

**DISEÑO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**DANIELA ACOSTA RUBIO
LIZBETH GISSELA CASTRO CAMACHO**

**Proyecto Integral de Grado para Optar al Título de
INGENIERO QUÍMICO**

Orientador

Ing. Claudio Alberto Moreno Arias

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma Docente Investigador

Firma Docente Jurado 1

Firma Docente Jurado 2

Bogotá D.C., Julio 2021.

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingeniería

Dr. Julio César Fuentes Arismendi

Director del Departamento de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

DEDICATORIA

A mis padres por siempre apoyarme, motivarme, creer incondicionalmente en mí, aconsejarme y guiarme en la vida. A ellos, debo todos mis logros. A mí prima que me impulso a alcanzar mis metas. A mí novio, que estuvo en todo momento acompañándome y alentándome a seguir. A mi compañera de tesis, por acompañarme y apoyarme no solo en este trabajo sino en los 5 años de aprendizaje, por su infinito esfuerzo, gracias. A mis compañeros y amigos presentes en este camino, quienes compartieron de su conocimiento para poder crecer mutuamente. Por la paciencia y amor que entregaron, dedico esta tesis a todos ellos.

A Dios, por permitirme culminar esta etapa de mi vida y siempre brindarme la sabiduría y fortaleza necesarias para no rendirme. A mi compañera de tesis y amiga, por su paciencia, su esfuerzo y su grata compañía a lo largo de la carrera. En especial, a mis padres por motivarme e inspirarme constantemente a alcanzar mis metas, por forjarme como la persona que soy hoy en día y por darme todo su cariño y su apoyo en cada cosa que hago, a ellos les debo todo. Dedico esta tesis a todas aquellas personas que me han acompañado y apoyado a lo largo de la vida.

Gracias.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Universidad de América, donde se llevaron a cabo las labores teóricas del presente proyecto.

Al Ingeniero Iván Ramírez Marín, director del departamento de Ingeniería Química.

Al Ingeniero Claudio Alberto Moreno Arias, director del proyecto, quien nos brindó su colaboración para el desarrollo de las actividades teóricas de este trabajo.

Al Ingeniero y Docente Francisco Andrés Triana Bodensiek, asesor del proyecto, quien nos brindó su colaboración a lo largo del desarrollo de este trabajo.

A todos, mil gracias.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	16
1. ESTADO DEL ARTE SOBRE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN COLOMBIA	17
1.1. Los residuos sólidos urbanos y su clasificación	17
1.1.1. <i>Definición de residuo sólido urbano</i>	17
1.1.2. <i>Clasificación de los residuos sólidos urbanos</i>	17
1.2. Residuos sólidos urbanos orgánicos	22
1.2.1. <i>Clasificación de los residuos sólidos urbanos orgánicos</i>	22
1.2.2. <i>Composición de los residuos sólidos urbanos orgánicos</i>	25
1.3. Manejo de residuos sólidos urbanos en Colombia	27
1.3.1. <i>Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos</i>	28
1.3.2. <i>Principales rellenos sanitarios en Colombia</i>	29
1.3.3. <i>Reciclaje de los residuos sólidos urbanos</i>	34
1.4. Aprovechamiento de residuos sólidos urbanos	36
1.4.1. <i>Compostaje</i>	36
1.4.2. <i>Biocombustibles</i>	37
1.4.3. <i>Biofertilizantes</i>	39
1.5. Técnicas térmicas de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos	40
1.5.1. <i>Incineración</i>	40
1.5.2. <i>Gasificación</i>	40
1.5.3. <i>Pirólisis</i>	41

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES APROVECHABLES EN LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	45
2.1. Disponibilidad de residuos orgánicos en Colombia	47
2.2. Estudio de caso: Madrid, Cundinamarca	50
2.3. Selección del método térmico de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos	52
2.4. Componentes aprovechables	57
2.4.1. <i>Pirólisis de la Celulosa</i>	58
2.4.2. <i>Pirólisis de la Lignina</i>	60
2.4.3. <i>Pirólisis de la Hemicelulosa</i>	60
3. PARÁMETROS DE LA PIRÓLISIS PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS	62
3.1. Variables que afectan el proceso de pirólisis	62
3.2. Parámetros de operación para el proceso de pirólisis	64
3.3. Rendimiento	65
3.4. Reactores pirolíticos	66
3.4.1. <i>Reactores para pirólisis lenta</i>	67
3.4.2. <i>Reactores para pirólisis rápida y flash</i>	68
3.4.3. <i>Otros reactores pirolíticos</i>	73
4. DISEÑO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE RSU	75
4.1. Etapas del proceso de pirólisis	76
4.1.1. <i>Operaciones Unitarias</i>	77
4.1.2. Procesos Unitarios	81
4.2. Variables que afectan el proceso de pirólisis rápida	84
4.2.1. <i>Temperatura</i>	84

4.2.2. <i>Velocidad de calentamiento</i>	85
4.2.3. <i>Tamaño de partícula</i>	85
4.2.4. <i>Tiempo de residencia</i>	85
4.3. Condiciones de operación	85
4.4. Balance de materia	86
4.4.1. <i>Balance de materia en el secador</i>	87
4.4.2. <i>Balance de materia en el reactor pirólítico</i>	89
4.5. Balance de energía	91
4.5.1. <i>Balance de energía en el reactor</i>	92
4.5.2. <i>Balance de energía en el condensador</i>	94
4.6. Diagrama de proceso PFD	95
4.6.1. <i>Dimensionamiento del reactor de pirólisis</i>	98
4.7. Descripción de productos	99
4.7.1. <i>Producto sólido</i>	100
4.7.2. <i>Producto líquido</i>	101
4.7.3. <i>Producto gaseoso</i>	103
5. EVALUACIÓN FINANCIERA DEL SISTEMA DE PIRÓLISIS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RSU	104
5.1. Tamaño de la planta	104
5.1.1. <i>Distribución de la planta</i>	105
5.2. Costos de inversión	105
5.3. Costo de insumos	108
5.3.1. <i>Costos de Materia Prima</i>	108
5.3.2. <i>Costos Energéticos</i>	109
5.3.3. <i>Costos Mano de Obra</i>	110
5.3.4. <i>Gastos Administrativos</i>	111

5.4. Ingresos	112
5.5. Indicadores de rentabilidad	113
5.6. Análisis de los beneficios del proyecto	115
6. CONCLUSIONES	118
BIBLIOGRAFÍA	120
ANEXOS	136

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Clasificación de los residuos sólidos orgánicos según su fuente de generación.	23
Figura 2. Clasificación de los residuos sólidos orgánicos según su naturaleza y/o características físicas.	25
Figura 3. Pirólisis de una partícula de biomasa.	41
Figura 4. Histórico consolidado de las toneladas promedio diarias dispuestas 2010-2018 para las ocho ciudades con mayor población del país.	47
Figura 5. Productos de la pirólisis de biomasa.	57
Figura 6. Mecanismo de pirólisis de celulosa propuesto por Shafizadeh.	59
Figura 7. Distribución de los productos de pirólisis.	63
Figura 8. Esquema horno rotatorio.	67
Figura 9. Esquema reactor ablativo.	69
Figura 10. Esquema de proceso con reactor BFB.	70
Figura 11. Esquema reactor de cono rotatorio.	71
Figura 12. Esquema reactor de tornillo sin fin.	72
Figura 13. Diagrama de bloques del proceso.	77
Figura 14. Unidad de secado.	87
Figura 15. Diagrama PFD del aprovechamiento de residuos sólidos urbanos.	96
Figura 16. Aplicaciones de los productos del proceso de pirólisis.	100
Figura 17. Usos del bioaceite.	102

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Clasificación de residuos sólidos.	19
Tabla 2. Aprovechadores de residuos sólidos por departamento.	35
Tabla 3. Tipos de biocombustible.	38
Tabla 4. Composición de los residuos sólidos urbanos.	45
Tabla 5. Exposición del análisis químico de los componentes de los RSU.	46
Tabla 6. Media ponderada de los componentes físicos de los R.S. domiciliarios por estrato socioeconómico y global, Bogotá D.C., 2011.	49
Tabla 7. Generación de residuos en Madrid, Cundinamarca.	51
Tabla 8. Problemas referentes a los RSU en Madrid, Cundinamarca.	52
Tabla 9. Ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos.	54
Tabla 10. Calificación y ponderación de los tratamientos térmicos según los parámetros establecidos.	56
Tabla 11. Parámetros de operación de los procesos de pirólisis.	65
Tabla 12. Comparación de rendimientos de las fracciones obtenidas en función del tipo de pirólisis.	66
Tabla 13. Descripción de parámetros para la selección del reactor de pirólisis.	82
Tabla 14. Calificación de los reactores de acuerdo con los parámetros establecidos.	84
Tabla 15. Calor específico de los componentes en los RSU	91
Tabla 16. Dimensionamiento del reactor de pirólisis.	99
Tabla 17. Costos de inversión para el proceso de pirólisis de RSU	107
Tabla 18. Costos de transporte y recolección de los RSU.	108
Tabla 19. Tarifas de energía eléctrica (\$/kWh).	109
Tabla 20. Costos energéticos mensuales.	110
Tabla 21. Costos mensuales de mano de obra.	111
Tabla 22. Gastos mensuales administrativos.	112
Tabla 23. Ingresos de producción.	113
Tabla 24. Flujos de caja para la producción de biocombustibles a partir de RSU.	114

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza la evaluación para la producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos en Colombia. Para ello, en primer lugar, se reconocen las fuentes de residuos sólidos en el país, además de su clasificación y actual tratamiento. Posteriormente, se procede a identificar los componentes que pueden ser aprovechados y que presentan una transformación a la hora de realizar un proceso térmico de aprovechamiento. Además de esto, se selecciona el método térmico de aprovechamiento a estudiar.

