saturación en los próximos 5 años (INERCO Consultoría Colombia, 2018).

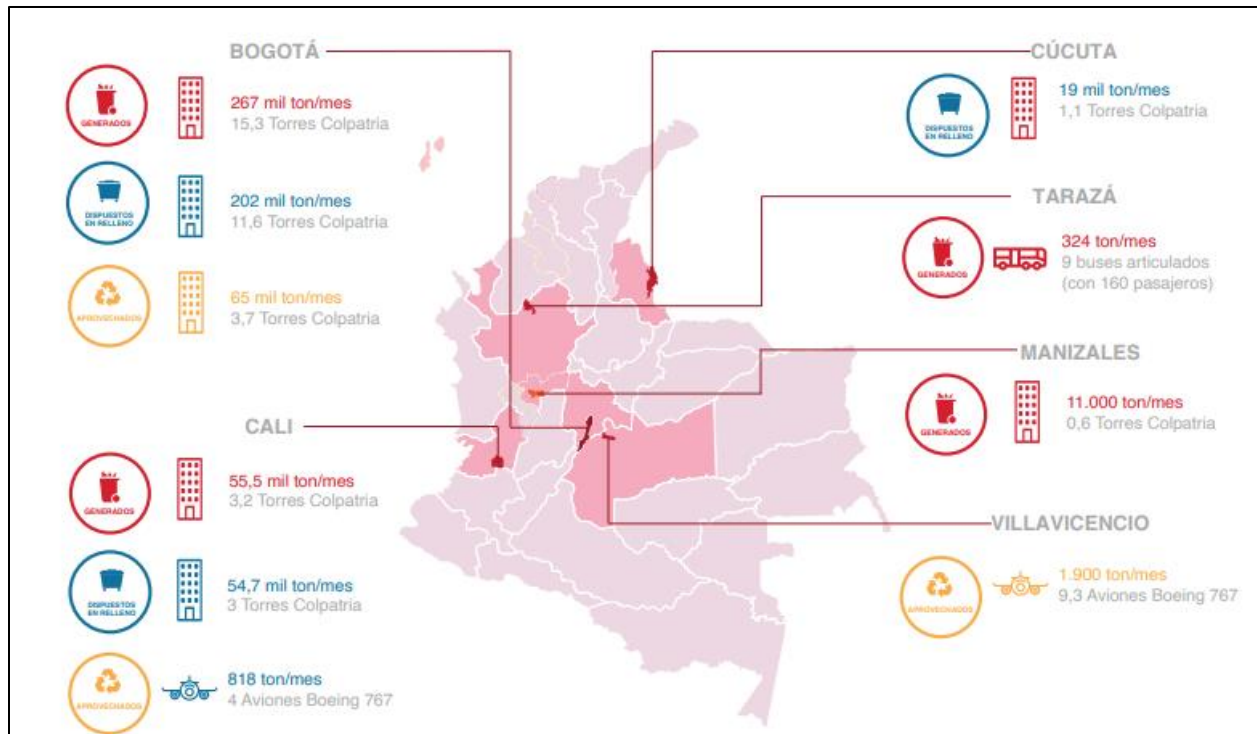
Según el informe sobre la disposición final de residuos sólidos del 2018, la mayor parte de los residuos dispuestos en el país se encuentran en Bogotá con 6.366,24 ton/día, lo que equivale al 20,55% de la producción de residuos del país. Este fenómeno en constante crecimiento y tan inherente a cualquier proceso de producción, trae consigo consecuencias negativas y de gran impacto en el medio ambiente, de allí la necesidad de ejercer un control mediante la gestión integral de residuos sólidos (Santos, 2021).

El más reciente informe del DNP afirma que si Colombia continúa en la misma dinámica de generación de residuos, sin hallar soluciones para mejorar el aprovechamiento de estos, en el año 2030 el país tendrá emergencias sanitarias en la mayoría de las ciudades y una alta generación de emisiones de gases efecto invernadero, lo que afecta la calidad del aire; En la actualidad, el país genera más de 12 millones de toneladas de residuos sólidos al año, de las cuales, tan solo el 17% es reciclado (Soto, 2020).

Un colombiano promedio genera alrededor de 0.75 kg de residuos al día y 23 kg al mes; en 11,6 semanas podría generar en promedio el equivalente a su peso corporal. La población genera más de 16.190 ton al mes siendo esta una cifra promedio de la generación de residuos. La generación de residuos por habitante va disminuir cuando aumenta el tamaño de suscriptores, es decir cuando existen más personas por grupo familiar que acceden al servicio de aseo (Restrepo Klinge, 2019).

Figura 2.

Residuos generados, dispuestos y aprovechados en 6 municipios de Colombia



Nota. La figura muestra un promedio de los residuos sólidos que son generados en seis diferentes municipios de Colombia.

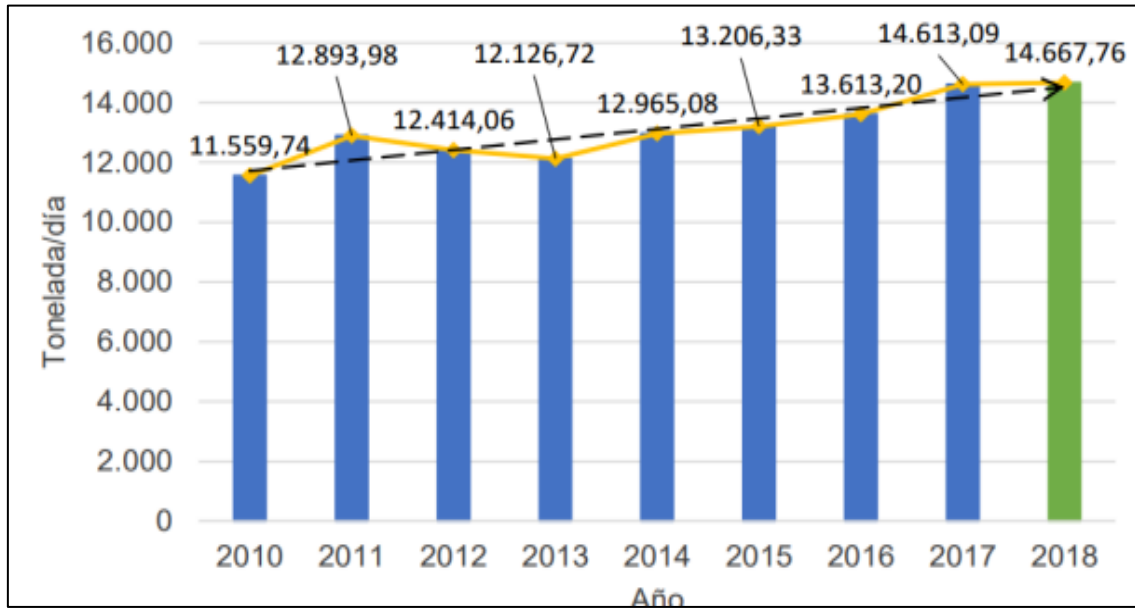
Como se evidencia en la figura 2, En Bogotá se generan 267 mil ton/mes de residuos sólidos de los cuales solo son aprovechados 65 mil ton/mes; de igual forma en la ciudad de Cali se generan 55,5 mil ton/mes de las cuales se disponen en los rellenos la mayor parte siendo 54,7 mil ton/mes y aprovechadas 818 ton al mes. En ciudades como Tarazá se generan 324 ton/mes no siendo aprovechadas en ningún aspecto.

3.3.1. Disponibilidad de residuos orgánicos en Colombia

El Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, evidencia que en las cuatro grandes ciudades del país (Medellín, Bogotá, Cali y Barranquilla) se producen aproximadamente 11275 ton de residuos sólidos al día, lo que va a equivaler al 41% de los residuos totales generados en el país. También cabe resaltar que en las 28 ciudades capitales del país se generan 5142 ton/día y en los 1054 municipios se generan 11083 ton/día (Acosta & Castro,2021).

Figura 3.

Histórico consolidado de las toneladas diaria dispuestas en los años 2010 a 2018 de los residuos en las ocho ciudades con mayor población de Colombia.



Nota. La figura muestra un promedio diario de los residuos sólidos dispuestos para las 8 ciudades con mayor población del país según el Censo realizado en el 2018.

En la Figura 3 se evidencia una tendencia de la cantidad de residuos en tonelada por día para las ocho ciudades de Colombia, con variaciones crecientes y decrecientes a lo largo de los años.

Las fluctuaciones que se presentan en la disposición de los residuos sólidos se dan en ocasiones por diversos factores, si bien, la política e implementación de la actividad de aprovechamiento como parte del servicio público de aseo comienza en abril de 2016, el comportamiento de 2016-2017 muestra que hay un aumento del 7.3% lo cual se puede deber a que el aprovechamiento que se realizaba era de forma informal. Pero en el periodo de 2017-2018 se presenta una variación mínima del 0.37%, dando mejoras en los procesos (Acosta & Castro,2021).

3.4. Manejo de los residuos sólidos en la historia de Colombia

La generación de residuos sólidos es un hecho constante desde la aparición de la vida en el planeta, sin embargo, las características y composición de estos residuos ha tenido importantes

variaciones en los últimos siglos. Los avances de la ciencia y la tecnología han permitido que los seres humanos disfruten de nuevos bienes con innovadoras funciones y materiales que suponen un reto al momento de ser eliminados. Así, la eliminación de los residuos ha sido un asunto que desde tiempos remotos ha inquietado a la población (Montes Cortés, 2018).

En Bogotá a comienzos del siglo XVIII los desechos generados eran arrojados a los ríos o a las calles siendo, para la época, los únicos agentes de limpieza los gallinazos, cerdos o perros que deambulaban por la ciudad en busca de comida; al pasar de los años en 1860 se ratifica una orden en la capital en la cual la eliminación de los desechos solo podía realizarse en un horario establecido. Cuarenta años después, el servicio de aseo fue organizado y la basura era recogida y transportada en carros de tracción animal. El consejo de Bogotá en el año de 1960 decidió crear la empresa distrital de aseo encargada de la prestación de servicio público, que tenía como misión llevar los residuos sólidos para su disposición final a lotes ubicados en sectores de Entreríos, las Américas y Usme (Montes Cortés, 2018).

En los años 70 en Colombia se permitió la disposición final de los residuos en botaderos a cielo abierto o en cuerpos de agua sin tener en cuenta los impactos ambientales, razón por la cual el código de recursos naturales (Decreto. Ley 2811 de 1974) prohibió expresamente descargar, sin autorización, residuos que puedan deteriorar el suelo o causar molestias a los ciudadanos. En el año de 1979, el código sanitario nacional estableció que únicamente se podían usar como sitios de disposición final los predios que estuvieran autorizados por el ministerio de salud y prohibió la quema de basuras al aire libre sin una autorización previa; (Montes Cortés, 2018).

El Decreto 2104 de 1983 (derogado) definió la disposición sanitaria de basuras como “ el proceso mediante el cual las basuras son colocadas en forma definitiva sea en el agua o en el suelo, siguiendo, entre otras, las técnicas de enterramiento, relleno sanitario y de disposición al mar” (art. 1 núm. 19). Empleo, la misma norma establecía en la cual dice que se debía evitar la contaminación del aire, el suelo o el agua en el manejo de las basuras (art. 10.º) por lo que, para la concesión del permiso de disposición, las autoridades debían considerar los efectos de las basuras sobre los usos del agua y sobre el sistema del alcantarillado sanitario (art. 12). Sin embargo, esta norma resultaba ser confusa, ya que era como si no se debería tener en cuenta las disposiciones realizadas, por ellos para los años 80 se empezaron a construir los primeros rellenos sanitarios del país.

Teniendo en cuenta la realidad de los sistemas de gestión de residuos y la confusión normativa que existía, la gestión de residuos sólidos fue desarrollada en función de la prestación

del servicio público de aseo que estaba exclusivamente centrado en actividades de recolección, transporte y disposición final; los aspectos ambientales de los ecosistemas pasaron a un segundo plano ante la necesidad de garantizar las condiciones sanitarias a la población. En la década de los 90 se desconocía del manejo de los residuos o desechos peligrosos que llegaban a los sitios de disposición final mezclados con los residuos ordinarios, por esta razón el gobierno se propuso mejorar los sistemas de eliminación, tratamiento y disposición final de los residuos, también se planteó como meta dimensionar la problemática de los residuos peligrosos.

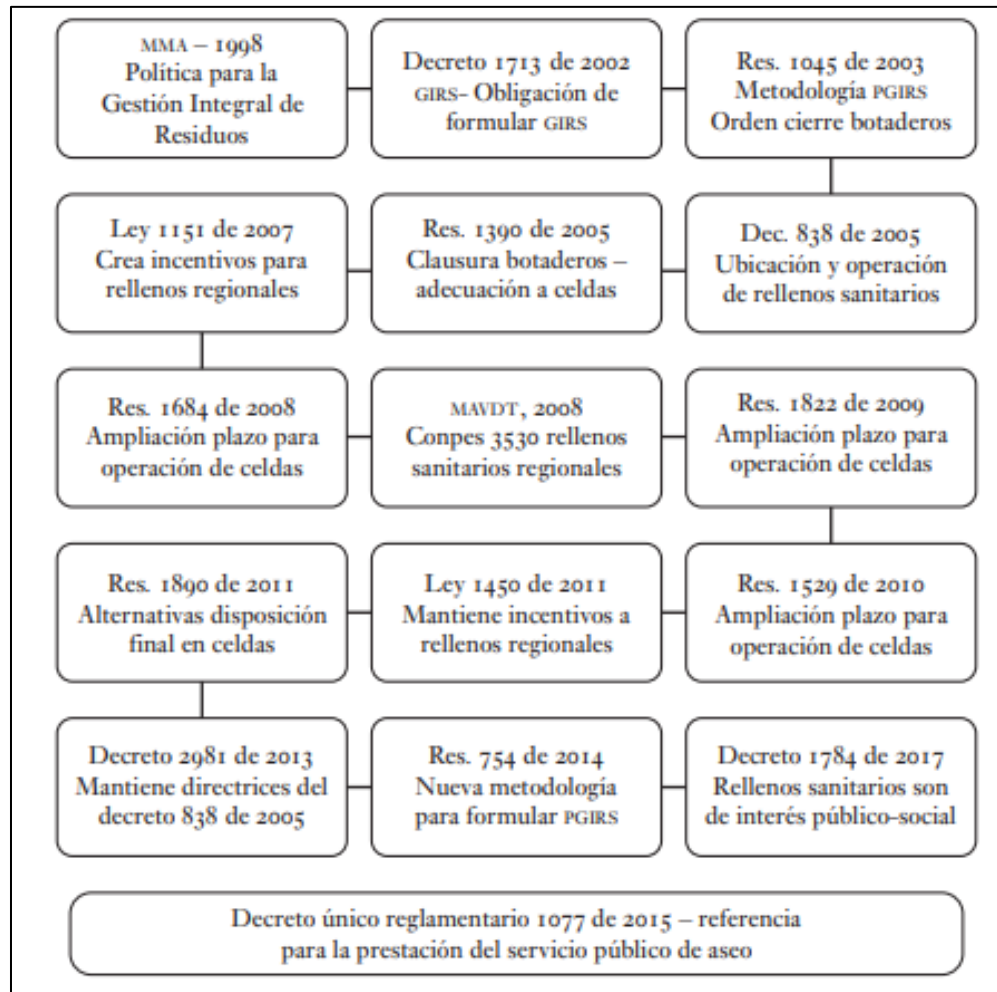
En el año 2004 se realizó un informe de seguimiento a la gestión de residuos sólidos por la Procuraduría General de la Nación, en el cual se determinó que más del 95% de las toneladas al día de desechos generados en el país correspondían al área urbana, y fue allí donde se dio a conocer a las autoridades ambientales respecto al inadecuado manejo. En el año 2003 el ministerio de medio ambiente con el cierre que dio a los sitios de mala disposición final incontrolada presento mejoras logrando reducir las cifras de botaderos a cielo abierto, enterramientos, quemas y disposición en cuerpos de agua (Montes Cortés, 2018).

Además de esto en el año 2014 se realizó una evaluación del desempeño ambiental la cual determino que, si bien se ha incrementado la capacidad de disposición de desechos y se ha reducido el número de botaderos a cielo abierto, en varias grandes ciudades los rellenos sanitarios han alcanzado su capacidad máxima y persiste una preocupación sobre la calidad ambiental de su gestión (OECD,2014).

Como se evidencia en la figura 4, se da a conocer un recorrido secuencial de las normas más relevantes que están relacionadas con la disposición final de los residuos sólidos como actividad complementaria del servicio de aseo.

Figura 4.

Normativa de la disposición final de los residuos sólidos.



Nota. Adoptado de Universidad Externado de Colombia, por Carolina Montes Cortes. 2018, Flujograma de la disposición final de los residuos sólidos en Colombia. https://bdigital.uexternado.edu.co/bitstream/handle/001/2327/MKB-spa-2018-Estudio_de_los_residuos_solidos_en_Colombia?sequence=1

Finalmente, es importante que el país tenga en cuenta en la formulación de la política ambiental de residuos sólidos que entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se incluyeron en la Agenda de Desarrollo Global 2030 varios aspectos que atañen a su manejo. Por ejemplo, el objetivo 6 busca garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos; o el objetivo 11 que pretende que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles; o bien el objetivo 12 que procura

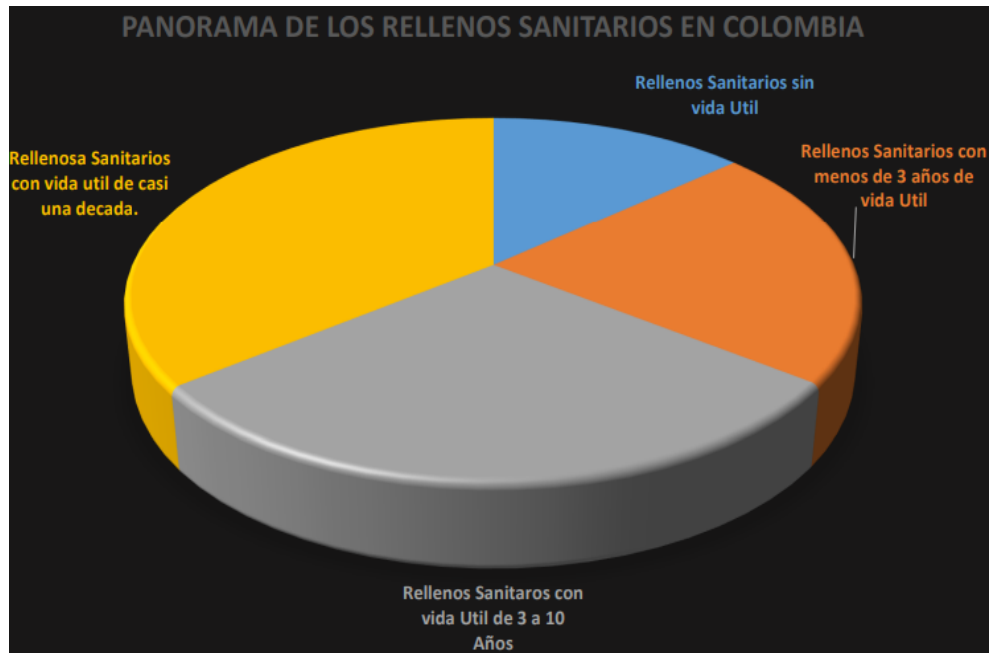
garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, o el objetivo 13 asociado al cambio climático por la generación de gas metano en la descomposición de la materia orgánica presente en los residuos sólidos municipales (Montes Cortés, 2018).

3.4.1. Rellenos sanitarios

Los rellenos sanitarios son sistemas de disposición final de residuos sólidos que aparecen como una tendencia para resolver la gestión integral de los mismos, diseñados y operados como una obra de saneamiento básico, cuyo éxito radica en la adecuada selección del sitio, su diseño y en su óptima operación y control.

Figura 5.

Panorama de los rellenos sanitarios en Colombia.



Nota. Adoptado de Minambiente, por Camilo Andrés Rivas, 2018, panorama actual de los rellenos sanitarios presentes en Colombia. <https://www.mincit.gov.co/getattachment/c957c5b4-4f22-4a75-be4d-73e7b64e4736/17-10-2018-Uso-Eficiente-de-Recursos-Agua-y-Energi.aspx>

Como se puede observar en la figura 5, en el país del 100% de los rellenos sanitarios que existen el 13.5 % ya no presentan una vida útil, a un 21.8% le queda menos de tres años de vida

útil, un 29.1% le queda entre tres y diez años y un 3.6% tienen vida útil aun para casi una década (Rivas Arias, 2018).

El relleno sanitario es la técnica menos utilizada en Colombia, de los 1.092 municipios del país, sólo 350 disponen los residuos sólidos en rellenos sanitarios, muchos de los cuales son del tipo regional 42 municipios disponen de sistemas de enterramiento (rellenos sanitarios no tecnificados), 565 en vertederos tipo botaderos y quemas a cielo abierto, 32 disponen de sus basuras en cuerpos de agua, 5 utilizan sistemas de incineración y 44 aprovechan otros sistemas como el compostaje o plantas integrales (Arte, 2014).

3.4.1.a. Rellenos sanitarios en Colombia. En Colombia, el servicio de aseo es de carácter público y responsabilidad del Estado. Los rellenos sanitarios, empleados como sistemas de disposición final de los residuos sólidos, deben ser proporcionados en principio por las Alcaldías de cada municipio conforme a la ley 99 de diciembre 22 de 1993 y el Decreto 1505 de 2003. A continuación, se realiza una revisión de los rellenos sanitarios de las principales ciudades de Colombia (Acosta & Castro, 2021).

- **Relleno Sanitario Doña Juana**

Este relleno se encuentra ubicado en la capital del país, Bogotá, en el cual se disponen los residuos tanto de la capital como de los 6 municipios aledaños, con un promedio de 5.891,8 ton/días y de las cuales Bogotá aporta 5880 ton/día. Se encuentra ubicado en la vía Usme, en el suroriente de Bogotá y cuenta con un área de 475 ha, de las cuales 219 están destinadas para el depósito de basuras (Noguera, 2021).

El Relleno Doña Juana lleva en funcionamiento más de 20 años, pero presenta problemas como deslizamientos de los desechos, hundimientos y agrietamientos, proliferaciones de malos olores y vectores, e inclusive, volúmenes de lixiviados superiores a la capacidad de la planta de tratamiento de estos.

- **Relleno Sanitario Parque Ambiental la Pradera**

El relleno Sanitario se encuentra ubicado en la ciudad de Medellín; es de tipo regional. Recibe diariamente 2787 toneladas de residuos, de las cuales Medellín produce maso menos 1795 toneladas de residuos sólidos al día. Está ubicado en un terreno de 354 hectáreas en Don Matías, a 57 Kilómetros de Medellín (Noguera,2021).

El relleno tiene una diversidad de problemas de impacto ambiental, incluida la falta de in sistema de tratamiento de lixiviados; Actualmente cuenta con una laguna estable como sistema de pretratamiento, que se encuentra en funcionamiento desde el año 2003. Debido a la falta de medidas de compensación relevantes, presenta también impactos abióticos por la erosionabilidad de flora y fauna nativa de la zona (Acosta & Castro,2021).

- **Relleno Sanitario Colomba-El Guabal**

Este relleno sanitario también es conocido como Relleno Sanitario de Yotoco, ubicado en el municipio de Santiago de Cali, en el Valle del Cauca. Este inicio operaciones el 25 de junio de 2008 reemplazando al antiguo botadero de Navarro, cuenta con un área de 363 hectáreas. Se encuentra ubicado en el área rural del municipio de Yotoco a 32.5 Km de la glorieta de Sameco.

Actualmente recibe 1800 ton/día de residuos provenientes de los municipios de Candelaria, Jamundí, Caloto, Villarrica, Yumbo y Cali. A la fecha de mayo de 2021 no contaba con una planta de tratamiento de lixiviados y presentaba olores desagradables por el inadecuado manejo de los gases en el relleno (Noguera,2021).

- **Relleno Sanitario Los Pocitos**

Se encuentra ubicado a 12 Kilómetros al norte de Barranquilla, comenzando su operación desde marzo de 2009 sustituyendo al antiguo relleno sanitario Henequén. Cuenta con una superficie de 135 ha. En este relleno las ciudades de Barranquilla, Soledad, Galapa y Puerto de Colombia depositan diariamente un promedio de 1600 toneladas de residuos sólidos suponiendo una vida útil de 32 años para este lugar. Sin embargo, este relleno siendo relativamente nuevo cuenta de igual forma con fallas que afectan al ambiente (Acosta & Castro,2021).

• **Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma de Los Cocos**

Los residuos de la ciudad de Cartagena a partir de enero del 2006 empezaron a ser depositados en este relleno; Este relleno, cuya vida útil ha sido contemplada hasta el 1 de febrero de 2025, solo recibe desechos de esta ciudad, los cuales suman 750 ton/día. Se encuentra ubicado en el corregimiento de Pasacaballos y cuenta con un área de 64 ha (Noguera,2021).

Según el criterio de la dirección técnica general de aseo, este relleno tiene un funcionamiento aceptable, ya que maneja una cobertura diaria y un frente de descarga de residuos definido, cuenta de igual forma con chimeneas fácilmente identificables y los vectores están controlados, además de ello el flujo vehicular es bajo; sin embargo, la empresa presenta deficiencias operativas relacionadas con la conformación y mantenimiento de las vías, la falta de cunetas continuas tanto en la vía externa como en la interna, adecuaciones de los canales perimetrales de las zonas terminadas y en operación y canales de lixiviados (Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, 2019).

• **Relleno Sanitario Regional Los Ángeles**

Este relleno se encuentra ubicado en la vereda la Jagua, al Noreste de la zona urbana de la ciudad de Neiva, se ubica en un terreno de 155 ha y está siendo utilizado por un total de 12 municipios aledaños; En promedio recibe 323.9 ton/día de las cuales 289.35 son generadas por la ciudad de Neiva. Tiene estimada una vida útil hasta el 1 de enero del 2053 para disponer residuos sólidos (Noguera,2021).

Teniendo en cuenta el aspecto ambiental propuesto por la contraloría municipal de Neiva, se dice que el manejo ambiental del relleno sanitario ha mejorado, aunque actualmente presenta problemáticas importantes a la salud que afectan a los vecindarios aledaños.

• **Relleno Sanitario Regional la Glorita**

Se encuentra ubicado en el corregimiento de Combia Baja a 14 Km del casco urbano de la ciudad de Pereira, se disponen residuos de 17 municipios aledaños, pero de la sola ciudad

perteneciente se realiza un aporte de 280 ton/ día de residuos. Este relleno sanitario presenta problemas reportados por la corporación autónoma de la zona CARDER, y por los cuales la empresa encargada ha sido multada están relacionados a los derrumbes de material de cobertura de ciclos de lluvia, deterioro del terreno por escorrentía descontrolada de aguas lluvias, vertimientos sin tratamientos del agua generados por los lavados a la maquinaria, inexistencia de verificación de residuos sólidos que ingresan al relleno (Acosta & Castro, 2021).

- **Relleno Sanitario El Carrasco**

Este relleno sanitario dispone los residuos generados por la ciudad de Bucaramanga, recibe al día alrededor de 734.3 toneladas de residuos de 11 municipios y solo de la ciudad perteneciente 562 toneladas, es decir el 763.5% de los residuos totales. Cuenta con un área de 92 ha y se encuentra ubicado en la parte suroccidental de la ciudad de Bucaramanga (Noguera,2021).

Su vida útil dio fin en el año 2007, pero se encuentra en operación gracias a una celda transitoria que funciono hasta septiembre de 2011, en la actualidad se encuentra en estado de emergencia sanitaria y según autoridades se propagara la emergencia por 24 meses más es decir entrara nuevamente en operación en octubre del presente año.

3.1.1.a. Relleno Sanitario Parque Industrial De Residuos Sólidos la Miel. En Ibagué se dispone únicamente de este relleno sanitario; recibe 355.9 ton/día de residuos sólidos y cuenta con una vida útil de disposición de residuos hasta el 26 de marzo de 2020. El relleno está ubicado en la vereda Buenos Aires, aproximadamente a 5 Km del municipio de Ibagué y abarca un área de 46 ha. Actualmente los informes sobre el funcionamiento de esta planta son escasos por parte de entidades ambientales (Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, 2019).

3.1.1.b. Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo. Se encuentra ubicado en el kilómetro 9, vía Mosquera-La Mesa, en el Municipio de Bojacá. Este inicio su operación el 7 de enero de 2007 recibiendo residuos de 78 municipios, con un promedio diario de disposición de 1380 ton (Acosta & Castro,2021).; este predio pertenece a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca y cuenta con un área total de 76 ha, de las cuales están licenciadas 17. A pesar de que su operación fue contratada por 32 años actualmente se tiene una capacidad licenciada de tan solo 8 años a partir de enero de 2019 (Supe servicios, 2019).

3.4.2. Código de colores para la separación de residuos

Con la unificación del código de colores a nivel nacional, los prestadores de servicios de recolección, aprovechamiento y tratamiento de residuos podrán tener mayor eficiencia en la separación de los residuos en la fuente; los colores que fueron designados para estos son los siguientes:

- Blanco: Se van a deposita los residuos aprovechables limpios y secos como el plástico, vidrio, metales, papel y cartón.
- Negro: residuos no aprovechables como el papel higiénico, servilletas, papeles y cartones contaminados con comida; papeles metalizados, también se depositan los residuos de COVID-19.
- Verde: residuos orgánicos aprovechables como restos de comida, residuos de corte de césped y poda de jardín.