Para el análisis técnico del aprovechamiento de residuos sólidos urbanos y su conversión en biocombustible se establecen los diferentes parámetros de operación y se realiza el análisis de los equipos a utilizar. Posteriormente se determinan las etapas del proceso y se selecciona el tipo de reactor a utilizar, siendo este el equipo principal en el proceso. Finalmente, se desarrolla tanto el balance de materia como el de energía y se sintetiza la información en el diagrama de flujo del proceso PFD.

Por último, se realiza el análisis financiero, estableciendo los costos de inversión, costos de operación, costos de mantenimiento y gastos administrativos del proceso de producción. Consecutivamente se analizan los ingresos, con el fin de determinar los respectivos flujos de caja y los indicadores de viabilidad financiera.

Del presente estudio 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.

Palabras clave: Residuos sólidos urbanos, biomasa lignocelulósica, reactores pirolíticos, biocombustibles, energía sostenible.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la excesiva explotación de los recursos naturales y la industrialización han generado que problemas como el calentamiento global, la progresiva extinción de la biodiversidad, el agujero en la capa de ozono, entre otros, se muestran notoriamente en el agotamiento de los ecosistemas y las diferentes consecuencias que pueden desarrollarse para la humanidad.

Debido al continuo crecimiento en aspectos relacionados con la población, la rápida urbanización y el deseo por mejoras en los estándares de vida comunitaria, la tasa de generación de residuos sólidos urbanos ha aumentado principalmente en los países en desarrollo.

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son definidos por el decreto 2104 de 1983 como todo objeto, sustancia o elemento en estado sólido, que se abandona, bota o rechaza [1]. Según reportes dados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, tan solo en Bogotá se generan entre 6.300 y 6.800 toneladas de residuos diariamente, los cuales son transportados al vertedero Doña Juana [2]. El manejo inadecuado de estos desechos provoca serios problemas ambientales, tales como la contaminación del suelo, del agua y la proliferación de fauna nociva transmisora de enfermedades, entre otros.

De acuerdo con la revista Semana, “Al 7,5 % de los rellenos sanitarios del país ya se les acabó su vida útil y a un 15 % le queda menos de tres años” [3]. La acumulación de residuos urbanos en Colombia, supone uno de los mayores problemas a corto plazo, debido a que al año se producen 11 millones de toneladas de basura aproximadamente. Por otra parte, según un informe de la Superintendencia de Servicios públicos domiciliarios, Colombia cuenta con 275 sitios para depositar la basura, de los cuales 158 son rellenos sanitarios, destacando que “un 28,1% podrá durar entre tres y 10 años, y solo un 35,6% podría permanecer durante más de una década” [3].

Por otra parte, las comunidades aledañas a los rellenos sanitarios, quienes padecen su cercanía a las toneladas de residuos sólidos, se ven enormemente afectadas tanto en sus actividades diarias como en su calidad de vida, debido a los malos olores, la

proliferación de vectores y el incontrolado manejo de lixiviados, generando múltiples enfermedades, plagas y condiciones de vida precarias.

En respuesta a esta situación nace el Desarrollo Sostenible, a través del cual se plantea, además de diversos otros aspectos, la idea de que la correcta gestión y aprovechamiento de los residuos constituye un nuevo yacimiento de empleo y una oportunidad nada desdeñable para el desarrollo económico.

Debido a los factores ya mencionados, en la actualidad, la correcta disposición de los RSU se ve necesaria e imprescindible, por esta razón, el desarrollo de este proyecto plantea una alternativa tanto para el manejo de estos residuos como para su aprovechamiento. La mayoría de estudios que se han realizado sobre residuos orgánicos, tanto en los países industrializados como en Colombia, se han enfocado en la transformación de estos residuos tanto en biogás como en compostaje. De igual forma, se han llevado a cabo investigaciones para el diseño de procesos de conversión de residuos sólidos municipales a alcohol, algunos de los cuales han sido patentados para su implementación a nivel comercial. Aun así, en el país existen pocos estudios acerca del aprovechamiento industrial de los residuos sólidos urbanos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el uso de los desechos sólidos urbanos como materia prima para la producción de biocombustible en Colombia.

Objetivos específicos

1. Identificar la situación actual del manejo de residuos sólidos urbanos.
2. Caracterizar los diferentes componentes aprovechables presentes en los residuos sólidos urbanos del país.
3. Determinar los requerimientos técnicos necesarios para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos.
4. Analizar los costos del sistema de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos planteado.

1. ESTADO DEL ARTE SOBRE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN COLOMBIA

1.1. Los residuos sólidos urbanos y su clasificación

1.1.1. *Definición de residuo sólido urbano*

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son definidos por el decreto 2104 de 1983 como todo objeto, sustancia o elemento en estado sólido, que se abandona, bota o rechaza. [1]

Son conocidos como residuos sólidos urbanos (RSU) aquellos materiales desechados tras su vida útil, y que por lo general por sí solos carecen de valor económico [4]. Se incluyen dentro de los residuos sólidos urbanos todos los que se generan en la actividad doméstica, comercial y de servicios, así como los procedentes de la limpieza de calles, parques y jardines [5]. Todos estos residuos sólidos, en su mayoría son susceptibles de reaprovecharse o transformarse con un correcto reciclado.

1.1.2. *Clasificación de los residuos sólidos urbanos*

Los residuos sólidos se pueden clasificar dependiendo de la terminología que se emplee [4], además, es necesario tener en cuenta no solo los residuos generados en las ciudades, sino también en las zonas rurales, donde se tiene una mayor interacción con el medio ambiente.

Las principales categorías para la clasificación de residuos sólidos son:

1.1.2.a. Según la peligrosidad de los residuos. Esta clasificación depende del nivel que estos desechos produzcan en aspectos como; la toxicidad, reactividad química, riesgo de inflamabilidad, corrosividad, entre otros.

Residuos Inertes: son aquellos residuos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. Estos residuos no son solubles ni combustibles; no son biodegradables, ni afectan a otras materias con las cuales

entran en contacto de forma que pueda dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar la salud humana [4]. Un ejemplo de residuos inertes, son los residuos de construcción.

Residuos Peligrosos: es considerado como residuo peligroso aquel desecho que posee características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas, el cual puede perjudicar o causar daños a la salud humana y al ambiente [6]. Estos residuos deben ser manejados de acuerdo con la normatividad, teniendo como ejemplos la mayoría de los aceites, los disolventes, los envases que han contenido sustancias peligrosas, los celulares, etc. [4]

Residuos No Peligrosos: se pueden definir como residuos no peligrosos aquellos que no son inertes ni peligrosos [4]. Dichos materiales no conllevan ningún riesgo en la salud ni dañan el entorno. Algunos ejemplos de residuos no peligrosos son el plástico, el papel, el cartón y el metal, siempre y cuando no estén contaminados por alguna sustancia peligrosa. [4]

Residuos Especiales: además de los tipos de residuos mencionados anteriormente, también existen ciertos tipos de desechos cuyas características y naturaleza difieren de los demás, siendo clasificados como residuos especiales. Estos son “residuos sólidos que por su calidad, cantidad, magnitud, volumen o peso puede presentar peligros y, por lo tanto, requiere un manejo especial. Incluye a los residuos con plazos de consumo expirados, desechos de establecimientos que utilizan sustancias peligrosas, lodos, residuos voluminosos o pesados que, con autorización o ilícitamente, son manejados conjuntamente con los residuos sólidos municipales”. [7]

Tabla 1.*Clasificación de residuos sólidos*

Tipo de Residuo	Clasificación	Ejemplos	Manejo
Residuo no Peligroso	Aprovechable	Plástico, cartón y papel, vidrio, residuos metálicos, textiles y madera.	Reciclaje Reutilización
	No aprovechable	Papel tissue, papeles encerados, plastificados, metalizados, cerámicas, huesos, colillas de cigarrillo, materiales de empaque y embalaje sucios.	Disposición Final
	Orgánico Biodegradable	Residuos de comida, cortes y podas de materiales vegetales y hojarasca.	Compostaje Lombicultivo
Residuo Peligroso		Pilas, lámparas fluorescentes, aparatos electrónicos y eléctricos, productos químicos, medicamentos vencidos y residuos con riesgo biológico.	Se recomienda informarse acerca de diferentes entidades que se encargan de su gestión.
Residuo Especial		Escombros, llantas usadas, colchones y residuos de gran volumen.	

Nota. Clasificación de los residuos sólidos de acuerdo con su peligrosidad, ejemplos y manejo de los mismos. Tomado de: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Gestión ambiental. Residuos sólidos. Guía para la separación en la Fuente. GTC 24. Bogotá: ICONTEC, 2009, p. 7.

1.1.2.b. Según el origen de los residuos. Un residuo se puede catalogar por su actividad de origen. En este caso, consiste en una clasificación sectorial por actividades llevadas a cabo por los seres humanos. Los tipos de residuos a destacar son:

Residuos Domésticos: de acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, los residuos domésticos son todos aquellos residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas [4]. Algunos ejemplos de residuos domésticos son restos de comida, papeles, envases de plástico, latas, envases de cartón, vidrio, periódicos y revistas, medicinas usadas o caducadas, restos de pintura, ropa usada, aceites vegetales, etc.