Según el Ministerio de ambiente y desarrollo (2021), Con este nuevo código de colores se espera incrementar el índice de separación en la fuente y que esto se refleje en el cumplimiento de las metas ambientales del país, no solo en materia de gestión integral de residuos sólidos sino además en metas como la reducción del 51 % de las emisiones de carbono al 2030.

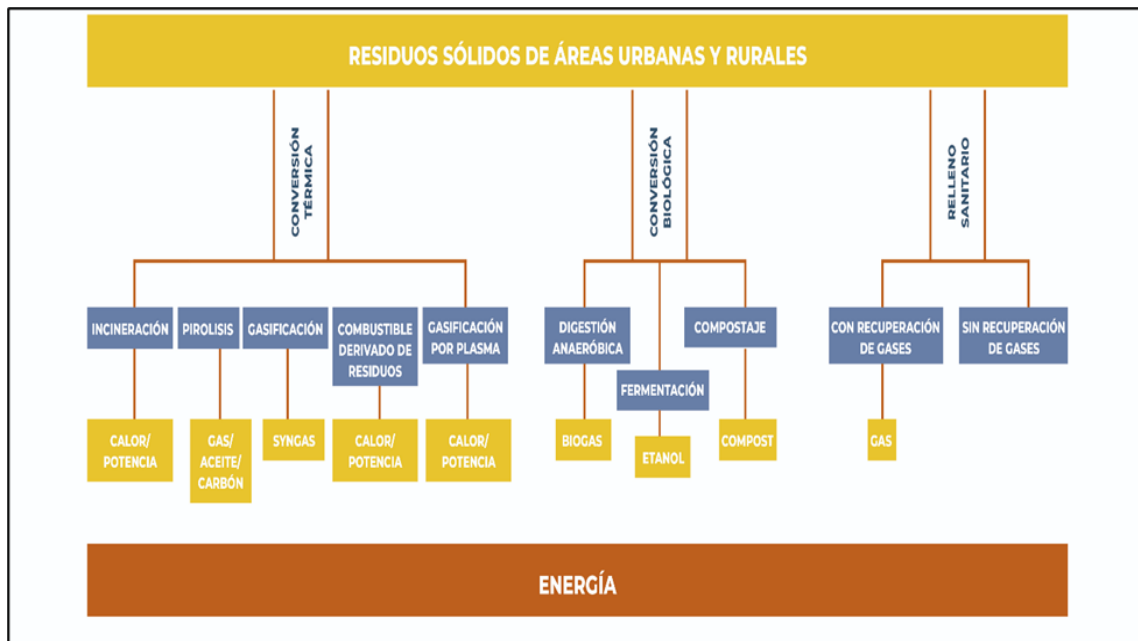
4. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS

Los residuos sólidos usados como fuente de recuperación de energía se pueden separar en dos procesos que son la conversión biológica y la conversión térmica; la primera se lleva a cabo a través de bacterias mediante procesos como lo son la digestión anaeróbica en la cual la fracción orgánica se descompone de manera natural en ausencia de oxígeno, proceso que es llevado a cabo en los rellenos sanitarios en los cuales se generan mezclas de gases (biogás) y se obtienen como componentes el metano y el dióxido de carbono. Y la conversión térmica es realizada para productos gaseosos, líquidos y sólidos mediante reacciones químicas inorgánicas, realizándose por procesos diferentes como lo son la combustión, la gasificación y la pirólisis (Moratorio et al., 2012).

En la figura 6 se puede evidenciar las diversas formas de conversión de residuos en energía.

Figura 6.

Tecnologías y rutas de conversión de residuos a energía



Nota. La figura representa las tecnologías y rutas de conversión de residuos a energía. *Tomado de: amazon. (s.f.). stories .https://s3.amazonaws.com/staticcuc/images/stories/archivos/imagenes/2019/noticias/Manejo_de_residuos.jpg*

Se puede evidenciar que existen tres procesos mediante los cuales se pueden convertir los residuos sólidos en energía; dentro de estas se encuentran las conversiones térmicas que se clasifican en cinco subcategorías (incineración, pirolisis, gasificación, combustible derivado de los residuos y gasificación por plasma); las conversiones biológicas se subdividen en tres procesos diferentes (digestión anaeróbica, fermentación y compostaje); y por último se tiene como técnica la recuperación de gases en los rellenos sanitarios.

Otra alternativa para degradar y aprovechar los residuos sólidos es el uso de la larva de mosca soldado-negra, que actualmente son usadas para el tratamiento de los residuos orgánicos ya que son factibles y económicamente viables. El vermicompostaje, la descomposición bacteriana y la descomposición por especies biológicas son los métodos que conforman estas tecnologías y son alternativas prometedoras debido a la recuperación de nutrientes a partir de desechos (Cabrera, 2014).

4.1. Conversion térmica

El proceso térmico consiste en la conversión de los residuos en productos gaseosos, líquidos y sólidos mediante reacciones químicas inorgánicas. Dentro de este se encuentran diferentes procesos que pueden ser llevados a cabo los cuales son explicados a continuación.

4.1.1. Incineración

Es el método más empleado de los procesos termoquímicos ya que tiene la capacidad de procesar residuos en composición heterogénea, pero también presenta una desventaja ya que al manejar temperaturas elevadas favorece a la emisión de sustancias con impactos ambientales y por ende ocasionan problemas a la salud (Montiel-Bohórquez & Pérez, 2019).

Antes de realizar dicho proceso se tienen que realizar procesos como lo son la trituración, la separación, el tamizado y la desinfección de los residuos a tratar. Consiguiente a esto se realiza la iniciación la cual tiene como objetivo someter a los residuos a un tratamiento determinado con el fin de reducir el volumen y la peligrosidad, destruyendo todas las sustancias que sean nocivas presentes en el mismo.

Para realizar un proceso eficaz y poder saber cuál es la mejor opción de un horno para llevar a cabo esta técnica se deben tener en cuenta diferentes factores como la forma de los residuos, la composición elemental, el poder calorífico, el contenido de inertes, la corrosividad y la cantidad de los contaminantes que están presentes en los efluentes (Escobar et al., 2015).

La incineración presenta diversas ventajas dentro de las cuales se presenta una reducción del volumen de los residuos en un 90%, una reducción en peso del 30%, se disminuyen los costos de transporte para la posibilidad de su instalación en zonas urbanas y se controlan las diversas emisiones de contaminantes por debajo de los mínimos establecidos (Castillo Meza & Luzardo Briceño, 2013).

Las plantas de energía queman residuos a altas temperaturas y dan el calor para obtener vapor. A su vez, el vapor impulsa turbinas que van a producir electricidad; una planta de energía a base de residuos convierte los residuos sólidos en electricidad a calor, una forma ecológica y rentable de recuperar energía, que luego es usada para sistemas de calefacción urbana. Es posible producir entre 300 y 810 Kwh por tonelada de residuos (Barrios, 2019).

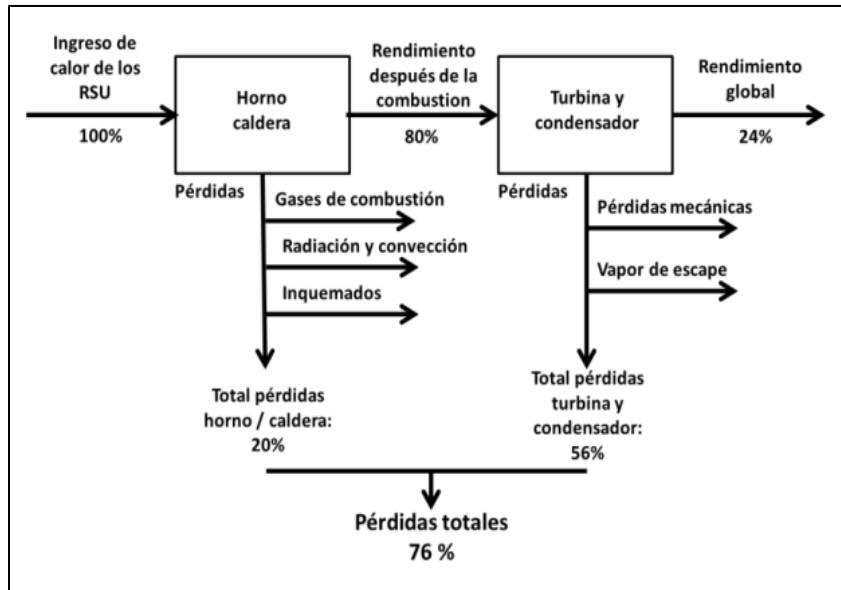
El proceso de incineración está dividido en tres partes principalmente: la incineración, la recuperación de energía y el control de la contaminación atmosférica. Este proceso va a producir energía en forma de vapor o electricidad si es acoplado con un sistema de recuperación de energía adecuado el cual está compuesto por un horno revestido, una parrilla de fuego, sopladores de aire y una estufa con capacidades de 50 kg, este proceso tiene lugar a temperaturas entre 750° C y 1000 ° C y va a generar como producto un residuo de ceniza estéril (Singh et al., 2011).

El uso de esta tecnología permite reducir en gran medida el peso en un 75% y el volumen en un 90% de los residuos que van a ser tratados y además de ellos obtener energía. Son precisamente el poder calorífico del material a incinerar y el potencial contaminante de las emisiones dos motivos que han hecho evolucionar los sistemas de incineración hacia procedimientos capaces de alcanzar mayores rendimientos en la combustión y mayor eficacia en la eliminación de contaminantes. La incineración ha sido objeto de críticas desde el punto de vista medioambiental debido a la formación de sustancias muy tóxicas, dioxinas y furanos, que junto a diferentes metales pesados pueden ser emitidos por estas instalaciones. Las disposiciones y normas legales que limitan las emisiones de las incineradoras son cada vez más estrictos de modo que para conseguir su cumplimiento ha sido necesario desarrollar nuevas tecnologías para el sistema de combustión y para el sistema de depuración de gases (Romero, 2001).

El rendimiento de un sistema de incineración no depende esencialmente del tipo de horno, es decir, igual rendimiento puede haber hornos de tipo rotativo, parrilla, o lecho fluidizado. Desde esta óptica el rendimiento debe definirse como la transformación de sólidos combustibles en gases, como se evidencia en la figura 7 (Castells, 2005).

Figura 7.

Rendimientos habituales de una incineradora



Nota. La figura muestra el rendimiento que presenta un proceso de incineración de manera habitual.

Como se evidencia en la Figura 7, la incineración consiste en un sistema de conversión energético con un rendimiento global de un 20 a 24%; Se tiene unas pérdidas totales de los 76% provenientes del horno, las turbinas y el condensador usado en el proceso.

4.1.2. Pirólisis

Es un proceso termoquímico en el cual se llevan a cabo diversas etapas para su proceso, primero se realiza una preparación y molienda de los residuos a tratar, luego se pasa a una etapa de secado en la cual se va mejorar el poder calorífico y se va aumentar la eficiencia de las reacciones, posterior a esto se realiza el proceso de pirólisis y finalmente se realiza un tratamiento

secundario al gas obtenido y al coque a través de una condensación de gases a partir de la extracción de mezclas de aceites energéticamente estables.

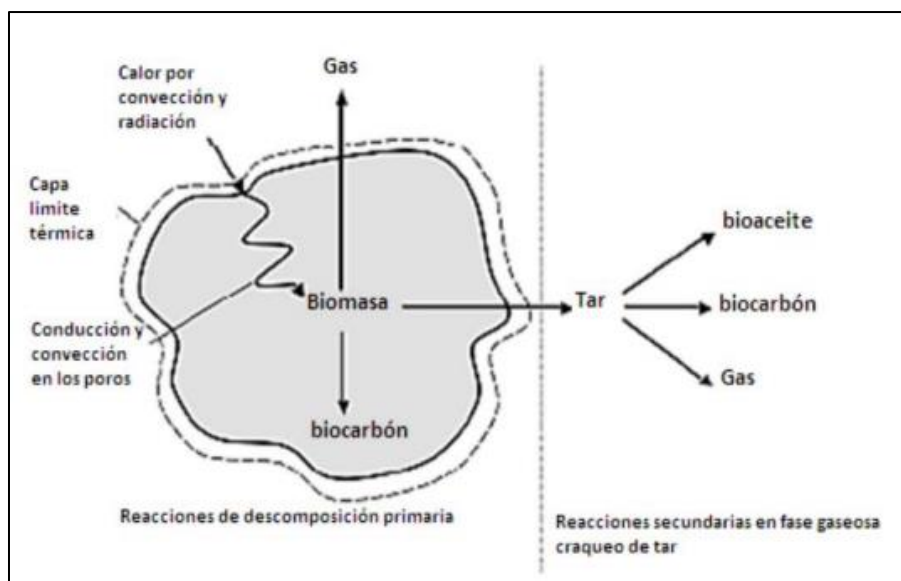
Es un proceso en el cual se descompone la biomasa a partir de una oxidación incompleta que se realiza en ausencia de oxígeno la cual va a generar compuestos sólidos, líquidos y gaseosos que van a ser aptos como materiales para diversas industrias o usados como combustibles (Cerdá, 2012).

Para llevar a cabo este proceso se requiere de un calor externo para que se pueda mantener la temperatura entre los 300 ° C y 800 ° C dependiendo de los materiales a usar. Como anteriormente se menciona se necesita de un pretratamiento en el cual se realiza la separación mecánica de los vidrios, metales y materiales inertes, se empieza el proceso con la descomposición térmica del material con oxígeno reducido dentro de unas cámaras de calentamiento. Esta técnica presenta ventajas tales como que el equipo para su implementación es de flexible instalación, la separación de los residuos no es necesaria, genera un impacto ambiental mínimo, y todos los materiales de desecho se utilizan para producir diferentes bioproductos (Moya et al., 2017).

La Figura 8 muestra el mecanismo de reacción de una partícula de biomasa al ser expuesta al proceso de pirólisis, dando a conocer que de este se puede producir bioaceite, biocarbón y gas.

Figura 8.

Pirólisis de una partícula de biomasa



Nota. La figura muestra el método de reacción de una partícula de biomasa en el proceso de pirólisis

Cabe destacar que las condiciones de operación del proceso de pirólisis pueden variar dependiendo del tipo de productos que se desee obtener. De acuerdo con la literatura, al manejar altas temperaturas y cortos tiempos de reacción, se favorece la formación de productos condensables, mientras que tiempos más largos de reacción facilitan la formación de productos gaseosos no condensables, debido a la aparición de reacciones secundarias. Los productos sólidos, por lo general, se obtienen a temperaturas bajas (Acosta & Castro,2021).

4.1.2.a. Pirólisis Rápida. Es un proceso continuo que tiene como interés la producción de combustible líquido a partir de biomasa, la cual se descompone para generar vapores, aerosoles y una determinada cantidad de coque. Consiguiente a esto, se realiza un enfriamiento y condensación, formando de esta forma un líquido de color marrón oscuro conocido como bioaceite, el cual tiene un porcentaje calórico equivalente al 50% del diésel. Para realizar una pirólisis flash es necesario contar con reactores especiales y tener un rango de temperatura entre 475 y 550 °C. En un proceso avanzado en el cual se controlan diversos parámetros con el fin de obtener altos rendimientos mayores al 75% del producto líquido o bioaceite, junto con subproducto como el gas o el coque. Estos pueden llegar a ser usados en procesos para proveer calor (Klug,2021).

4.1.2.b. Pirólisis Intermedia. Se lleva a cabo a una temperatura entre 300 y 500 °C, en este proceso las reacciones químicas son de fácil control gracias a las condiciones de operación; en esta técnica se pueden obtener rendimientos de hasta un 55%; Sin embargo, al presentar un rendimiento menor que el de la pirólisis flash se caracteriza por permitir realizar alimentaciones con grandes tamaños de partícula, ya sean gruesas, trituradas o troceadas (Batidas,2019).

4.1.2.c. Pirólisis lenta. Es un proceso que es llevado a cabo a temperaturas entre los 300 y 700 °C, con velocidades de calentamiento lentas y tiempos de reacción que van desde horas hasta días en ocasiones (Batidas,2019). Las condiciones de este proceso permiten obtener productos ya sea gaseosos, líquidos y sólidos, aunque cabe resaltar que su objetivo principalmente es la producción de combustible sólido mediante la carbonización.

4.1.2.d. Torrefacción. Es un proceso lento que se realiza a temperaturas entre los 225 y 300 °C, tiene como objetivo aumentar la densidad de energía y las propiedades de biomasa. El producto final obtenido en este proceso es un material sólido, seco y ennegrecido que se encuentra libre de sustancias volátiles por el desprendimiento de agua contenida en la biomasa y descomposición parcial de biopolímeros como la celulosa, la hemicelulosa o la lignina en volátiles orgánicos (Batidas,2019).

4.1.2.e. Hidro pirólisis. La Hidro pirólisis es un proceso que aún se encuentra en estudio, en este las reacciones se van a producir bajo presiones de hidrogeno, lo cual va a dificultar y minimizar la formación de radicales libres, además de esto la cantidad de hidrocarburos insaturados es reducida lo que va a aumentar la calidad del bioaceite que se forma (Acosta & Castro,2021).

Según el Estudio Comparativo de Tecnologías Comerciales de Valorización de Residuos Sólidos Urbanos, dependiendo de la composición de los residuos municipales a tratar y de la tecnología de pirólisis usada, la cantidad de producto líquido, sólido y gaseoso obtenido será diferente; En la Figura se muestra la comparación entre los rendimientos aproximados obtenidos para las diferentes fracciones de producto tanto para el proceso de pirólisis lenta, como rápida y flash (Cortazar,2014).

Figura 9.

Rendimientos de procesos de pirólisis para la obtención de energía a partir de residuos

| Proceso | Rendimiento (%) | | |
|------------------|-----------------|---------|---------|
| | Líquidos | Char | Gas |
| Pirólisis lenta | 40 - 50 | 10 - 20 | 20 - 30 |
| Pirólisis Rápida | 60 - 75 | 15 - 25 | 10 - 20 |
| Pirólisis Flash | < 10 | < 10 | > 80 |

Nota. La figura representa los tres tipos de pirólisis implementados en el tratamiento de residuos sólidos y da a conocer el rendimiento.

De acuerdo con estos rendimientos, es posible estimar el tipo de pirólisis a trabajar, según el producto que se desee obtener en mayor cantidad, además de las diversas aplicaciones que tienen cada uno de ellos, siendo la más importante de ellas, la obtención de energía ya sea como energía mecánica o energía térmica

4.1.3. Gasificación

La gasificación de biomasa se va a presentar después de que ocurra una oxidación parcial de la misma producida por el calor. Lo que va a generar un combustible que va a estar compuesto por una mezcla de gases rico en monóxido de carbono e hidrógeno, y tendrá un contenido energético de un orden de 10 al 45 por 100 del valor calorífico del gas natural (Cerdá, 2012). Este proceso es realizado a temperaturas elevadas entre los 500 y 1800 °C (Escobar et al., 2015).

La implementación de esta técnica presenta ventajas ya que se da una reducción de los contaminantes orgánicos, de la masa y el volumen en un porcentaje del 80-90% , presenta un alto potencial para el ahorro de las tierras, muestra usos reciclables y muestra una reducción de emisiones y cargas ambientales (Moya et al., 2017).

Este proceso también es conocido como combustión indirecta con una oxidación parcial en presencia de una cantidad pequeña de un agente oxidante menor que la requerida en la estequiometria, la temperatura mínima manejada para ella es de 1100 °C. Durante el proceso los residuos son quemados con una cantidad controlada de oxígeno para suministrar de esta forma el suficiente calor a la reacción predominante para el gas de síntesis, el cual es conducido a una planta de regeneración para producir energía como vapor y electricidad, los productos principales de este proceso que se obtienen son carbón y cenizas (Tan et al., 2015).

Mediante la gasificación se pueden alcanzar rendimientos eléctricos de hasta un 30-32% mediante el uso de moto generadores accionados (Grahn & Lovtrup-Rein, 1971). La combustión de biomasa es un proceso en el cual se tiene Carbono e hidrógeno contenidos en combustibles que van a reaccionar con el exceso de oxígeno para poder generar dióxido de carbono, agua y de esta forma liberar calor (Cerdá, 2012).

4.2. Conversión biológica

Este proceso es efectuado por bacterias mediante el proceso de digestión anaerobia, donde la fracción orgánica de los residuos se descompone de manera natural en ausencia de aire. Este proceso ocurre en rellenos sanitarios (algunos controlados y otros no) donde se genera una mezcla de gases, conocida como biogás, cuyos dos componentes principales son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (Moratorio et al., 2012).

De igual forma como anteriormente se mencionó las tecnologías de conversión de residuos orgánicos por saprófagos es un tratamiento actualmente usado para el tratamiento de estos ya que es factible y viable.

4.2.1. Digestión anaeróbica

Es un proceso biológico en el cual la materia mediante la acción de microorganismos y en ausencia de oxígeno se va a descomponer en biogás o digestato, la cual es una mezcla de productos minerales y compuestos que representan una difícil degradación (Cerdá, 2012).

Este proceso implica normalmente un pretratamiento y una separación de los materiales que no son digeribles, trituración, digestión, recuperación del biogás y tratamiento de los diversos residuos. Para esto dentro de un digestor, los desechos que son de alimentos son diluidos con agua o lodos de depuradora o efluentes que se recirculan. Se controla la temperatura, para microorganismos termófilos es de 50 ° C a 56 ° C y mesófilos de 20 ° C a 40 ° C y el tiempo de residencia es aproximadamente de 15 a 30 días respectivamente (Nixon et al., 2013).

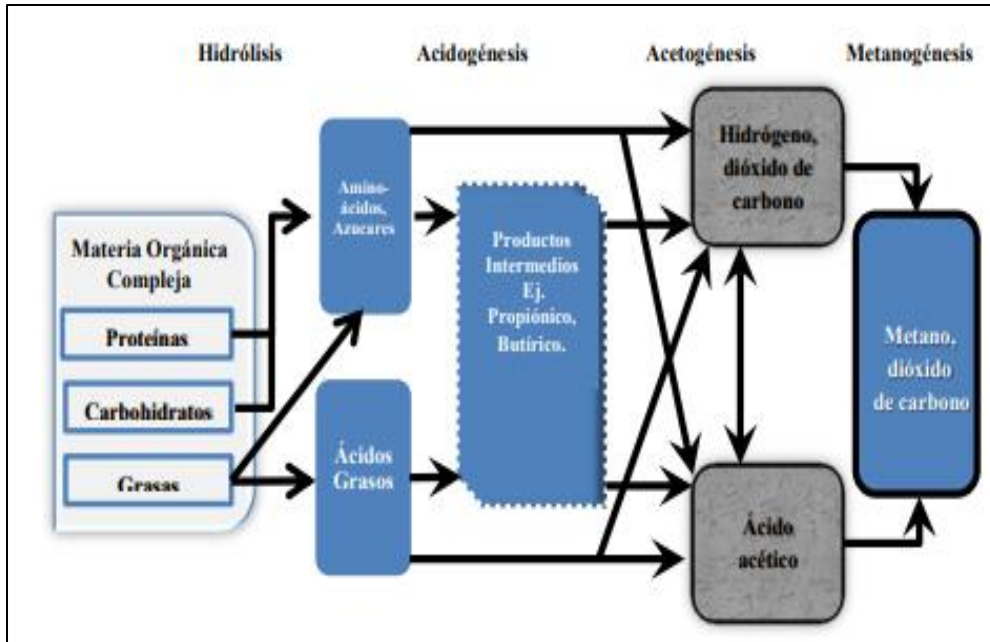
Es un proceso que presenta varias ventajas, tiene una alta relación de reducción de los sólidos volátiles, una demanda química de oxígeno y una reducción bioquímica. El producto final va a ser estable e inodoro, es un líquido fibroso con un alto valor de fertilizante (Chand Malav et al., 2020).

Esta técnica no solo va a mitigar los impactos negativos en el medio ambiente, sino que también va a producir biogás para uso doméstico, ya sea cocinar o diversas aplicaciones (Wang et al., 2018).

Este proceso consta de diferentes fases consecutivas que están diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato en las cuales intervienen cuatro grandes poblaciones de microorganismos como se puede evidenciar en la Figura 6, pero se debe tener en cuenta que este proceso requiere de una cantidad de humedad en los residuos elevada para su ejecución (Oyuky et al., 2011).

Figura 10.

Etapas del proceso de digestión anaeróbica



Nota. La figura representa cuales son las etapas llevadas a cabo en el proceso de digestión anaeróbica.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014.

Como se evidencia en la anterior, figura 10, se puede ver que este proceso utiliza materias primas sólidas orgánicas sometiéndolas a una secuencia de procesos como lo son la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis.

La digestión anaerobia se desarrolla en múltiples etapas, donde las fases principales son una primera hidrolítica fermentativa y una final metanogénica. En esta última, se transforman los productos finales de la misma en metano y dióxido de carbono, mediante las bacterias metanogénicas que son anaeróbicas estrictas. Para esta tecnología el tipo de sustrato a digerir influye en gran medida en el rendimiento y en la composición del biogás obtenido. Para una producción máxima es preferible utilizar sustratos ricos en grasas, proteínas e hidratos de carbono ya que su degradación conlleva la formación de cantidades importantes de ácidos grasos volátiles, precursores del metano. Por ello, es aconsejable que se trate la materia orgánica procedente de recogida separada para evitar muchos de los problemas producidos por la acumulación de impurezas o evitar colmataciones de ciertas partes del circuito de digestión. Y es necesario además optimizar la mezcla de materiales a digerir para aumentar el rendimiento en metano (Soliva, 2011).

El aprovechamiento energético del biogás más usual es el motor de cogeneración, mediante el cual se obtienen rendimientos en energía eléctrica de entre el 35 y 40% y en energía térmica de entre el 30 % y 40% (Castro Granado, 2018).

4.2.1.a. Fermentación oscura. La fermentación oscura consiste en la obtención de biohidrógeno a partir de residuos orgánicos, en ausencia de luz, y por la acción combinada de un consorcio de bacterias anaeróbicas: es una tecnología basada en la recuperación del hidrógeno que se genera durante las primeras etapas de la digestión anaeróbica, evitando que sea consumido para las bacterias metalogénicas. Dependiendo las condiciones de operación que sean aplicadas en el primer digestor como pH, tiempos de retención hidráulicos, temperatura, entre otros, se consigue optimizar la producción de biohidrógeno a partir de los residuos orgánicos, teniendo así lugar la fermentación oscura (Silvestre,2014).

La temperatura del proceso es un factor importante que influye en el rendimiento y en la producción de biohidrógeno. Los microorganismos fermentativos se clasifican, según su temperatura óptima de crecimiento, en mesófilos (temperaturas moderadas de 25 – 45°C), termófilos (temperaturas más elevadas de 45 – 65°C), termófilos extremos (65 – 80°C) o hipertermófilos (temperaturas mayores a 80°C. En los consorcios comúnmente empleados en fermentación hay una mayor proporción de microorganismos mesófilos por lo que el arranque del proceso suele ser más lento trabajando en dichas condiciones de temperatura, aunque se observa un mayor rendimiento de producción de hidrógeno frente a sustrato cuando se lleva a cabo en condiciones termófilas (70°C); El pH del medio de fermentación influye directamente en el metabolismo, así como en la actividad de las enzimas involucradas en el proceso. En general, el rango de pH adecuado para la fermentación oscura es de 5-7. Si bien los pH más ácidos inhiben el crecimiento de microorganismos metanogénicas consumidores de hidrógeno lo cual beneficiaría el rendimiento, presentan el inconveniente de limitar la capacidad de las bacterias de controlar el medio intracelular, por lo que no son adecuados para la producción de biohidrógeno (Martínez, 2020).

4.2.2. Compostaje

El compostaje es un proceso biológico aerobio, lo que quiere decir que se realiza en presencia de oxígeno, es llevado a cabo bajo condiciones de ventilación, humedad y temperatura controladas, transforma los residuos orgánicos degradables en un material estable e higienizado llamado compost, que se puede utilizar como enmienda orgánica. Cabe resaltar que este es otro proceso para tratar los residuos sólidos, pero no genera energía partir del mismo.

El proceso de compostaje consta de 5 fases:

- Fase inicial: inicia el proceso de degradación de los orgánicos que presentan una degradación fácil. En este la temperatura comienza a elevarse y de esta forma el oxígeno disminuye.
- Termofílica: los compuestos orgánicos son degradados a temperaturas de hasta 70°C , perdiendo una proporción de agua extensa. Al finalizar este proceso la temperatura comienza a descender y el material orgánico escasea.
- Mesofílica: se caracteriza porque la temperatura desciende hasta los 35 ó 40°C. Los hongos colonizan la pila de residuos donde principalmente se encuentra lignina, celulosa y hemicelulosa.
- Enfriamiento: se presenta porque disminuye la actividad microbiana por la ausencia de materia orgánica digerible. Usualmente en esta fase el compost es colonizado por insectos.
- Maduración.: en la etapa final se estabiliza el compost y se eliminan los insectos y algunos microorganismos (Residuos sólidos, 2010).