Residuos Industriales: este tipo de residuos, son todos aquellos desechos resultantes de los procesos de fabricación y transformación de materias primas, utilización y consumo de productos y actividades de limpieza y mantenimiento generadas en zonas industriales [4]. Los residuos sólidos ordinarios producidos por las actividades industriales y comerciales “conforman una categoría diferenciada en virtud de su especificidad y su mayor poder contaminante, lo que en parte viene determinado porque una porción considerable de ellos es catalogada como tóxica y peligrosa”. [8]

Biorresiduos: son considerados biorresiduos a todos los residuos orgánicos biodegradables de origen vegetal y/o animal, susceptibles de degradarse biológicamente generados en el ámbito domiciliario y comercial [9]. Algunos ejemplos de biorresiduos son los residuos orgánicos de origen alimentario y de cocina, residuos vegetales o fracción vegetal, fracción orgánica y residuos de poda. [9]

Residuos Hospitalarios: son conocidos como residuos hospitalarios a todas aquellas sustancias, materiales, subproductos sólidos, líquidos o gaseosos, que se obtienen como resultado de algún tipo de actividad relacionada con la prestación de servicios de la salud [4]. Además, en esta categoría también se incluyen los residuos sanitarios, los cuales «son todos aquellos elementos o instrumentos utilizados durante la ejecución de los procedimientos asistenciales que tienen contacto con materia orgánica, sangre o fluidos corporales del paciente tales como: gasas, apósitos, aplicadores, algodones, drenes, vendajes, mechas, guantes, bolsas para transfusiones sanguíneas, catéteres, sondas, material de laboratorio como tubos capilares, de ensayo, láminas portaobjetos y laminillas cubreobjetos, sistemas cerrados y sellados de drenajes y ropas desechables, entre otros.» [7]

Escombros y residuos de la construcción: de acuerdo con la normativa, se consideran residuos de la construcción aquellos que se generan en una obra de construcción o demolición [6], como lo son el concreto, la madera, el acero, vidrio, papel, cartón, arenas e incluso, el suelo mismo. Es necesario aclarar que las tierras de excavación no se incluyen en esta clasificación, puesto que no son consideradas como residuos.

Residuos químicos: los residuos químicos son todos los “restos de sustancias químicas y sus empaques o cualquier otro residuo contaminado con éstos, los cuales,

dependiendo de su concentración y tiempo de exposición pueden causar la muerte, lesiones graves o efectos adversos a la salud y al medio ambiente” [7]. Este tipo de residuos pueden ser clasificados en: fármacos parcialmente consumidos, vencidos y/o deteriorados, citotóxicos, metales pesados, reactivos, contenedores presurizados, aceites usados. [7]

Residuos radiactivos: los residuos radiactivos son todos aquellos residuos que contienen “sustancias emisoras de energía predecible y continua en forma alfa, beta o de fotones, cuya interacción con la materia, puede dar lugar a la emisión de rayos x y neutrones” [7].

1.1.2.c. Según su composición. Los residuos se pueden clasificar por su composición química y las características que estos mismos presenten en aspectos físicos. Los más importantes en esta clasificación son:

Residuo orgánico: los residuos orgánicos o residuos sólidos orgánicos son aquellos “materiales sólidos o semisólidos de origen animal, humano o vegetal que se abandonan, botan, desechan, descartan o rechazan y son susceptibles de biodegradación, incluyendo a aquellos considerados como subproductos orgánicos provenientes de procesos industriales”. [10]

Residuo inorgánico: a diferencia de los residuos orgánicos, se considera residuo inorgánico a todo desecho sin origen biológico, de índole industrial o de algún otro proceso artificial [4], algunos ejemplos son los plásticos, las telas sintéticas, metales, etc. De acuerdo con el decreto 1713 de 2002, estos desechos deben ser procesados y dispuestos de tal forma que su impacto negativo al ambiente sea minimizado. [11]

Mezcla de residuo: el término mezcla de residuos se refiere a todos los desechos de residuos mezclados los cuales dan como resultado una combinación de materiales orgánicos e inorgánicos. [4]

1.2. Residuos sólidos urbanos orgánicos

Se entiende como residuo sólido orgánico a todo aquel material que proviene de especies de flora o fauna y puede ser descompuesto por microorganismos, o bien consiste en restos, sobras o productos de desecho de cualquier organismo [12]. Este tipo de residuos pueden desintegrarse o degradarse rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica. [13]

Por lo general, los residuos orgánicos tienen un origen biológico, están constituidos principalmente por agua y se caracterizan por ser desechos de origen alimenticio, estiércol y/o animales pequeños muertos; también proceden de las actividades domiciliarias, comerciales u hospitalarias [5]. Estos productos, suelen generar malos olores y representan una fuente importante de atracción para los vectores, debido a los procesos de putrefacción y fermentación que atraviesan. [12][13]

1.2.1. Clasificación de los residuos sólidos urbanos orgánicos

Las clasificaciones más conocidas de los residuos sólidos orgánicos, están relacionadas con su fuente de generación y con su naturaleza y/o características físicas.

1.2.1.a. Según su fuente de generación. De acuerdo a su fuente de generación, los residuos sólidos urbanos se pueden clasificar en los siguientes.

Residuos sólidos orgánicos provenientes del barrido de las calles: este tipo de residuos tienen un contenido muy variado, puesto que pueden encontrarse desde restos de frutas hasta papeles y plásticos. Para este caso, se tiene limitadas posibilidades de aprovechamiento, dado a la alta dificultad que representa llevar a cabo un proceso de separación física de dichos residuos. [13]

Residuos sólidos orgánicos institucionales: estos son residuos asociados tanto a instituciones gubernamentales como instituciones privadas. En su mayoría se caracterizan por contener papeles y cartones, además de residuos de alimentos provenientes de los comedores institucionales. [13]

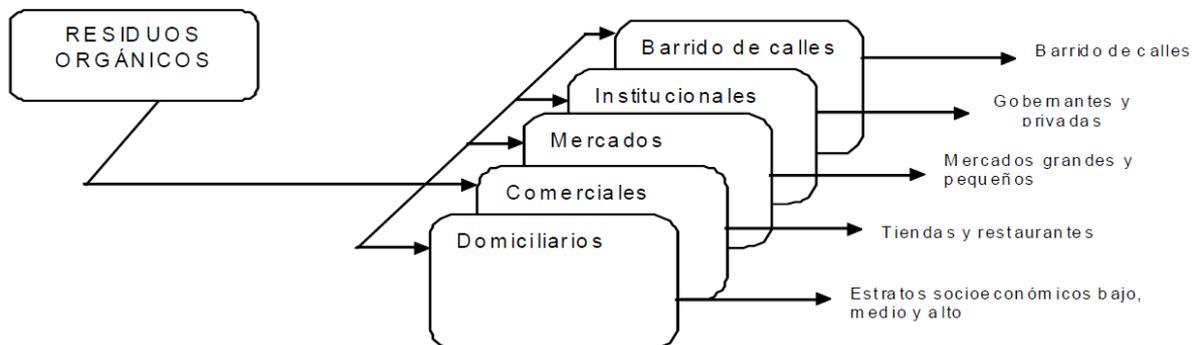
Residuos sólidos de mercados: este tipo de residuos derivan principalmente de mercados de abastos y otros centros de venta de productos alimenticios. Se consideran como una excelente materia prima para la elaboración de compost y fertilizante orgánico, entre otros productos. [13]

Residuos sólidos orgánicos de origen comercial: estos residuos proceden de establecimientos comerciales, principalmente de tiendas y restaurantes. Estos últimos son la mayor fuente de generación de residuos orgánicos, puesto que su servicio principal es la venta de comidas. Posterior a un tratamiento especial, estos residuos pueden ser utilizados como alimento para el ganado y porcinos. [13]

Residuos sólidos orgánicos domiciliarios: estos residuos son todos aquellos obtenidos a raíz de las diferentes actividades domésticas. Sus características pueden ser variadas, pero, en general, contienen restos de verduras, frutas, residuos de alimentos preparados, podas de jardín y papeles [13]. Representan un gran potencial para su aprovechamiento en los departamentos del país.

Figura 1.

Clasificación de los residuos sólidos orgánicos según su fuente de generación



Nota. Clasificación de los residuos sólidos orgánicos de acuerdo con su fuente de generación. Tomado de: G. Jaramillo Henao y L. M. Zapata Márquez, *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*, tesis esp. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2008.

En la Figura 1 se representa la clasificación general de los residuos sólidos orgánicos de acuerdo con su fuente de generación. Esta figura es muy útil para la identificación de materia orgánica que puede ser aprovechada. Un ejemplo de ello son las fuentes

para la elaboración del abono orgánico, las cuales están constituidas tanto por los residuos de mercado como por los domiciliarios, los cuales en la mayoría de casos representan más del 50% de los residuos totales generados. [13]

1.2.1.b. Según su naturaleza y/o características físicas. De acuerdo a su naturaleza o sus características físicas, los residuos sólidos urbanos se pueden clasificar en los siguientes.

Residuos de alimentos: los restos de alimentos provenientes de múltiples fuentes, tales como restaurantes, comedores, hogares y otros establecimientos de expendio de alimentos, son conocidos como residuos alimenticios. [13]

Estiércol: estos son todos los residuos fecales de animales, principalmente ganado, que pueden ser aprovechados para su transformación en abono o para la generación de biogás. [13]

Restos vegetales: los residuos resultantes de podas o deshierbe de jardines, parques u otras áreas verdes son conocidos como residuos vegetales. En esta clasificación también se pueden incluir algunos residuos de cocina que no han sido sometidos a procesos de cocción como legumbres, cáscara de frutas, etc. [13]

Papel y cartón: en este grupo se encuentran todos aquellos residuos con un alto potencial para ser reciclados. [13]

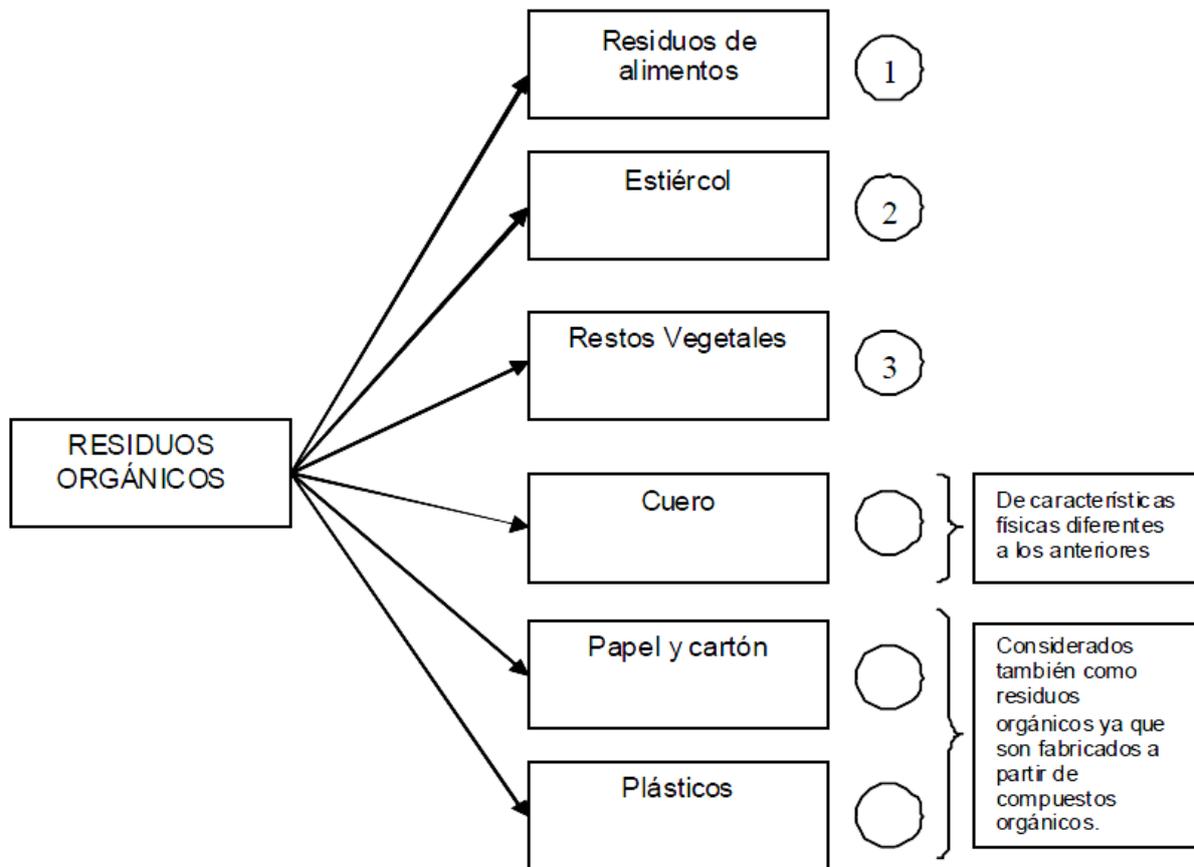
Cuero: estos residuos son provenientes mayormente de artículos de cuero en desuso. [13]

Plásticos: los residuos plásticos son considerados como residuos de origen orgánico, debido a que se fabrican empleando compuestos orgánicos como el etano (componente del gas natural), además de algunos derivados del petróleo [13]. En la figura 2 se muestra una clasificación general de los residuos sólidos orgánicos según su naturaleza y/o característica física. Se considera dentro de la clasificación también al cuero, papel, cartón y plásticos, sin embargo, este tipo de residuos no se tendrán en cuenta en el desarrollo de este trabajo, puesto que su sistema de aprovechamiento

y reciclaje es más complejo y costoso y no puede ser implementado en el proceso de pirólisis. [13]

Figura 2.

Clasificación de los residuos sólidos orgánicos según su naturaleza y/o características físicas



Nota. Clasificación general de los residuos sólidos orgánicos según su naturaleza y/o características físicas. Tomado de: G. Jaramillo Henao y L. M. Zapata Márquez, *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*, tesis esp. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2008.

1.2.2. Composición de los residuos sólidos urbanos orgánicos

Dentro de los residuos urbanos pueden contemplarse un sinnúmero de materiales, los cuales, con el fin de realizar una correcta gestión y manipulación, deben conocerse a profundidad. El desarrollo industrial que ha venido experimentando la sociedad ha hecho que los residuos orgánicos, en su mayoría, hayan dado paso a otros productos

nuevos, especialmente procedentes de los envases y embalajes. Para este trabajo, es necesario precisar que la materia orgánica corresponde a los restos de comida, de jardinería y otros materiales fermentables, los cuales constituyen el principal componente de los residuos y que tiende a disminuir en las sociedades más desarrolladas.

De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta que, para caracterizar los residuos sólidos urbanos orgánicos, es necesario conocer las propiedades biológicas de los mismos, la fracción orgánica de la mayoría de los residuos se puede clasificar de la siguiente manera:

- «Constituyentes solubles en agua, tales como azúcares, féculas, aminoácidos y diversos ácidos orgánicos.
- Hemicelulosa, un producto de condensación de azúcares con cinco y seis carbonos.
- Celulosa, un producto de condensación de glucosa de azúcar con seis carbonos.
- Grasas, aceites y ceras, que son ésteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga.
- Lignina, un material polímero presente en algunos productos de papel como periódicos.
- Lignocelulosa, una combinación de lignina y celulosa.
- Proteínas, que están formadas por cadenas de aminoácidos.» [13]

Cabe resaltar que la anterior clasificación de los componentes presentes en la materia orgánica, excluye materiales como el plástico, el cuero y la goma.

La principal característica de la parte orgánica de los residuos sólidos urbanos y la más importante biológicamente, es que la gran mayoría de dichos componentes pueden ser transformados en gases y sólidos prácticamente inertes. [13]

1.3. Manejo de residuos sólidos urbanos en Colombia

Los residuos sólidos urbanos son comúnmente dispuestos en rellenos sanitarios o ilegalmente en tiraderos al aire libre [14]. La fracción orgánica de estos residuos oscila entre 40 a 65%, constituyendo la mayor parte de los mismos, la cual, debido a la acción de los microorganismos, genera biogás y lixiviados, aumentando el riesgo potencialmente alto de contaminación ambiental además de la proliferación constante de vectores.

El manejo eficiente y sostenible de las basuras en cualquier tipo de sociedad, sin importar su tamaño, tiene tres grandes componentes; el primero de ellos es la comunidad, la cual corresponde a un conjunto de personas que se reúnen geográficamente alrededor de intereses comunes, y que comparte una cultura. En segundo lugar, el ambiente, que establece condiciones naturales sobre las cuales la comunidad se interrelaciona [14]. Por último, la tecnología, la cual ofrece los métodos y herramientas para mejorar los problemas en forma de preservar al máximo los recursos naturales y de ser compatible con las condiciones sociales, económicas y culturales de la comunidad. [14]

En el país existen aproximadamente 230 empresas prestadoras de servicios públicos, de las cuales 63 se dedican únicamente a la recolección y el aseo, 35 de servicio integral de acueducto, alcantarillado y aseo y el resto son pequeñas empresas [15], las cuales funcionan en municipios menores de 5.000 usuarios o están ubicadas en áreas rurales localizadas fuera del perímetro urbano. [15]

Las cifras del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible indican que, en un día, el país produce 27.300 toneladas de basura de las cuales el 65% son residuos orgánicos y el 35% inorgánicos [14]. La fracción orgánica presente en las basuras colombianas está constituida principalmente por alimentos, cartón, papel, residuos de jardín y madera. Además de esto, tan solo el 40% de los residuos sólidos urbanos tienen un manejo adecuado, mientras que el 10% es recuperado gracias a procesos de reciclaje y hasta el 50% es manejado de manera inapropiada. [14]

Las dificultades que se presentan en el manejo de las basuras en todo el mundo son muy similares, la diferencia se esclarece en el manejo de las basuras entre países industrializados y los países en vía de desarrollo, como son el grado de tecnología aplicada, la cultura de disposición entre otros. [15]

1.3.1. Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos

El Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos está definido por la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, CORANTIOQUIA, como «un documento que contiene un conjunto ordenado de objetivos, metas, programas, proyectos y actividades, definidos por el ente territorial para la prestación del servicio de aseo, acorde con los lineamientos definidos en los Planes y/o Esquemas de Ordenamiento Territorial y basado en la política de Gestión Integral de Residuos Sólidos, la cual apunta en un diagnóstico inicial, en su proyección hacia el futuro y en un plan financiero viable que permita garantizar el mejoramiento continuo de la prestación del servicio de aseo, evaluado a través de la medición de resultados». [16]

El plan contempla la implementación de medidas de manejo para prevenir impactos negativos en la salud y el medio ambiente por manejo inadecuado de residuos sólidos y líquidos, desde la etapa de producción hasta la disposición final en todas las áreas del Instituto Nacional de Salud [17]. El plan describe las actividades de generación, clasificación, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos [17]. Con el fin de dar cumplimiento a la Resolución 1164 de 2002, el INS llevó a cabo un análisis inicial, teniendo en cuenta tanto el cumplimiento normativo como la caracterización de los residuos sólidos cualitativa y cuantitativamente, además del estado general de los vertimientos y emisiones atmosféricas. [13]

El documento sujeto al plan de gestión integral fue reglamentado con el Decreto 1713 de agosto 6 de 2002 en su artículo 8, donde enuncia: “Plan para la Gestión Integral de Residuos Sólidos- PGIRS” [13]. De acuerdo con esto, los Municipios y Distritos, “deberán elaborar y mantener actualizado un Plan para la Gestión Integral de Residuos en el ámbito local y/o regional según el caso, en el marco de la política para la Gestión Integral de los Residuos expedida por el Ministerio de Ambiente y

Desarrollo Sostenible, el cual será enviado a las autoridades Ambientales competentes, para su conocimiento, control y seguimiento.” [18]

A pesar de los múltiples esfuerzos realizados para el desarrollo y la ejecución del PGIRS, es necesario resaltar que el manejo de los residuos sólidos por parte de las compañías prestadoras de servicios de aseo, desde la recolección hasta la disposición final de los mismos, puede no estar acorde con lo establecido [17]. Con el fin de mitigar la problemática generada por los elevados costos de los rellenos sanitarios, la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), propone “la regionalización para incentivar la creación de rellenos regionales, a través de la unión de municipios, ya que es más barato que varios municipios se unan, a que cada municipio tenga un sitio de disposición final, en forma independiente, y entre menos rellenos sanitarios haya en el país, se facilita el control ambiental y el manejo es mejor”. [17]

1.3.2. Principales rellenos sanitarios en Colombia

La alta generación de residuos y las constantes problemáticas generadas por las basuras, se pueden aliviar parcialmente con la creación de rellenos sanitarios, el cual es, hasta ahora, el método de evacuación de residuos sólidos urbanos más seguro y respetuoso con el medio ambiente [19]. El Relleno Sanitario, es según el decreto 1713 de 2002, el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de los residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final. [18]

Al año, Colombia produce aproximadamente de 11 millones de toneladas de basura, pero el promedio de la tasa de aprovechamiento es de apenas el 1.8%, es decir, es poco lo que se recicla o se invierte y al final hay demasiada basura que desechar [20]. Según reportes realizados por la revista Semana en Colombia existen 101 botaderos a cielo abierto, mientras que 18 rellenos sanitarios, en los que se deposita el 36 por

ciento de todos los residuos del país [21], sin embargo, debido a la cantidad de residuos que son desechados diariamente, estos se encuentran en estado crítico.