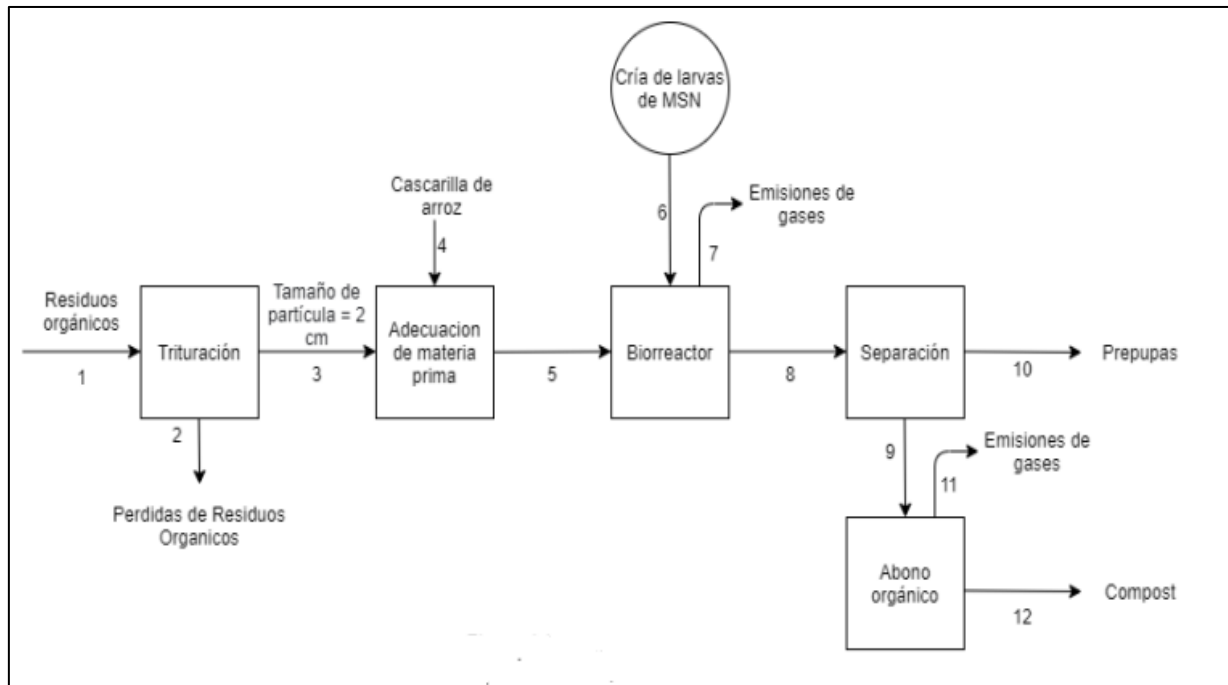
4.2.3. Conversión de residuos orgánicos por saprófagos

En el método de descomposición por especies biológicas, el tratamiento de larvas (mosca soldado negra) es una de las alternativas con mayor éxito ya que esta especie se ha convertido en un insecto útil para la reducción de desechos orgánicos; sobrevive a condiciones hostiles como la sequía, la falta de oxígeno y la falta de alimento; su desarrollo óptimo en la temperatura es de 27 a 30 °C, humedad del 60 al 80%, estableciendo la ideal como 70% y su pH óptimo de 8 pero resaltando que las larvas pueden regular su pH hasta 10; también ayuda a lograr una producción de metano menor comparado con otros métodos de compostaje, reduciendo la huella de carbono

del proceso; y, finalmente, la mosca no se siente atraída por el hábitat o los alimentos de los humanos ya que no posee partes bucales, sistema digestivo o aguijón, reduciendo las poblaciones de moscas domésticas (Cabrera & Lorena, 2014).

Figura 11.

Diagrama de bloques del proceso usando la mosca soldado-negra



Nota. La figura representa cuales son las operaciones unitarias que conforman el proceso de tratamiento de residuos sólidos orgánicos mediante el uso de larvas de mosca soldado-negra. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8329/1/6152687-2021-1-IQ.pdf>

Como se observa en la figura 11 el proceso inicia con la disposición de los residuos sólidos que son colocados en un equipo de trituración, consiguiente a esto se realiza un cuarteo para homogenizar la mezcla, luego se agregan los residuos a un biorreactor junto con las larvas y una adición de material seco para controlar el nivel de humedad. Después de esto pasados 15 a 20 días se recolectan las larvas y el abono orgánico que proviene del biorreactor y se continua con el ciclo para la disposición de residuos (Cabrera Daniela & Lorena, 2014).

4.3. Comparación de las técnicas de recuperación de energía

A continuación, en la tala 4, se presenta la comparación de cada una de las tecnologías, teniendo en cuenta los aspectos ambientales, técnicos y financieros; dentro de los aspectos técnicos se tiene en cuenta la capacidad de tratamiento de las tecnologías haciendo referencia al volumen de residuos por día, también se tiene en cuenta la composición de estos y los parámetros fisicoquímicos. En los aspectos ambientales se analiza la generación de agentes patógenos que puedan presentar, la contaminación atmosférica, la afectación a los suelos y la demanda de agua utilizada para dichos procesos.

Tabla 4

Comparación de las tecnologías, beneficios y limitaciones

| Técnica | Criterio | Beneficios | Limitaciones |
|--------------|-----------|--|---|
| Incineración | Técnico | <p>Reduce el volumen y la masa en un 80% y 70%.</p> <p>Puede tratar residuos provenientes de construcción, biomasa leñosa y no leñosa.</p> <p>Puede ser usado para el tratamiento de residuos peligrosos.</p> <p>Es una tecnología ampliamente desarrollada.</p> <p>Rendimiento global de un 20 a 24%;</p> | <p>Los flujos de residuos de bajo poder calorífico reducen la eficiencia producida.</p> <p>El rendimiento energético es de un 17%.</p> <p>Requiere que los residuos que ingresan tengan una humedad superior al 3% y no mayor a 25%.</p> <p>Se requiere un tratamiento alternativo o una disposición final de los subproductos generados en el proceso.</p> <p>Se requiere una alta temperatura para que se dé la combustión.</p> <p>El poder calorífico debe ser mayor o igual a 1600 kcal/kg.</p> |
| | Ambiental | <p>Genera destrucción de algunos desechos y la desintoxicación de otros para hacerlos de esta forma más apropiados en su disposición final.</p> | <p>Genera emisiones atmosféricas (cenizas).</p> <p>Genera gases contaminantes como lo son el óxido de nitrógeno y azufre.</p> <p>El consumo de agua por tonelada de residuos oscila entre los 80 y 120 litros.</p> |

Tabla 4. (Continuación)

| Técnica | Criterio | Beneficios | Limitaciones |
|----------------------|-----------|---|---|
| Pirolisis | Técnico | <p>Reduce el tratamiento de gases de combustión adecuado para residuos carbonosos.</p> <p>Disminuye el volumen de los residuos hasta un 90%.</p> <p>Puede tratar biomasa leñosa y residuos sólidos urbanos, incluyendo el plástico, caucho, papel, cartón.</p> <p>Requieren que los residuos que ingresan al proceso tengan una humedad menor o igual al 20%.</p> <p>Otorga rendimientos en el proceso en un promedio de 40 a 45% de obtención de energía, usando tecnologías ya sea de pirolisis lenta, intermedia o rápida.</p> | <p>Exige actividades de pretratamiento como lo son la trituración o el tamizado.</p> <p>Presenta problemas cuando se manejan residuos con un alto contenido de humedad</p> <p>Requiere de un tratamiento alternativo o una disposición final de los subproductos generados en el proceso.</p> <p>Requiere de una alta cantidad de energía para el arranque.</p> <p>El poder calorífico debe ser mayor o igual a 1500 Kcal/kg.</p> |
| | Ambiental | <p>Los mismos residuos se transforman en fuente de energía para mantener el sistema.</p> | <p>Se generan compuestos indeseados como dioxinas.</p> <p>Se genera emisiones de material particulado.</p> <p>Las cenizas que genera tienen características potenciales de residuos peligrosos.</p> |
| Digestión anaeróbica | Técnico | <p>Los residuos que ingresen al proceso deben tener una humedad mayor al 75%.</p> <p>No genera ningún tipo de rechazo que requiera de un tratamiento o disposición final fuera del proceso de la misma tecnología.</p> <p>El mantenimiento del biodigestor es cada 10 años.</p> | <p>La lignina puede persistir por muchos periodos prolongados de tiempo para degradar.</p> <p>Se requiere de un tratamiento alternativo o una disposición final del 100% de los residuos inorgánicos que no pueden ser procesados por esta tecnología.</p> |

Tabla 4. (Continuación)

| Técnica | Criterio | Beneficios | Limitaciones |
|---|-----------|---|---|
| Digestión anaeróbica | Técnico | <p>Puede tratar residuos sólidos orgánicos, lodos de aguas residuales e industriales, residuos orgánicos agrícolas y pecuarios.</p> <p>Se obtiene un rendimiento en energía eléctrica de entre el 35 y 40% y de energía termina del 30 al 40%.</p> | <p>Requiere una supervisión continua y precisa.</p> <p>El procesos es sensible a la temperatura, pH, velocidad de carga y cambio del tipo de carga.</p> |
| | Ambiental | <p>La combustión de metano produce solo agua y dióxido de carbono, no genera gases tóxicos.</p> <p>Produce como residuo abono, rico en nutrientes y libre de microorganismos patógenos.</p> | <p>El metano es explosivo al mezclarse con el aire en una proporción que va del 5 al 15%</p> |
| <p>Mosca soldado-negra</p> <p>Tratamiento de larvas</p> | | <p>La especie se puede cultivar y cosechar en instalaciones simples que no requieren grandes habilidades operativas.</p> <p>Comparadas con otros insectos tienen la ventaja de convertir los desechos en alimento y generar valor y cerrar los circuitos de nutrientes a medida que reducen la contaminación y los costos.</p> <p>Las moscas soldado-negras logran controlar naturalmente la población de moscas de vivienda, siendo un aspecto positivo ya que estas transportan patógenos y enfermedades.</p> | <p>En los casos en que hubiera muchas larvas de mosca soldado y que estuvieran todas en la fase de duración podrían ocasionar una salida masiva del compostador, ya que buscarán un lugar más seco que el compostador, seguro, con luz y sin restos de comida para salir.</p> <p>Requiere un capital inicial alto para su implementación debido a los equipos y maquinaria que usa.</p> |

Tabla 4. (Continuación)

| Técnica | Criterio | Beneficios | Limitaciones |
|---------------------|----------|--|--|
| Fermentación oscura | | <p>Cuenta con una amplia variedad de sustratos que es capaz de transformar en biohidrógeno: desde azúcares sencillos hasta biomasa lignocelulósica, residuos alimenticios y corrientes residuales.</p> <p>Las condiciones de proceso más empleadas en fermentación oscura son de 37°C y un pH inicial de 7.</p> | <p>Si se manejan pH inferiores de 5 se inhibe el crecimiento de microorganismos metanogénicos consumidores de hidrógeno.</p> <p>La presión parcial de hidrógeno afecta al rendimiento del proceso ya que, a mayor presencia de hidrógeno, las reacciones en las que se produce el mismo se ven termodinámicamente desfavorecidas</p> |
| Gasificación | | <p>Obtención de un gas de síntesis con varios usos (Producción de electricidad, uso como combustible, producción de una amplia gama de productos químicos)</p> <p>Facilidad de manejo de los productos obtenidos</p> <p>Se evita la formación de compuestos nitrogenados, halogenados y azufrados peligrosos (selección previa de materiales que ingresan al proceso).</p> | <p>Presenta una complejidad en su operación.</p> <p>Experiencias a gran escala son limitadas.</p> <p>Uso de recursos que preferiblemente son destinados al reciclaje</p> <p>Requieren de más energía si se tratan residuos con altos porcentajes de humedad</p> |

Nota. La tabla muestra las limitación y beneficios que presentan las técnicas de aprovechamiento de energía partir de residuos sólidos.

En Colombia teniendo en cuenta las comparaciones realizadas se puede observar que el proceso de compostaje es una herramienta muy efectiva y fácil ya que se puede llevar a cabo desde pequeñas cantidades hasta grandes escalas a nivel industrial, convirtiendo los desechos orgánicos que representan el 80% de los residuos en Colombia, en un producto útil que aporta beneficios al ambiente. La producción de una planta de tratamiento para los residuos sólidos orgánicos en Colombia es posible ya que se cuenta con la materia prima disponible en grandes proporciones de diversos lugares, las condiciones climáticas son favorables en ciudades como Bogotá lo que va a permitir la construcción de un moscario alimentado por luz natural evitando usar luces artificiales (Cabrera Daniela & Lorena, 2014). Teniendo en cuenta las otras alternativas anteriormente mencionadas de evidencia que para Colombia y teniendo en cuenta las condiciones y afecciones

ambientales que se podrían llegar a presentar la pirolisis como más adelante se va mencionar es la más efectiva por su potencial energético y las ventajas ambientalmente a destacar.

En Colombia en el año 2021 en San Andres se inauguró la primera planta de valorización energética de residuos sólidos para la producción de energía a partir del material dispuesto en el relleno sanitario Magic Garden. Se dio a conocer que la planta realiza una separación de residuos que pasan a un proceso de recuperación de energía que podrá ser utilizada por la misma planta. Se sostiene la importancia de la economía circular, en el proceso se recibe el residuo, se separa, se procesa y se convierte en energía y esta va a abastecer el auto consumo de la planta. El presidente Iván Duque da a conocer que esta planta no solo va procesar los residuos nuevos sino los existentes también lo cual permitirá una transformación del relleno con el tipo; el sistema que se usa es altamente automatizado, iniciando con equipos que cuentan con una serie de cuchillas de acero que abren las bolsas de residuos, permitiendo que el contenido salga y sea derivado a otra banda transportadora para que sean clasificados y allí sean seleccionados para reutilizar o enviar a la incineradora. Este proyecto se convierte en una solución integral al manejo de residuos que beneficia a toda la población del Archipiélago. Igualmente busca consolidar la circularidad en la gestión de residuos, generando mecanismos de recuperación de aquellos que no sean utilizados en este sistema, buscando el aprovechamiento de materiales de rechazo como metales, y la utilización de las cenizas y escorias en otros sectores como el de construcción, buscando así el cierre de ciclos de materiales y su aprovechamiento al 100%. La planta de separación de residuos cuenta con un área de alistamiento y descarga de residuos con una capacidad de 150 ton/ día, equipos de clasificación automatizada, trituración- homogenización y banda transportadora hasta la puerta de la planta y la planta de lixiviados cuenta con sistemas de membranas vibratorias, automáticas y expandibles y equipos de depuración para evitar taponamiento en los filtros (Minivivienda,2021).

5. ESTRATEGIA DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS PARA COLOMBIA

En Colombia, más de 30000 ton de residuos sólidos son depositados diariamente en rellenos sanitarios (INERCO, 2018), cantidad que día tras día sigue aumentando, dado al continuo crecimiento de la población y de las diversas actividades industriales que se desarrollan en el país. Cabe resaltar que la insuficiencia de incentivos otorgados para minimizar la generación de los residuos o para aumentar los niveles de aprovechamiento de estos lleva a recurrir a que sean depositados en los rellenos sanitarios sin tratamiento alguno, lo que puede generar problemas ambientales tales como lixiviados, emisiones de gases de efecto invernadero, o problemas de índoles sociales asociados con vectores de enfermedades y calidad de vida.