En Colombia, el servicio de aseo es de carácter público y responsabilidad del Estado [22]. 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. [18]

A continuación, se realiza una revisión de los rellenos sanitarios de las principales ciudades de Colombia de acuerdo con los reportes e informes ambientales disponibles más actuales.

1.3.2.a. Relleno Sanitario de Doña Juana. La ciudad de Bogotá, capital de Colombia, cuenta con el relleno sanitario de Doña Juana, en el cual se disponen los residuos tanto de la capital como de 6 municipios aledaños, con un promedio de 5.891,8 ton/día, y de las cuales Bogotá aporta 5880 ton/día [22]. El relleno está ubicado en la vía a Usme, en el suroriente de Bogotá y cuenta con un área de 472 ha, de las cuales 219 están destinadas para el depósito de las basuras. [22]

Este relleno lleva en funcionamiento continuo más de 20 años, y su historia ha estado marcada por su mal funcionamiento. De acuerdo con la Personería de Bogotá, en la actualidad este relleno presenta problemas como el deslizamiento de los desechos, hundimientos y agrietamientos, proliferación de malos olores y vectores, e inclusive, volúmenes de lixiviados superiores a la capacidad de la planta de tratamiento de los mismos. A causa de estos problemas, las comunidades aledañas se han visto afectadas, reportando tierras menos fértiles e infección del ganado. [22]

1.3.2.b. Relleno Sanitario Parque Ambiental La Pradera. Medellín, una de las ciudades más importantes de Colombia, deposita sus residuos sólidos en el relleno sanitario "Parque Ambiental La Pradera", que es de tipo regional, junto con 22 ciudades más. Recibe diariamente 2.787 toneladas de residuos, de las cuales Medellín produce alrededor de 1.795 toneladas de residuos sólidos al día. El relleno

sanitario se ubica en un terreno de 354 hectáreas en Don Matías, a 57 kilómetros de Medellín. [22]

Este relleno sanitario tiene diversidad de problemas de impacto ambiental, incluida la falta de un sistema de tratamiento de lixiviados. Actualmente cuenta con una laguna estable como sistema de pretratamiento, que se encuentra en funcionamiento desde 2003. Por otra parte, debido a la falta de medidas de compensación relevantes, el vertedero también tiene impactos abióticos por la erosionabilidad del suelo dejando como consecuencia la reducción de hábitats y la alteración de la flora y fauna nativa de la zona. [22]

1.3.2.c. Relleno Sanitario Colomba - El Guabal. El municipio de Santiago de Cali, en Valle del Cauca, dispone sus residuos en el Relleno Sanitario Colomba - El Guabal, también conocido como Relleno Sanitario de Yotoco, el cual inició operaciones el 25 de junio de 2008 reemplazando el antiguo botadero de Navarro. El proyecto posee un área de 363 ha [22]. Este relleno está ubicado en el área rural del municipio de Yotoco a 32,5 km de la glorieta de Sameco. En la actualidad recibe 1800 ton/día de residuos provenientes de los municipios de Candelaria, Jamundí, Caloto, Villarica, Yumbo y Cali. A mayo de 2009 no contaba con planta de tratamiento de lixiviados y presentaba olores desagradables por el inadecuado manejo de los gases en el relleno. [22]

1.3.2.d. Relleno Sanitario Los Pocitos. La capital del Atlántico procesa sus residuos en el relleno sanitario Los Pocitos, que se encuentra en funcionamiento desde marzo de 2009 y sustituyó al antiguo relleno sanitario Henequén. Este relleno sanitario está ubicado a 12 kilómetros al norte de Barranquilla, contando con una superficie de 135 hectáreas [22]. Las ciudades de Barranquilla, Soledad, Galapa y Puerto de Colombia depositan diariamente un promedio de 1.600 toneladas de residuos sólidos suponiendo una vida útil de 32 años para este lugar. Aun siendo un relleno sanitario relativamente nuevo, actualmente existen fallas que afectan al medio ambiente. [22]

1.3.2.e. Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos. A partir de enero de 2006, la disposición final de los residuos sólidos de la ciudad de Cartagena empezó a ser realizada en el relleno sanitario denominado "Parque Ambiental Loma de los Cocos" [22]. Este relleno, cuya vida útil ha sido contemplada hasta el 1 de febrero de

2025, solo recibe los desechos de esta ciudad, los cuales suman 750 ton/día. Se localiza en el sector rural del corregimiento de Pasacaballos y cuenta con un área total de 64 ha. [22]

Según el criterio de la Dirección Técnica General de Aseo, el funcionamiento de este relleno sanitario es aceptable, puesto que maneja una cobertura diaria, posee un frente de descargue de residuos definido, cuenta con suficientes chimeneas fácilmente identificables y los vectores están controlados, además el flujo vehicular es bajo [22]. 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, así como en las vías internas, la adecuación de los canales perimetrales de las zonas terminadas y en operación y finalmente con los canales de conducción de lixiviados. [23]

1.3.2.f. Relleno Sanitario Regional Los Ángeles. Neiva cuenta con el relleno sanitario regional Los Ángeles, ubicado en la vereda la Jagua, al Noreste de la zona urbana de la ciudad. Este relleno se ubica en un terreno de 155 hectáreas y está siendo utilizado por un total de 12 municipios que se encuentran alrededor. En promedio recibe 323.9 ton/día de las cuales 289.35 ton/día son generados por la ciudad de Neiva. Se estima una vida útil de disposición final de residuos sólidos hasta el 1 de enero del año 2053. [22]

De acuerdo con el más reciente informe ambiental de la contraloría municipal de Neiva, el manejo ambiental del relleno sanitario ha mejorado, aunque en la actualidad presenta algunos problemas importantes que afectan los alrededores. [22]

1.3.2.g. Relleno Sanitario Regional La Glorita. La ciudad de Pereira, además de un total de 17 municipios, disponen sus residuos en el relleno sanitario regional La Glorita, ubicado en el corregimiento de Combia Baja, a 14 km del casco urbano de la ciudad, teniendo un aporte de alrededor de 280 ton/día por parte de la ciudad únicamente [22]. Los principales problemas que presenta este relleno sanitario, reportados por la Corporación Autónoma de la zona CARDER, y por los cuales la empresa encargada del relleno ha sido multada, están relacionados con derrumbes de material de cobertura después de ciclos de lluvia, deterioro del terreno por

escorrentía descontrolada de aguas lluvias, vertimiento sin tratamiento del agua generada por lavado de maquinarias, inexistencia de verificación del tipo de residuos sólidos que ingresan al relleno. [22]

1.3.2.h. Relleno Sanitario El Carrasco. Bucaramanga, la capital del departamento de Santander, procesa sus residuos en el relleno sanitario El Carrasco, que recibe alrededor de 734,3 toneladas de residuos de 11 municipios cada día [22]. La producción de residuos pertenecientes a Bucaramanga es aproximadamente 562 toneladas por día, es decir, el 76,5% de los residuos recibidos en el sitio. El relleno cuenta con un área de 92 hectáreas y se encuentra ubicado en la parte suroccidental de la ciudad de Bucaramanga. [22]

La vida útil de este relleno sanitario dio fin en 2007. Sin embargo, se encuentra en operación gracias a una celda transitoria que funcionó hasta septiembre de 2011. Actualmente, se encuentra en estado de emergencia sanitaria y según las autoridades en Bucaramanga se prorrogará la emergencia por 24 meses más, es decir, que el sitio podrá seguir funcionando por lo menos hasta octubre de 2022. [22]

1.3.2.i. Relleno Sanitario Parque Industrial de Residuos Sólidos La Miel. La ciudad de Ibagué, capital del departamento de Tolima, dispone del único relleno sanitario del departamento, conocido como Parque Industrial de Residuos Sólidos La Miel, el cual se ocupa solamente del municipio de Ibagué [22]. Este relleno sanitario, en promedio, recibe 355,9 ton/día de residuos sólidos, y cuenta con una vida útil de disposición hasta el 26 de marzo del 2020 [23]. El relleno está ubicado en la vereda Buenos Aires, aproximadamente a 5 km del municipio de Ibagué y abarca un área de 46 ha [22]. En la actualidad son escasos los informes los que se tienen sobre el funcionamiento de este relleno por parte de las entidades ambientales.

1.3.2.j. Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo. Este relleno sanitario se encuentra ubicado en el kilómetro 9, vía Mosquera – La Mesa, en el municipio de Bojacá. Inició la operación de disposición final de residuos sólidos el 07 de enero de 2007, recibiendo residuos de 78 municipios, con un promedio diario de disposición de 1.380 toneladas [24]. El predio pertenece a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y cuenta con un área total de 76 hectáreas, de las cuales están

licenciadas 17 hectáreas [25]. A pesar de que su operación fue contratada por 32 años (2007 – 2039), actualmente se tiene capacidad licenciada para 8 años a partir de enero de 2019. [24]

1.3.3. Reciclaje de los Residuos Sólidos Urbanos

El reciclaje consiste en un proceso de transformación de materiales usados y/o desechados, a través de técnicas tanto fisicoquímicas como mecánicas, con el fin de obtener nuevas materias primas. Gracias a este proceso, materiales como papel, cartón, plásticos, vidrio, aluminio, hierro, entre otros, pueden ser utilizados una vez más e iniciar un nuevo ciclo de vida.