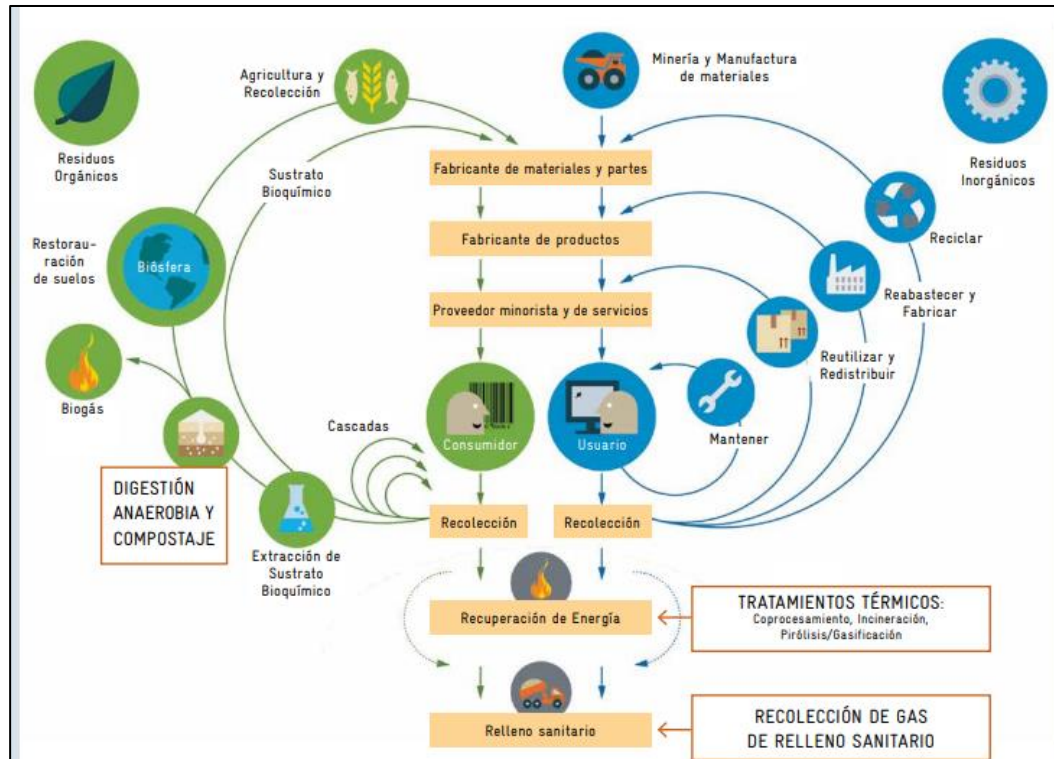
5.1. Aprovechamiento energético de los residuos y economía circular

La visión enfocada en transitar hacia una economía circular tiene como propósito reemplazar la economía actualmente lineal de ‘tomar, usar y desechar’, con otra en la que los recursos circulan a valores altos, evitando o reduciendo la necesidad de recursos primarios y minimizando residuos, contaminantes y emisiones. Las diferentes tecnologías de aprovechamiento energético de residuos desempeñan diferentes papeles dentro de la economía circular; Los proyectos de aprovechamiento energético de residuos no deben competir con las medidas para su reducción, ni con las medidas de reutilización eficientes en términos de costo y el reciclado de materiales. El aprovechamiento energético de residuos es una tecnología complementaria para el tratamiento de fracciones de RSU remanentes no reciclables.

Como se puede evidenciar en la Figura 12 mediante un principio de economía circular se pueden llegar a valorizar los residuos generando energía a partir de tratamiento ya sean térmicos o biológicos.

Figura 12.

Principio de la Economía Circular



Nota. La figura representa cuales son los procesos usados para la recuperación de los residuos por diferentes tratamientos. <https://www.4echile.cl/4echile/wp-content/uploads/2018/02/Guia-GIZ-2017-WasteToEnergy-SP.pdf>

Como se puede evidenciar en la Figura 12, incluso con un reciclado intensivo, siempre habrá residuos remanentes que no tienen valor material o de mercado y que, en algunos casos, se clasifican como peligrosos. Estos residuos con cierto poder calorífico se pueden aprovechar para recuperar energía y sustituir el uso de combustibles fósiles. Un tratamiento térmico, como la incineración o el procesamiento, que cumpla con los estándares de emisiones ambientales, también puede jugar un papel en la destrucción de sustancias orgánicas tóxicas y su eliminación del flujo circular de materiales. Algunas materias valiosas, como los metales, se pueden recuperar de las escorias o cenizas remanentes del proceso de incineración; sin embargo, el resto debe ser tratado en forma independiente y disponerse en un relleno sanitario seguro. Si la fracción orgánica se pueden separar en forma eficiente de la fracción inorgánica, la digestión anaerobia también puede desempeñar un papel importante en la recuperación de biogás y composta en el ciclo biológico. La

recolección de gases de un relleno sanitario permite la mitigación de metano liberado de los residuos orgánicos enviados a dichos rellenos sanitarios (Mutz et al., 2017).

5.2. Pirólisis como mejor técnica para implementar en Colombia

La pirólisis es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales excepto metales y vidrios causada por el calentamiento en ausencia de oxígeno, esta se puede utilizar también como una forma de tratamiento termal para reducir el volumen de los residuos y producir combustibles como subproductos (López B, 2010).

El proceso de pirólisis está compuesto por tres etapas principales: la dosificación y alimentación de materia prima, la transformación de la materia orgánica y, por último, la obtención y separación de los productos. Dichos productos se conocen como char, bioaceite y gas, cuya producción dependerá de las variables y/o parámetros que se manejen en los procesos (Acosta D, 2021).

5.2.1. Variables que afectan al proceso

Entre las variables de proceso que más influyen en la pirólisis se encuentra el tipo de biomasa en el cual se tienen en cuenta la composición orgánica, la cantidad de ceniza, el porcentaje de humedad, el tamaño y la forma de las partículas y las propiedades térmicas de la biomasa, de igual forma se tiene en cuenta el perfil tiempo-temperatura y la atmósfera en las cuales se encuentra la tasa de calentamiento, la temperatura máxima y el tiempo de residencia. Si estas variables son manejadas de forma idónea se puede llegar a optimizar el proceso para obtener fracciones del producto deseado ya sea sólido, líquido o gaseoso.

Como anteriormente se menciona en el numeral 6.1.2, la pirólisis se puede realizar con diferentes parámetros de operación ya sea de forma rápida, lento flash; para lo cual como se evidencia en la Tabla 5 se tienen en cuenta diversos rangos para las condiciones de operación.

Tabla 5*Parámetros de operación de los procesos de pirólisis*

| PROCESO | TIEMPO DE RESIDENCIA | VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO | TEMPERATURA (°C) | PRODUCTOS |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| <i>Pirólisis Lenta</i> | <i>5-60 minutos</i> | <i>Lenta</i> | <i>450-500</i> | <i>Gas, líquido biocarbón</i> |
| <i>Pirólisis Rápida</i> | <i>0.5-5 segundos</i> | <i>Rápida</i> | <i>650</i> | <i>Bioaceites</i> |
| <i>Pirólisis Flash</i> | <i>< 1 segundo</i> | <i>Muy rápida</i> | <i>< 650</i> | <i>Bioaceites y gas</i> |

Nota. La tabla muestra las condiciones de los distintos tipos de pirólisis en donde se tienen cuenta el tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento, la temperatura de reacción y los productos a obtener. Tomado de A. C. Martínez Villalba y L. D. Bohórquez León. Evaluación de la eficiencia de biochar producido a partir de pirólisis lenta de bagazo de caña como medio filtrante para retención de fenoles en matriz acuosa, monografía. Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, 2017.

Como se puede evidenciar en la Tabla 5 para llevar a cabo el proceso de pirólisis se pueden usar 3 diversos métodos en los cuales se tienen en cuenta el tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento, la temperatura y los productos que se llegan a obtener de estos; así pudiéndose determinar según la necesidad a cumplir cuál de ellas va a ser la más efectiva

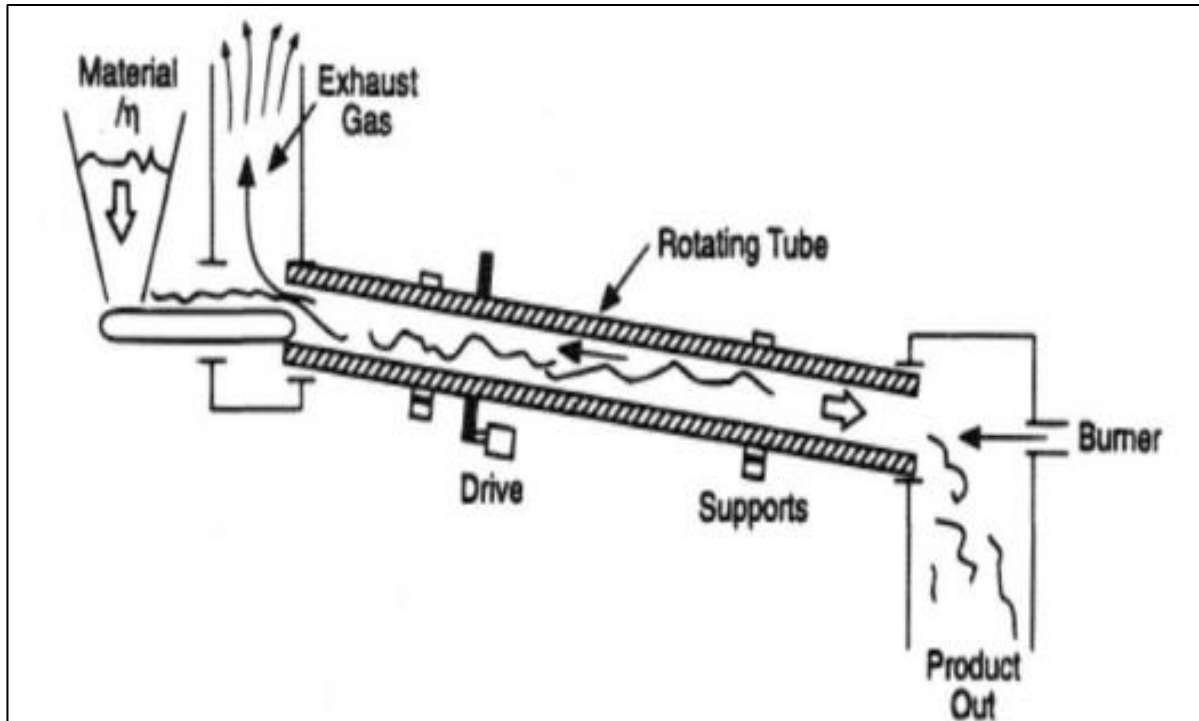
5.2.2. Tipos de Reactores

Como se ha venido mencionando en el documento la pirólisis es un proceso en el cual se tienen en cuenta tanto la temperatura como la presión para su funcionamiento, razón por la cual se debe evaluar de igual forma el tipo de reactor a utilizar dependiendo el tipo de producto que se quiere llegara obtener

5.2.2.a. Reactores para la pirólisis lenta. Para llevar a cabo este tipo de pirólisis se usa un horno rotatorio como se evidencia en la Figura 13, el cual es en acero y presenta una forma cilíndrica con el fin de ir girando de manera uniforme para que los residuos depositados sean mezclados de forma uniforme y se dé un intercambio de calor con mayor eficiencia. Maneja una inclinación entre 1 y 10 grados para favorecer el avance de los residuos (Castells X,2012).

Figura 13.

Esquema Horno Rotatorio



Nota. Horno rotatorio empleado principalmente en el proceso de pirólisis lenta. Tomado de: M. Cortázar Dueñas, Estudio comparativo de tecnologías comerciales de valorización de residuos sólidos urbanos, tesis pre. Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, España, 2014.

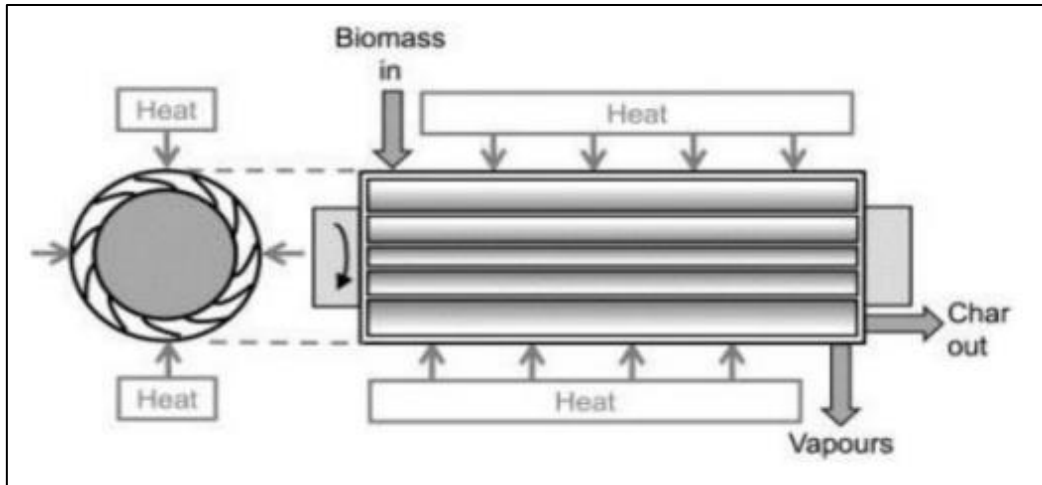
Para tener en cuenta estos reactores presentan una configuración del sistema de combustión del horno para las cuales se debe tener en cuenta las características del proceso, tales como la biomasa o los requerimientos específicos.

5.2.2.2. Reactores para la pirólisis rápida y flash

Uno de los reactores implementados para este tipo pirólisis es el reactor ablativo como se evidencia en la Figura 14, en el cual el aporte de calor a las partículas de biomasa se va a dar por medio del contacto con una pared caliente, en este la velocidad se encuentra limitada por la transmisión de calor en la parte interior de la partícula de biomasa; este tipo de reactor reduce los costos del proceso al reducir las necesidades de un agente fluidizante.

Figura 14.

Esquema Horno Ablativo.



Nota. Horno Ablativo empleado principalmente en el proceso de pirolisis rápida. Tomado de: M. Cortázar Dueñas, Estudio comparativo de tecnologías comerciales de valorización de residuos sólidos urbanos, tesis pre. Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, España, 2014.