Las dificultades para la eliminación de los desechos domiciliarios e industriales pueden ser superadas con la generalización del concepto de reciclado. Esta tarea permite reducir en gran medida el desperdicio, al tiempo que ahorra agua y energía. En los países desarrollados, este proceso se ve facilitado por la recolección selectiva de basura.

En Colombia se generan cerca de 12 millones de toneladas de basura anualmente, de las cuales solo recicla el 16,5% [26]. Según informes del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, tan solo en Bogotá se generan hasta 6.300 toneladas de basura al día y solo se aprovechan entre el 14% y 15% [2]. El bajo nivel de reciclaje existente tanto en casas como en el sector industrial, genera constantemente crisis en los rellenos sanitarios por factores como la falta de espacio para disponer los residuos. El problema tiende a empeorar en los próximos cuatro años, pues se estima que 321 rellenos del país cumplirán su vida útil. [27]

Colombia es el país más avanzado en materia de reciclaje en América Latina gracias a los esfuerzos de fundaciones y organismos privados [28]. La Fundación Social (FS) es una de las organizaciones más activas en el mundo que trabajan a favor de los recicladores informales [28]. Por otra parte, la labor realizada por el gremio de recicladores es de vital importancia, teniendo en cuenta que “en 2019 se encontraban registradas 319 organizaciones en el Sistema Único de Información (SUI) de la

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, las cuales agrupaban a más de 30.000 recicladores”. [27]

Tabla 2.

Aprovechadores de Residuos Sólidos por Departamento

Departamento	Prestadores Inscritos	Número de recicladores miembros
Bogotá	118	17.296
Antioquia	29	2.337
Valle del Cauca	19	1.590
Cundinamarca	20	860
Santander	17	736
Meta	12	1.603
Boyacá	12	548
Atlántico	13	1.063
Bolívar	8	303
Cesar	8	227

Nota. Datos estadísticos de los colaboradores inscritos en programas de reciclaje en los principales departamentos de Colombia. Tomado de: Semana, “El 78% de los hogares colombianos no recicla”, Marzo 01, 2020. [En línea] Disponible en: <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/el-78-de-los-hogares-colombianos-no-recicla/44231/> [Accedido: Enero 15, 2021].

En la tabla 2 se evidencian los departamentos en los cuales la mayor parte de los aprovechadores de residuos llevan a cabo su labor, siendo los principales de ellos Bogotá, Antioquia, Meta, Valle del Cauca y Atlántico.

Cabe resaltar que “en 2018 fueron aprovechadas 767.137 toneladas de residuos, en 25 departamentos, por parte de 232 organizaciones de recicladores, según la Superservicios” [27]. Además de ello, la superintendente Natasha Avendaño García indicó que, para este mismo año, el papel y cartón fueron los materiales más aprovechados por los recicladores, representando el 55% del total informado [27].

Seguidamente estuvieron los metales con un porcentaje de aprovechamiento cercano al 30%, mientras que los plásticos tuvieron una fracción de tan solo el 8,8%. [27]

1.4. Aprovechamiento de residuos sólidos urbanos

El aprovechamiento de residuos, a pesar de tener poco desarrollo legislativo es un tema de gran importancia para el país. De acuerdo con informes presentados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia produce cerca de 11 millones de toneladas de residuos al año y de dicha cifra ni siquiera el 20% se aprovecha, siendo que, según lo establecido en la Ley 1753 de 2015, artículo 88; la cual obliga a adoptar métodos de aprovechamiento y reciclaje dentro de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), el 80% de los residuos debería ser aprovechado. [29]

Los residuos aprovechables son aquellos que pueden ser reutilizados o transformados en otro producto, reincorporándose al ciclo económico y con valor comercial [13]. Para que los residuos puedan aprovecharse dentro de un Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos, se deben tener en cuenta su viabilidad económica, que sea técnicamente factible y ambientalmente conveniente [13].

A continuación, se describen algunas de las formas de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos más utilizadas a nivel industrial, las cuales se obtienen con un tratamiento previo.

1.4.1. Compostaje

El compostaje es una práctica ampliamente aceptada como sostenible y utilizada en diversos aspectos relacionados con la agricultura, combinando la protección del medio ambiente con una producción agrícola sostenible [30]. Se basa en la acción de diversos microorganismos aerobios, los cuales actúan continuamente sobre la materia orgánica, produciendo elevadas temperaturas, reduciendo el volumen y el peso de los residuos y provocando su humificación y oscurecimiento, generando así, biomasa, calor, agua, y materia orgánica más descompuesta. Para que este proceso se lleve a cabo, es necesario controlar diversos factores que aseguren la correcta

proliferación de microorganismos y, así mismo, una adecuada mineralización de la materia orgánica. El hecho de que el compostaje sea biológicamente oxidable requiere una condición biológica que lo diferencie de los procesos físicos, químicos y aeróbicos. [31]

Por otra parte, la materia orgánica empleada para la elaboración de compostaje está conformada por azúcares complejos, tales como lignina, celulosa, hemicelulosa y almidón, presentes en los residuos vegetales y proteínas presentes en los residuos animales principalmente. La materia orgánica puede ser aplicada al suelo ya sea fresca, seca o procesada. [30]

Una vez la materia orgánica alcanza el máximo grado de descomposición, todas las sustancias presentes en el suelo inician un proceso de formación de complejos de carbono de lenta degradación, generando un nuevo material llamado *Humus*, el cual es más estable gracias a la presencia de ácidos húmicos y fúlvicos. [30]

Se realiza el compostaje con el objetivo de devolver el residuo al ciclo de producción como fertilizante o mejorador de suelo [32]. La variedad de tecnologías que existen para el compostaje es bastante amplia puesto que puede llevarse a cabo en diversos lugares tales como jardines privados o plantas centralizadas altamente tecnificadas. [32]

1.4.2. Biocombustibles

Biocombustible es cualquier tipo de combustible líquido, sólido o gaseoso, proveniente de la biomasa, es decir, materia orgánica ya sea de origen animal o vegetal [13]. Quedan por tanto fuera de este concepto los combustibles fósiles o los productos orgánicos derivados de ellos. [33]

Los combustibles de origen biológico pueden cumplir la función de sustituir una parte significativa del consumo de los combustibles fósiles convencionales, como lo son el petróleo y el carbón; este tipo de combustible se encuentra mayormente en forma líquida y su uso principal se da en los motores de combustión del transporte terrestre [33]. Los biocombustibles más reconocidos y utilizados son el bioetanol y el biodiesel; sin embargo, también es común el uso del biopropanol y el biobutanol. [33]

Tabla 3*Tipos de biocombustible*

Tipos de Biocombustible		
Sólidos	Líquidos	Gaseosos
Paja Leña sin procesar Astillas Briquetas y pellets Triturados finos Carbón Vegetal	Alcoholes Biohidrocarburos Aceites Vegetales Esteres derivados de aceites vegetales Aceites de pirólisis	Gasógeno Biogás Hidrógeno

Nota. Ejemplos de biocombustibles de acuerdo con su clasificación. Tomado de: E. Salinas Callejas y V. Gasca Quezada, “Los Biocombustibles”, *El Cotidiano.*, n.157, pp. 75–82, Sep, 2009, doi: 10.1787/agr_outlook-2010-6-es.

La forma más utilizada para clasificar los biocombustibles corresponde a su proceso de generación, teniendo biocombustibles de primera, segunda y tercera generación. [33]

Los biocombustibles de primera generación, tales como el bioetanol, biodiesel y el biogás, son aquellos provenientes de biomasa que está especialmente destinada a la alimentación humana, teniendo así tecnologías de producción simples y económicas, pero compitiendo con la producción de alimentos [33]. Por otra parte, los biocombustibles de segunda generación se diferencian de los de primera generación en dos aspectos importantes. En primer lugar, se obtienen de vegetales que no tienen una función alimentaria, y en segundo lugar se producen con tecnologías que permiten ser más ecológicos y avanzados que los actuales. Al ser obtenidas de materias primas no alimentarias, se pueden cultivar en tierras marginales que no se emplean para el cultivo de alimentos [33]. Es así como se abre paso a una mayor diversificación con nuevas materias primas y tecnologías promoviendo el desarrollo agrícola y agroindustrial. Estos biocombustibles están ahora en el auge de la comercialización. En términos más específicos, el combustible de biomasa de 2G es más fácil de mezclar con otros biocombustibles, ayudando, de este modo, a reducir los niveles de CO₂ a corto plazo. [34]

Por último, los biocombustibles de tercera generación, también conocidos como biocombustibles avanzados, emplean como materia prima biomasa creada específicamente para tal desempeño, lo cual disminuye las desventajas presentadas por los biocombustibles 1G y 2G. [34] Su obtención está basada en tecnologías emergentes que prometen una gran cantidad de combustible por unidad de área y menores costos de producción, teniendo como materia prima principal, las microalgas. El aceite proveniente de las microalgas es una fuente potencial de biodiesel debido a que su contenido de aceite supera al de todas las fuentes vegetales cultivadas actualmente. [34]

1.4.3. Biofertilizantes

Los biofertilizantes son preparados microbianos los cuales se aplican al suelo y/o plantas, con el propósito de reemplazar parcial o completamente los fertilizantes sintéticos y reducir la contaminación causada por agroquímicos. [35]

Los microorganismos utilizados en los biofertilizantes se dividen en dos grupos: El primer grupo incluye microorganismos que tienen la habilidad de sintetizar sustancias que promueven el crecimiento de la planta mediante diversos procesos; fijar el nitrógeno atmosférico, solubilizar hierro y fósforo inorgánico y mejorar la tolerancia al stress por sequía, salinidad, metales tóxicos y exceso de pesticidas, por parte de la planta [35]. El segundo grupo incluye microorganismos que pueden reducir o prevenir los daños de microorganismos patógenos. Actualmente, existen diversos biofertilizantes con múltiples funciones las cuales dependen del tipo de cultivo al que se someta. Habitualmente, los biofertilizantes más comunes y utilizados están compuestos por hongos micorrícicos y bacterias. [35]