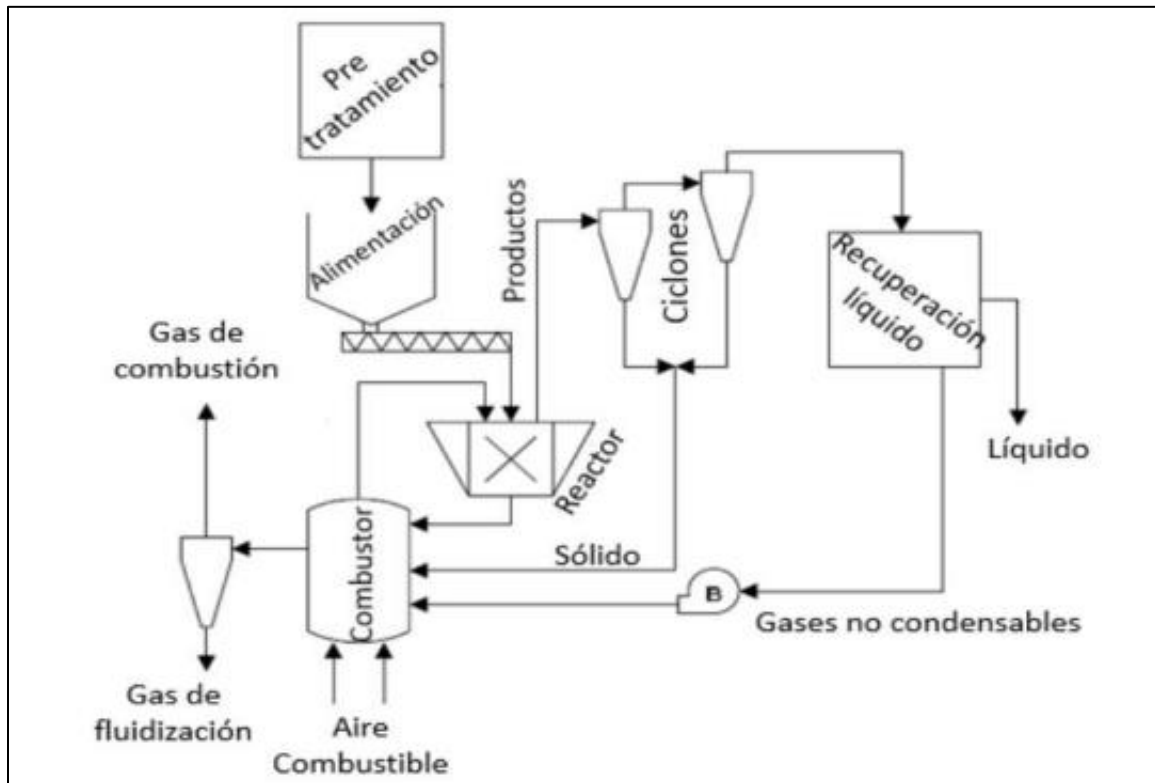
También se entiende como un reactor que utiliza la fuerza centrífuga para lograr altas velocidades de impacto de las partículas de los desechos orgánicos, que se descomponen con las paredes de este; “gracias a estos altos impactos entre las partículas y las paredes se da una alta transferencia de energía calórica de las paredes a la materia prima, permitiendo así tiempos de residencia del gas bajos y un 80% de producto líquido” (Castells X,2012).

Otro de los reactores que se podría usar es el reactor de lecho burbujeante, el cual es un equipo con un extenso uso industrial debido a sus características, las cuales le permiten una transferencia de calor eficiente a través del control de temperatura. Por otra parte, el tiempo de residencia del vapor y del sólido está controlado por el agente de fluidización (Cortázar, 2014), el cual en ocasiones se utiliza como gas de recirculación del sistema; siendo así que el tiempo de residencia del char es generalmente mayor que el de los vapores. En este tipo de reactores, el producto principal suele ser el bioaceite, el cual se obtiene con una mejor calidad al utilizar reactores con lechos de arena; Es necesario destacar que este tipo de reactor “se comporta como un líquido efervescente de baja viscosidad.

También se tiene el reactor como rotatorio como se evidencia en la Figura 15, en el que las partículas, en este caso, de residuos sólidos, son alimentadas al fondo de un cono junto con un exceso de partículas calientes de arrastre.

Figura 15

Esquema Reactor como rotatorio.



Nota. Horno como rotativo empleado principalmente en el proceso de pirólisis rápida. Tomado de: M. Cortázar Dueñas, Estudio comparativo de tecnologías comerciales de valorización de residuos sólidos urbanos, tesis pre. Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, España, 2014.

El mecanismo de este reactor se logra debido a la fuerza centrífuga que obliga a las partículas a apoyarse contra la pared caliente del reactor, obteniendo así una mayor velocidad de calentamiento, un menor tiempo de residencia y un rendimiento de líquido aproximadamente del 60% al 70%. Una de las principales ventajas que presenta este reactor es tal vez que no hay necesidad de arrastrar fluido y el movimiento de partículas se utiliza para mejorar la transferencia de calor a ellas. Por otro lado, algunas desventajas son la dificultad de escalar y operar, e incluso involucra problemas de combustión (Acosta D, 2021).

Otro de los reactores usados en este tipo de técnica es el reactor de tornillo sin fin, el cual presenta una ventaja la que radica en el control del tiempo de residencia debido a la velocidad del giro del tornillo, esto quiere decir, que se puede otorgar una mayor orientación a los rendimientos de los productos deseados. Así mismo, este reactor se considera una alternativa importante en cuanto a un punto de vista industrial puesto que permite una operación del proceso continuo sin mostrar problemas de escalamiento.

5.2.3. Productos obtenidos

La pirólisis es un proceso termoquímico que permite obtener varios productos con diversas aplicaciones, entre las cuales se destacan la producción de energía, ya sea como energía mecánica o energía térmica.

5.2.3.a. Productos sólidos. El producto sólido de la pirólisis, también conocido como biocarbón, carbón vegetal o biochar, está compuesto principalmente por carbón, sales, metales y cenizas y es el material carbonoso el cual logra reordenarse y establecerse como sólido luego de sufrir varias reacciones termoquímicas.

A partir de este producto de la pirólisis se pueden obtener otros subproductos como el carbón activo, además de que puede ser utilizado como biocombustible y como materia prima para la elaboración de diferentes compuestos químicos. “El char puede utilizarse para la producción de compuestos químicos, producción de hidrógeno, producción de gas de síntesis mediante un reformado con vapor o para la obtención carbón activo que se puede usar como adsorbente comercial (Acosta D, 2021).

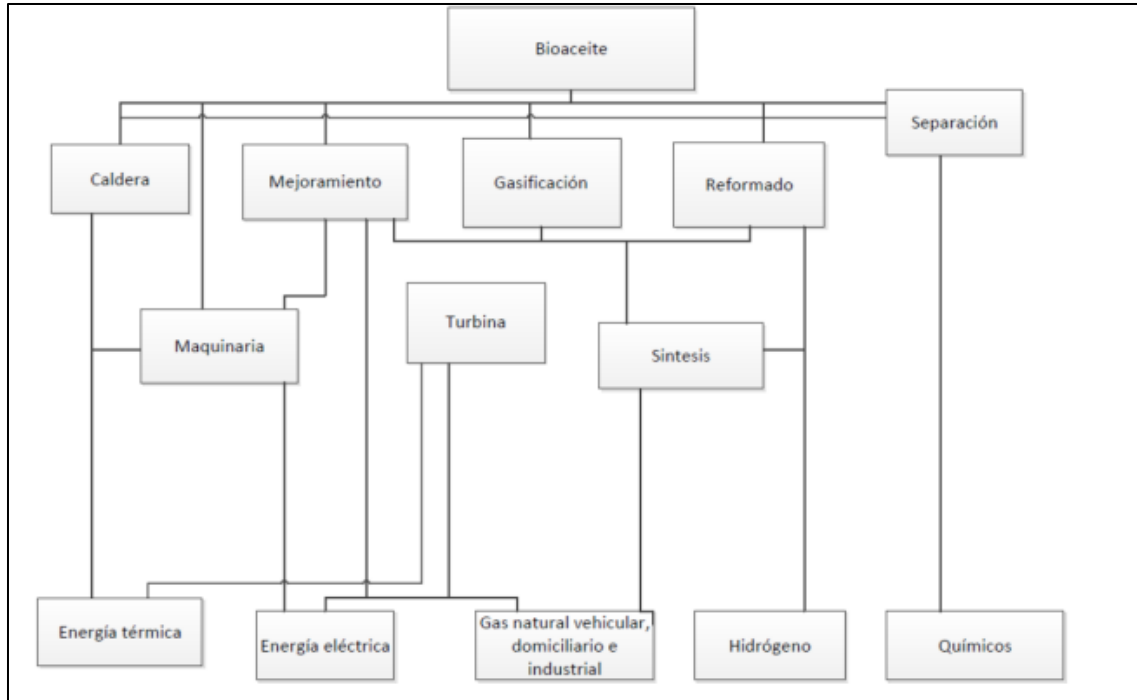
5.2.3.b. Productos líquidos. El producto líquido de la pirólisis, también llamado bioaceite, líquido pirolítico o aceite biocombustible, se obtiene como consecuencia de la condensación de los gases condensables y es una mezcla que contiene agua, una alta cantidad de oxígeno y variedad de moléculas de elevado peso molecular (Consejo nacional de política y economía,2016).

El uso más común del bioaceite es combinarlo con combustibles fósiles para usarlo como combustible de transporte, sin embargo, se hace necesario mejorar sus características fisicoquímicas. Para ello se recurre a la catálisis, bien mediante hidrogenación o mediante el uso

de zeolitas (Acosta D, 2021), Sin embargo, este tiene diversas aplicaciones que se evidencian en la Figura 16.

Figura 16.

Usos del Bioaceite.



Nota. La figura representa los diversos usos que pueden obtenerse a partir del bioaceite. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8645/1/6162924-2021-2-IQ.p>

5.2.3.c. Productos gaseosos. El producto gaseoso del proceso de pirólisis hace referencia a los gases incondensables del proceso, los cuales están conformados por Hidrógeno, Nitrógeno, Metano, Etano, Hidrocarburos desde C4 hasta C7, Amoníaco, Oxígeno, Monóxido y dióxido de carbono, entre otros. Por otra parte, los posibles usos que puede tener este gas son similares al gas producido en el proceso de gasificación, tales como la producción de electricidad, para la elaboración de diferentes compuestos químicos y para la producción de calor (Acosta D, 2021).

5.2.4. Impacto social y ambiental

- Al implementar un buen manejo de residuos sólidos como materia prima para diversos procesos como la producción de biocombustibles más amigables con el medio ambiente, y las

crecientes políticas implementadas para su aprovechamiento, manejo y cuidado, otorgan beneficios significativos en la conservación de recursos naturales como agua, suelos, aire, entre otros.

- La correcta disposición de los residuos sólidos permite recuperar áreas de escaso valor, las cuales pueden ser transformadas en áreas de recreación, además de que aumenta la posibilidad de obtener beneficios energéticos a partir de los Residuos sólidos urbanos depositados en los vertederos de forma inadecuada.
- Al crear una conciencia ambiental en la población, los métodos de manejo de Residuos Sólidos pueden ser más efectivos, aumentando el aprovechamiento que estos pueden tener; Las ventajas potenciales de los procesos de pirólisis pueden incluir la recuperación del valor material de la fracción orgánica como el metanol, que se dé una mayor generación eléctrica usando motores o turbinas de gas, se crean menores volúmenes de gas de combustión y se produce carboncillo o coque que puede ser usado como combustible para plantas eléctricas o cementeras (Eschborn,2017).
- De estudios realizados se concluye que el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos es una alternativa viable tanto técnica, como social y ambientalmente, debido a que es posible procesar 1.136,93 toneladas de residuos sólidos orgánicos al mes, disminuyendo el impacto ambiental producido por los mismos y mitigando los problemas sociales que se generan en los alrededores de los vertederos tradicionales (Acosta D, 2021),

6.CONCLUSIONES

A través de la revisión bibliográfica se lograron identificar cuatro técnicas principales para el aprovechamiento de residuos como fuente de energía, como lo son la incineración, digestión anaeróbica, gasificación y pirólisis; de lo cual se pudo inferir que los más eficientes y conveniente son los tratamientos termoquímicos ya que generan un menor impacto a nivel ambiental y proporcionan una mayor cantidad de energía renovable a partir de ellos.

Las tecnologías de valorización son básicamente un método de tratamiento de residuos sólidos para recuperar energía de sus componentes, tecnologías que, pueden reducir de manera significativa el volumen de los materiales dispuestos en los diversos rellenos sanitarios. Teniendo en cuenta el tipo de tratamiento, se va a lograr gracias a la combustión de los elementos que son ricos en carbono e hidrogeno que se encuentran presentes en los residuos, que al reaccionar con el oxígeno van a dar como resultado principalmente energía y subproductos, pero también de evidencia que a través de la degradación biológica de los mismos se puede llegar al objetivo propuesto. Aunque cabe resaltar resalta que la eficiencia de la conversión energética depende en gran medida de la composición de los insumos utilizados y del tipo específico de tecnología empleada.

Uno de los métodos más efectivos para la valorización energética de los residuos es el proceso de Pirolisis, ya que este cuenta con diferentes etapas que van desde un acondicionamiento de la materia prima, luego un proceso de reacción de pirolisis para así finalizar con la separación y purificación de los productos. Cuenta con un alto potencial para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos ya que permite la obtención de diversos productos dependiendo las condiciones de operación; a diferencia de la gasificación que solo genera biocombustible a través de su conversión. Esta presenta el mayor rendimiento en obtención de energía a partir de los residuos sólidos siendo de 40 al 45%. también cabe resaltar que la pirolisis genera un impacto ambiental mucho menor que las demás tecnologías, teniendo en cuenta que la incineración presenta efectos nocivos para la salud humana al igual que la gasificación.

Finalmente, como se sabe el desarrollo sostenible y la economía circular son estrategias que están comprometidas con el ambiente, la implementación de estas resulta ser indispensable en la sociedad. Este pensamiento estratégico promueve la reutilización y el aprovechamiento adecuado de los recursos y su objetivo se basa en la reducción de residuos que son generados por

los ciudadanos. Por ende, podría decirse que estas tecnologías son un pilar fundamental si se busca una relación más armónica y equilibrada entre la sociedad y la naturaleza, puesto que por medio de su implementación se logran disminuir los impactos ocasionados al medio ambiente provenientes de los residuos sólidos y de igual manera las enfermedades que son causadas por los mismo.