El uso de biofertilizantes es benéfico no solo para el medio ambiente, sino también en el factor económico, debido a que el costo de los fertilizantes químicos es hasta un 90% mayor al de los biofertilizantes, de acuerdo con lo señalado por el doctor Trujillo Roldán. Además, se han evidenciado mejoras en la productividad de muchos cultivos de maíz, caña de azúcar, cítricos y café con el uso de biofertilizantes. [36]

1.5. Técnicas térmicas de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos

1.5.1. Incineración

La incineración de residuos sólidos urbanos, también conocida como combustión, es un tratamiento térmico que busca destruir los componentes presentes en la fracción orgánica de los mismos, siendo esta un proceso controlado en el cual se reduce el volumen y se aprovecha la energía generada [37]. “Desde el punto de vista medioambiental, lo más preocupante es la emisión de gases complejos con propiedades peligrosas, entre ellos dioxinas y furanos, que son productos de la combustión de residuos sólidos urbanos”. [37]

La incineración es definida como “Proceso por el que se someten los materiales sólidos y líquidos, sean residuales o no, a un régimen de temperaturas medias (850 - 1.200 °C), por efecto de las reacciones de oxidación exotérmica de los propios residuos y, si es preciso, de combustible aportado, en presencia de exceso de oxígeno suficiente para que casi toda (>99,99%) la fracción orgánica presente pase a la forma gaseosa, los compuestos oxidables a esa temperatura se hayan combinado con el oxígeno, y la fracción inorgánica se haya reducido a escorias (vidrio, piedras, metales) y cenizas”. [38]

1.5.2. Gasificación

La gasificación es un proceso en el que se convierte la materia prima, la cual generalmente se encuentra en estado sólido, mediante oxidación parcial a temperatura elevada, en un gas con un poder calorífico moderado [37]. “En el proceso de gasificación, la materia prima en forma de carbón, madera u otros materiales se calienta en presencia de gases reactivos, y la mayor parte del carbono presente en la materia prima se convierte en una mezcla de gases, incluido el metano (el componente principal del gas natural) e impurezas más un residuo inerte”. [39]

En la gasificación, la energía química presente en los RSU se convierte en energía contenida en un gas. “Este gas se puede utilizar de forma mucho más flexible (como materia prima de procesos químicos o como combustible en calderas, motores,

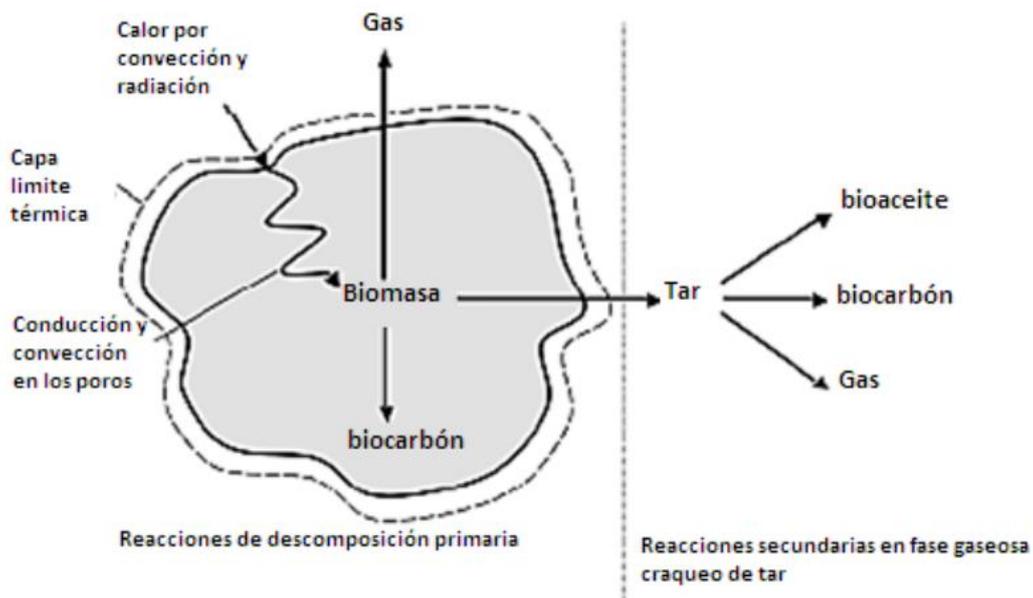
turbinas, o pilas de combustible). Las cenizas pueden considerarse un residuo o bien valorizarse, usándolas como material de construcción o como fertilizante, fabricación de vidrio, etc. [...] Así pues, la gasificación es una técnica energéticamente eficaz para reducir el volumen de los residuos sólidos y recuperar su energía, convirtiéndose en una de las vías más adecuadas a mediano y largo plazo para la obtención de energía en el marco del desarrollo sostenible”. [37]

1.5.3. Pirólisis

La pirólisis es un proceso de degradación térmica de la biomasa, la cual se da en ausencia de oxígeno, es decir, en un ambiente completamente inerte. Este proceso siempre es el primer paso tanto para la combustión como para la gasificación.[40] “La pirólisis es una reacción endotérmica. De acuerdo con informes, el requerimiento de calor para la pirólisis de varias biomásas agrícolas y de madera está en el rango de 207 – 434 kJ/kg”. [40]

Figura 3.

Pirólisis de una partícula de biomasa



Nota. Método de reacción de una partícula de biomasa en el proceso de pirólisis. Tomado de: J. I. Montoya Arbeláez et al., *Pirólisis de biomasa*, 1st ed. Diciembre. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2014.

La figura 3 muestra el mecanismo de reacción de una partícula de biomasa al ser expuesta al proceso de pirólisis, evidenciando la producción de bioaceite, biocarbón y gas como resultado del proceso.

En la pirólisis, la biomasa sólida previamente humedecida se descompone térmicamente en una gran cantidad de productos gracias a la acción del calor circundante presente en el reactor.[40] Este proceso tiene tres etapas “la dosificación y alimentación de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y, finalmente, la obtención y separación de los productos.” [41]

Existen diferentes tipos de pirólisis, las cuales tienen diferentes condiciones de proceso, favoreciendo así, la generación de diversos productos [40]. El proceso tradicional de pirólisis permite transformar la biomasa en tres productos diferentes: el producto líquido, denominado alquitrán o bioaceite, el producto sólido, más conocido como carbón o char y el producto gaseoso el cual puede ser utilizado como gas combustible. [42]

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. [40]

1.5.3.a. Clasificación de la Pirólisis. Desde el punto de vista operativo y dependiendo de las condiciones del proceso, la pirólisis se puede clasificar en las siguientes categorías:

1.5.3.a.i. Pirólisis Rápida. La pirólisis flash, también conocida como pirolisis rápida debido a la alta velocidad con la que se realiza el proceso, es un proceso continuo que tiene como interés la producción de combustible líquido a partir de biomasa. En este proceso, la biomasa se descompone para generar vapores, aerosoles y una determinada cantidad de coque [40]. Posteriormente, se realiza el debido enfriamiento

y condensación, formando así un líquido de color marrón oscuro conocido como bioaceite, el cual tiene un porcentaje calórico equivalente al 50% del diesel. Para realizar la pirólisis flash es necesario contar con reactores especiales. Para este proceso es necesario contar con reactores especiales, con una atmósfera sin oxígeno y un rango de temperaturas entre 475 y 550°C. [41]

En este proceso, además de la cinética, es importante tener en cuenta los procesos de transferencia de masa y calor, al igual que los fenómenos de cambio de fase [41]. Por otra parte, este es un proceso avanzado en el cual se controlan cuidadosamente diversos parámetros con el fin de obtener altos rendimientos (mayores al 75%) del producto líquido o bioaceite, junto con los subproductos de gas y coque. “Los subproductos podrían ser usados para proveer el calor requerido en todo este proceso, de modo que no haya otros residuos, solo gas de escape y cenizas”. [41]

1.5.3.a.ii. Pirólisis Intermedia. Este proceso se lleva a cabo con temperaturas entre los 300 y 500°C [40]. Las reacciones químicas son fáciles de controlar debido a sus condiciones de operación y se pueden obtener rendimientos de hasta el 55%. A pesar de tener un rendimiento menor a la pirólisis flash, se caracteriza por permitir alimentaciones con grandes tamaños de partícula, ya sea gruesa, triturada o troceada. [40]

1.5.3.a.iii. Pirólisis Lenta. La pirólisis lenta es un proceso que se lleva a cabo a temperaturas entre los 300 y los 700°C, con velocidades de calentamiento lentas y tiempos de reacción que van desde horas hasta días [40]. Las condiciones de este proceso permiten la obtención de productos gaseosos, líquidos y sólidos, sin embargo, su objetivo principal es la producción de combustible sólido mediante carbonización. Por otra parte, este proceso permite altos contenidos de humedad en la alimentación. [40]

1.5.3.a.iv. Torrefacción. La torrefacción es un proceso lento realizado a temperaturas entre los 225 y los 300°C. Se realiza con el objetivo de aumentar la densidad de energía y las propiedades de la biomasa.[40] “El producto final 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 los biopolímeros (celulosa, hemicelulosa, lignina) en volátiles orgánicos". [40]

1.5.3.a.v. Hidropirólisis. La hidropirólisis es un proceso que aún se encuentra en estudio. En este, las reacciones se producen bajo presiones de hidrógeno, lo cual dificulta y minimiza la formación de radicales libres. Además, la cantidad de hidrocarburos insaturados se reduce, lo que aumenta la calidad del bioaceite formado. [40]

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES APROVECHABLES EN LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Debido al crecimiento de la población, las actividades humanas y el desarrollo tecnológico, la producción de residuos sólidos urbanos en todo el mundo ha aumentado. Por esta razón, su composición es cada vez más variable, haciendo que su caracterización sea un proceso complejo.

Con el objetivo de establecer un método de aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos, se hace necesario identificar los componentes presentes en la materia prima, además de los porcentajes en los que se encuentran. Para ello, en primer lugar se analizó la información presente en la Tabla 4, la cual permitió conocer el porcentaje promedio de los materiales presentes en los residuos sólidos para la ciudad de Cartagena.