BIBLIOGRAFIA

- Ambientum. (2019). Residuos agrícolas y forestales. https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/residuos_agricolas_y_forestales.asp
- Agencia Presidencial de Cooperación Internacional de Colombia. (2015). *Manual De Gestión De Los Residuos O Desechos Peligrosos*. 57 1, 1–28. https://www.apccolombia.gov.co/sites/default/files/archivos_usuario/2016/a-ot-013manualgestionresiduosdesechospeligrososv3.pdf
- André, F. J., & Cerdá, E. (2015). *Gestión de residuos sólidos urbanos : análisis económico y políticas públicas*. January 2006.
- Apaydin, O., & Gonullu, M. T. (2008). Emission control with route optimization in solid waste collection process: A case study. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 33(2), 71–82. <https://doi.org/10.1007/s12046-008-0007-4>
- Arte, E. D. E. L. (2014). Los rellenos sanitarios a nivel mundial. 21–43.
- Bastidas, I. (2019). Caracterización comparativa del proceso de dos biomásas, tesis pre. Facultad de ingeniería química, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Cabrera Daniela, I., & Lorena, a. (2014). evaluación de la larva de mosca soldado negra (*hermetia illucens*) como alternativa para la degradación de residuos sólidos urbanos. paper knowledge . toward a media history of documents.
- X. E. Castells, Tratamiento y valorización energética de residuos. 1ra Ed. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2012.
- Campuzano, F., Diosa, F. C., Echeverry, C. A., Betancur Vélez, M., Daniel, J., & Ángel, M. (2017). An energetic analysis of different power generation alternatives. 180, 1–21. www.revistavirtualpro.com
- Castañeda Torres, S., & Rodriguez Miranda, J. P. (2017). Modelo de aprovechamiento sustentable de residuos sólidos orgánicos en Cundinamarca, Colombia. *Universidad y Salud*, 19(1), 116. <https://doi.org/10.22267/rus.171901.75>
- Castells, X. E. (2005) Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos
- Castillo Meza, L. E., & Luzardo Briceño, M. (2013). Evaluación del manejo de residuos sólidos en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. *Revista Facultad De*

- Ingeniería, 22(34), 71. <https://doi.org/10.19053/01211129.2220>
- Castro Granado, A. J. (2018). Estudio bibliográfico del estado del arte de la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos y mejora del proceso mediante pretratamientos. Universidad de Cádiz, 34.
- Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. Cuadernos Económicos de ICE, 83. <https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6036>
- Chand Malav, L., Yadav, K. K., Gupta, N., Kumar, S., Sharma, G. K., Krishnan, S., Rezaia, S., Kamyab, H., Pham, Q. B., Yadav, S., Bhattacharyya, S., Yadav, V. K., & Bach, Q. V. (2020). A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123227>
- Cheng, H., & Hu, Y. (2010). Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. *Bioresource Technology*, 101(11), 3816–3824. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.040>
- Consonni, S., Giugliano, M., & Grosso, M. (2005). Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste: Part A: Mass and energy balances. *Waste Management*, 25(2 SPEC. ISS.), 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.09.007>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2016) “Documento CONPES 3874”, <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf> [Accedido: Abril, 2022]
- M. Cortázar, Estudio comparativo de tecnologías comerciales de valorización de residuos sólidos urbanos, tesis pre. Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, España, 2014.
- Dylan Trotsek. (2017). Análisis y propuesta de aplicabilidad de métodos y técnicas de aprovechamiento, recuperación y eliminación de residuos sólidos urbanos en tabacundo, cantón Pedro Moncayo. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 110(9), 1689–1699.
- ECOLEC (2022). Residuos industriales. <https://ecolec.es/informacion-y-recursos/tipos-de-residuos/industriales/>
- El potencial energético de los residuos sólidos municipales. (2009). *El Potencial Energético de Los Residuos Sólidos Municipales*, 13(1), 59–62.
- Escobar, J., Mambeli, R., Martínez, A. M., Melo, A., Rúa-Orozco, D., & Silva, E. (2015).

- Generación de energía a partir de los residuos sólidos urbanos. *Bioenergía: Fuentes, Conversión y Sustentabilidad.*, January 2017, 275–296.
- Fei, F., Wen, Z., Huang, S., & De Clercq, D. (2018). Mechanical biological treatment of municipal solid waste: Energy efficiency, environmental impact and economic feasibility analysis. *Journal of Cleaner Production*, 178, 731–739. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.060>
- Fernández-González, J. M., Grindlay, A. L., Serrano-Bernardo, F., Rodríguez-Rojas, M. I., & Zamorano, M. (2017). Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities. *Waste Management*, 67, 360–374. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.003>
- Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., & Moberg, Å. (2005). Life cycle assessment of energy from solid waste - Part 1: General methodology and results. *Journal of Cleaner Production*, 13(3), 213–229. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.023>
- Grahn, B., & Lovtrup-Rein, H. (1971). The Effect of Cordycepin on Nuclear RNA Synthesis in Nerve and Glial Cells. In *Acta Physiologica Scandinavica* (Vol. 82, Issue 1). <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1971.tb04939.x>
- Hamad, T. A., Agll, A. A., Hamad, Y. M., & Sheffield, J. W. (2014). Solid waste as renewable source of energy: Current and future possibility in Libya. *Case Studies in Thermal Engineering*, 4, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.09.004>
- Hameed, Z., Aslam, M., Khan, Z., Maqsood, K., Atabani, A. E., Ghauri, M., Khurram, M. S., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2021). Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136(October 2020), 110375. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110375>
- INERCO Consultoría Colombia. (2018). Valorización Energética De Residuos: Proyecto WTE Colombia. 44–45. [https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1339/5/Productos 1%2C2 y 3_V2.pdf](https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1339/5/Productos%201%20y%203_V2.pdf)
- Ionescu, G., Rada, E. C., Ragazzi, M., Mărculescu, C., Badea, A., & Apostol, T. (2013). Integrated municipal solid waste scenario model using advanced pretreatment and waste to energy processes. *Energy Conversion and Management*, 76, 1083–1092. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.049>

- Korai, M. S., Mahar, R. B., & Uqaili, M. A. (2017). The feasibility of municipal solid waste for energy generation and its existing management practices in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72(January), 338–353.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.051>
- K. M. Noguera-Oviedo, J. Olivero-Verbel.(2021). Los rellenos sanitarios en latinoamérica: Caso colombiano,” *Rev- Investig, Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, vol 34, no 132, pp. 347-356, Sep., 2010. https://www.researchgate.net/publication/301799194_Los_rellenos_sanitarios_en_latinoamerica_Caso_colombiano [Accedido: Enero 05, 2021]
- Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407–422.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Lopez,B.(2010). Evaluacion de los impactos ambientales generados por la gasificacion y la incineracion como tratamientos de gestion de residuos solidos para la ciudad de Mexico.
<https://repositorio.tec.mx/handle/11285/569994>
- Malinauskaite, J., Jouhara, H., Czajczyńska, D., Stanchev, P., Katsou, E., Rostkowski, P., Thorne, R. J., Colón, J., Ponsá, S., Al-Mansour, F., Anguilano, L., Krzyżyńska, R., López, I. C., A.Vlasopoulos, & Spencer, N. (2017). Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy*, 141, 2013–2044. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128>
- Martínez, J. A., Montoya, N., & Sierra, M. (2014). Energía del futuro: bioalcoholes a partir de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). *Revista EAN*, 77, 64.
<https://doi.org/10.21158/01208160.n77.2014.816>
- Minivivienda. (2021). La primera planta de valorización energética de residuos sólidos de Colombia se estrena en San Andrés. <https://minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/la-primera-planta-de-valorizacion-energetica-de-residuos-solidos-de-colombia-se-estrena-en-san-andres#:~:text=Esta%20novedosa%20tecnolog%C3%ADa%20pone%20a,econom%C3%A9a%20circular%20en%20toda%20Colombia.&text=Esta%20planta%20hace%20la%20separaci%C3%B3n,de%20la%20Rep%C3%BAblica%2C%20Iv%C3%A1n%20Duque.>
- M, Klug. (2021). “Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa,” *Rev de Química PUCP*, vol 26, no 1-2, pp. 37-40, 2012.
<http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547/5543>

- Montiel-Bohórquez, N. D., & Pérez, J. F. (2019). Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas para Optimizar el Desempeño de Centrales Térmicas. *Información Tecnológica*, 30(1), 273–284. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000100273>
- Moratorio, D., Rocco, I., & Castelli, M. (2012). Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía Converting Municipal Solid Waste into energy. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, 10, 115–126.
- Morris, M., & Waldheim, L. (1998). Energy recovery from solid waste fuels using advanced gasification technology. *Waste Management*, 18(6–8), 557–564. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(98\)00146-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(98)00146-9)
- Moya, D., Aldás, C., López, G., & Kaparaju, P. (2017). Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: A worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies. *Energy Procedia*, 134, 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.618>
- Münster, M., & Meibom, P. (2011). Optimization of use of waste in the future energy system. *Energy*, 36(3), 1612–1622. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.070>
- Murphy, J. D., & McKeogh, E. (2004). Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste. *Renewable Energy*, 29(7), 1043–1057. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.12.002>
- Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C., & Gross, T. (2017). Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos. Guía para los Responsables de la Toma de Decisiones en Países en vías de Desarrollo y Emergentes. Giz, 60. <https://www.4echile.cl/4echile/wp-content/uploads/2018/02/Guia-GIZ-2017-WasteToEnergy-SP.pdf>
- Nanda, S., & Berruti, F. (2021). A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste. *Journal of Hazardous Materials*, 403(August 2020), 123970. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123970>
- Nixon, J. D., Dey, P. K., Ghosh, S. K., & Davies, P. A. (2013). Evaluation of options for energy recovery from municipal solid waste in India using the hierarchical analytical network process. *Energy*, 59, 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.052>

- oecd/eclac. “Environmental Performance Reviews: Colombia 2014”.
<http://www.oecd.org/env/country-reviews/colombiano2014.htm>
- Oyuky, M., López, N., Limón, N. V., & Benítez, S. O. (2011). Tecnologías para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos del sector residencial y su aprovechamiento como fuente de energía. 535–542.
- Pacheco, C., Fuentes, L., Sanchez, E., Rondon, H. (2016). Construction demolition waste (CDW), a perspective of achievement for the city of Barranquilla since its management model. <https://www.redalyc.org/journal/852/85252030015/html/>
- Pandey, B. K., Vyas, S., Pandey, M., & Gaur, A. (2016). Municipal solid waste to energy conversion methodology as physical, thermal, and biological methods. *International Scientific Organization*, 2(2), 39–44.
- Paritosh, K., Kushwaha, S. K., Yadav, M., Pareek, N., Chawade, A., & Vivekanand, V. (2017). Food Waste to Energy: An Overview of Sustainable Approaches for Food Waste Management and Nutrient Recycling. *BioMed Research International*, 2017.
<https://doi.org/10.1155/2017/2370927>
- Poletto, J. A., & Da Silva, C. L. (2009). Influencia de la separación de residuos sólidos urbanos para reciclaje en el proceso de incineración con generación de energía. *Informacion Tecnologica*, 20(2), 105–112. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4062it.08>
- QAEC (2021). Impulsamos una calidad abierta, transformadora y líder. Residuos domesticos. <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/residuos-domesticos>
- Rada, E. C. (2014). Energy from municipal solid waste. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 190 VOLUME, 945–958. <https://doi.org/10.2495/EQ140892>
- Ramos, A., & Rouboa, A. (2020). Renewable energy from solid waste: life cycle analysis and social welfare. *Environmental Impact Assessment Review*, 85(September), 106469. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106469>
- Rank Scimago Journal & Country. (2020). Scimago Journal & Country Rank. <https://www.scimagojr.com/journalrank.php?category=2312>
- Restrepo Klinge, S. (2019). No Title. *EAENH. Αναη*, 8(5), 55.
- Rodríguez Perdígón, L. A. (2014). Technical feasibility of biogas production from organic fraction of municipal solid waste - FORSU. <http://repository.ean.edu.co/handle/10882/1560>
- Romero Salvador, A. (2010). Aprovechamiento De La Biomasa Como Fuente De Energía

- Alternativa a Los Combustibles Fósiles. *Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, 104(2), 331–345.
<http://www.rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- Romero, A. (2001). Incineración de residuos sólidos urbanos. Instituto de Catálisis y Petroquímica, *Monografías*, 327–331.
http://www.bizkaia21.eus/fitxategiak/09/bizkaia21/Territorio_Sostenible/dokumentuak/20100902171833440_C2-327.pdf?hash=56474cdad621171e19f5cee6055f9399
- Ryu, C. (2010). Potential of municipal solid waste for renewable energy production and reduction of greenhouse gas emissions in South Korea. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 60(2), 176–183. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.2.176>
- Santos, J. (2021). Gestion de residuos plasticos domiciliareios en Bogota desde la teoria de sistemas complejos. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8400>
- Serna, S. (2021). Presidente de Colombia entrego una planta de residuos solidos urbanos en San Andres Isla. Recueprado de <https://www.aa.com.tr/es/mundo/presidente-de-colombia-entreg%C3%B3-una-planta-de-residuos-s%C3%B3lidos-urbanos-en-san-andr%C3%A9s-isla/2144719>
- Singh, G. K., Gupta, K., & Chaudhary, S. (2014). Solid Waste Management: Its Sources, Collection, Transportation and Recycling. *International Journal of Environmental Science and Development*, 5(4), 347–351. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2014.v5.507>
- Singh, R. P., Tyagi, V. V., Allen, T., Ibrahim, M. H., & Kothari, R. (2011). An overview for exploring the possibilities of energy generation from municipal solid waste (MSW) in Indian scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4797–4808. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.071>
- Scimago Journal & Country Rank. (2020). Scimago Journal & Country Rank. Obtenido de <https://www.scimagojr.com/countryrank.php?category=2312>
- SCOPUS. (2020). SCOPUS. Obtenido de <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2080/term/analyzer.uri?sid=19da361d6498fe37c2ce90b1eef90914&origin=resultslist&src=s&s=TITLEABS-KEY%28%22wastewater+treatment%22+AND+%22nanotechnology%22%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=58&count=787&analyzeResults=Analyze+res>
- Soto, S. (2020). Solo el 17% de los residuos solidos de Colombia son reciclados, advirtio el DNP. <https://www.agronegocios.co/clima/solo-el-17-de-los-residuos-solidos-de-colombia-son->

recicladados-advirtio-el-dnp-2970019

- Soliva, M. (2011). Valorización y reciclaje material. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Tratamientos-biologicos-biometanizacion.aspx>
- Stella, L., & Vanessa, I. (2015). Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. *Energética*, 0(46), 23–28.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (Diciembre, 2019). “Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2018”. <https://cutt.ly/0nvsolz>
- Superservicios. (2019). “Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo”, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019. <https://cutt.ly/8nvsy2M>
- Tan, S. T., Hashim, H., Lim, J. S., Ho, W. S., Lee, C. T., & Yan, J. (2014). Energy and emissions benefits of renewable energy derived from municipal solid waste: Analysis of a low carbon scenario in Malaysia. *Applied Energy*, 136, 797–804. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.003>
- Tan, S. T., Ho, W. S., Hashim, H., Lee, C. T., Taib, M. R., & Ho, C. S. (2015). Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. *Energy Conversion and Management*, 102, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.010>
- Tozlu, A., Özahi, E., & Abuşoğlu, A. (2016). Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 809–815. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.097>
- Tsai, W. T., & Chou, Y. H. (2006). An overview of renewable energy utilization from municipal solid waste (MSW) incineration in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(5), 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.006>
- Unnikrishnan, S., & Singh, A. (2010). Energy recovery in solid waste management through CDM in India and other countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(10), 630–640. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.003>
- Valverde, X. (2021). Efectos de los desechos sólidos . <https://sites.google.com/site/manejodedesechossolidosenbp/about-us>
- Wang, Z., Ren, J., Goodsite, M. E., & Xu, G. (2018). Waste-to-energy, municipal solid waste

treatment, and best available technology: Comprehensive evaluation by an interval-valued fuzzy multi-criteria decision making method. *Journal of Cleaner Production*, 172, 887–899.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.184>

Zhou, H., Long, Y., Meng, A., Li, Q., & Zhang, Y. (2015). Classification of municipal solid waste components for thermal conversion in waste-to-energy research. *Fuel*, 145, 151–157.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.015>