Tabla 4.

Composición de los residuos sólidos urbanos

Rubro	Colombia (%)
Residuos Alimenticios	77,6
Residuos de Jardinería	-
Textiles	1,6
Cuero y Goma	0,9
Cerámica y Piedra	-
Plásticos	7,7
Papeles y Cartones	5,7
Metales	1
Vidrios	4,2
Pañales	-
Otros	1,3

Nota. Fragmento de tabla. Composición de residuos sólidos en la ciudad de Cartagena, Colombia para el año 2007. Tomado de: M. del C. Hernández-Berriel *et al.*, "Generación y composición de los residuos sólidos urbanos en américa latina y el caribe," *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 32, no. Residuos sólidos, pp. 11–22, Dec. 2016, doi: 10.20937/rica.2016.32.05.02.

La información presentada en la tabla 4 corresponde a un fragmento del análisis realizado para diversos países de América Latina. En Colombia, «el estudio se realizó en Cartagena de Indias en el año 2007. Se seleccionaron cinco barrios dentro de la ciudad, correspondientes a los distintos estratos socioeconómicos existentes (1: Bajo-bajo, 2: Bajo, 3: Medio-bajo, 4: Medio, 5: Medio-alto y 6: Alto) y fueron organizados en tres grupos, teniendo en cuenta que los barrios tuvieran la misma frecuencia de recolección. El tamaño de cada muestra fue de 1000 kg.» [43]

Posteriormente se analizó la información referente a la composición química de los residuos sólidos urbanos que se muestra en la Tabla 5. Cabe destacar que estos datos fueron obtenidos con base a datos bibliográficos (Universidad de Extremadura) referentes al análisis elemental e inmediato de los RSU por parte de sus autores. Con estos datos, fue posible identificar la composición química de cada uno de los elementos presentes en los residuos sólidos urbanos; específicamente Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre e inertes, permitiendo así un mejor análisis del proceso de pirólisis con respecto tanto al balance de materia como de energía, además de los requerimientos técnicos del mismo.

Tabla 5.

Exposición del análisis químico de los componentes de los RSU.

	%C	%H ₂	%O ₂	%N ₂	%S	%inertes	%humedad
Metales	4.54	0.63	4.28	0.05	0.01	90.49	-
Vidrio	-	-	-	-	-	100	-
Papel	44	6.15	41.65	0.42	0.12	7.66	-
Cartón	45.51	6	44.53	0.16	0.13	3.67	-
Madera	49	6	42	-	-	3	-
Plásticos	78	9	13	-	-	-	-
Gomas y Cueros	47.6	6.2	15.8	3.2	1.2	26	4
Textiles	46.19	6.41	41.85	2.18	0.2	3.17	24
Residuos orgánicos	52	6.62	37.55	1.63	0.2	2	72

Nota. Composición química de los residuos sólidos urbanos, de acuerdo con los componentes Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre e Inertes. Tomado de: 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.

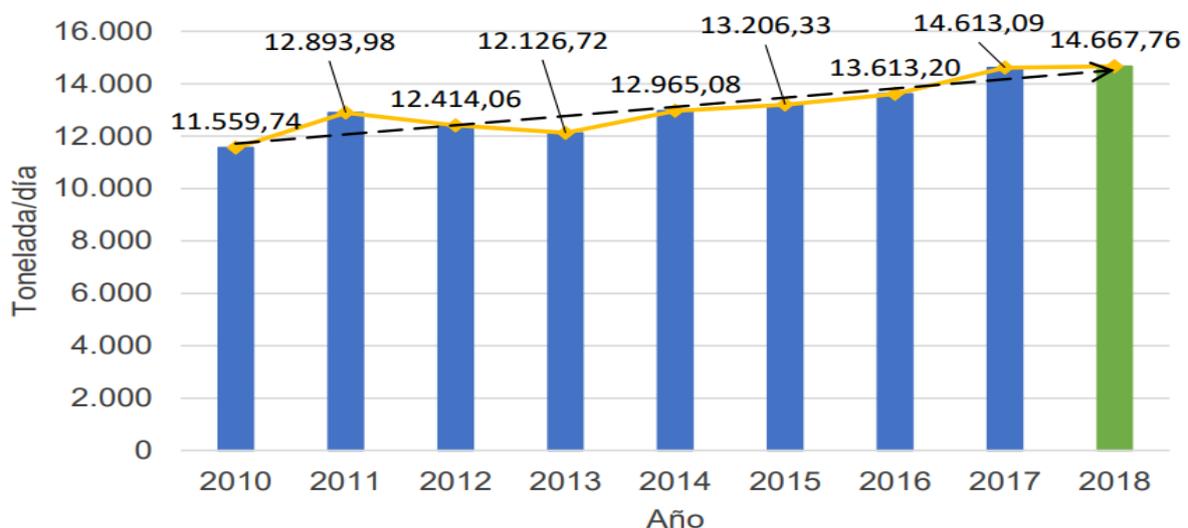
2.1. Disponibilidad de residuos orgánicos en Colombia

El interés en el manejo sostenible de los residuos sólidos ha ido en auge en los últimos años debido a la búsqueda de la disminución de los impactos ambientales, la preservación de los recursos naturales y el aprovechamiento de los biocombustibles que pueden ser generados a partir de la descomposición de dichos residuos [13]. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que los residuos han sido depositados a diferentes periodos de tiempo, teniendo como consecuencia que el tiempo de confinamiento, la composición, el tipo de relleno sanitario y la edad de los residuos, entre otras variables, influyan en la producción de los biocombustibles derivados de las fases de degradación de los residuos. [13]

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 11.275 toneladas de residuos sólidos al día, lo cual equivale al 41% [44] de los residuos totales del país. Por otra parte, en las 28 ciudades capitales del país se generan 5.142 Ton/día (18.7%) [45] y en los 1054 municipios se generan 11.083 ton/ día (40.3%). [44]

Figura 4.

Histórico consolidado de las toneladas promedio diarias dispuestas 2010-2018 para las ocho ciudades con mayor población del país.



Nota. Promedio diario de residuos sólidos dispuestos consolidado para las 8 ciudades con mayor población del país según el Censo 2018. Tomado de: Superintendencia de servicios públicos domiciliarios. (diciembre 2019). "Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos".

En la Figura 4 se evidencia una tendencia general en aumento para las 8 ciudades con mayor población en el país, con algunas variaciones tanto crecientes como decrecientes a lo largo del tiempo analizado. Las fluctuaciones que se presentan en la disposición de los residuos sólidos pueden ser debido a distintos factores. «Si bien, la política e implementación de la actividad de aprovechamiento como parte del servicio público de aseo comenzó en abril 2016, el comportamiento 2016 – 2017 la disposición final incrementó en 7,35%, lo cual puede deberse a que el aprovechamiento se estaba realizando de manera informal. Sin embargo, para el periodo 2017 – 2018 a pesar de tenerse un incremento en la disposición de residuos se evidencia que la variación porcentual fue mínima (0.37%), infiriéndose que esto se pudo deber a las mejoras en la separación en la fuente incentivadas por políticas públicas y el aumento de prestadores de la actividad de aprovechamiento en estas ciudades del país». [23]

De acuerdo con lo anterior, resulta importante profundizar en el conocimiento de la composición de los residuos sólidos a utilizar, de forma que facilite la toma de decisiones con respecto al aprovechamiento de los mismos. Para ello, se hace necesario cuantificar la generación de residuos en barrios, industrias y ciudades, así como poder conocer su calidad, la cual depende del estrato socioeconómico, la ciudad, la densidad poblacional, etc.

Al analizar el documento presentado por la Unidad Administrativa Especial De Servicios Públicos, la Estimación Componentes Físicos De Los Residuos Sólidos Residenciales Para Las 19 Localidades Urbanas de Bogotá, corrobora que los residuos de comida (orgánicos), son el componente generado en mayor cantidad en todos los estratos socioeconómicos [45]. Además, dicho estudio asegura que “a nivel global, los residuos de comida preparada, como no preparada, constituyen aproximadamente el 60% del total de los residuos sólidos generados en la parte urbana de la Ciudad” [45]. Cabe destacar que, de acuerdo con el Decreto 1713 de 2002, esta información se considera como “la determinación de las características cualitativas y cuantitativas de los residuos sólidos, identificando sus contenidos y propiedades”. [18]

La tabla 6 muestra la composición porcentual de los residuos sólidos residenciales por estrato socioeconómico y la ponderada para la Ciudad de Bogotá, corroborando la información presentada anteriormente.

Tabla 6.

Media ponderada de los componentes físicos de los R.S domiciliarios, por estrato socioeconómico y global, Bogotá D.C. 2011.

N°	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	ESTRATO SOCIOECONÓMICO						
			1	2	3	4	5	6	GLOBAL ⁶
1	ALIMENTOS	Alimentos preparados	6,33	8,68	9,56	7,82	4,96	7,85	8,56
		Alimentos no preparados	55,09	53,75	49,88	52,76	48,83	47,46	52,00
2	RESIDUOS DE JARDINERÍA		0,53	0,43	0,81	1,82	1,57	5,15	0,87
3	RESIDUOS DE PAPEL Y CARTÓN		4,97	4,48	8,16	10,12	17,93	8,65	7,10
4	RESIDUOS DE PLÁSTICO	Polietileno	6,86	6,56	6,02	5,48	5,34	5,60	6,20
		Policarbonato	0,17	0,03	0,04	0,02	0,01	0,03	0,04
		Poliestireno rígido	0,29	0,31	0,37	0,31	0,45	0,44	0,34
		Policloruro de vinilo	0,09	0,03	0,04	0,02	0,00	0,03	0,04
		Pet transparente	1,21	0,96	1,76	1,36	1,22	1,06	1,33
		Pet ámbar	0,09	0,09	0,07	0,18	0,05	0,06	0,09
		Pet verde	0,03	0,08	0,06	0,06	0,23	0,18	0,07
		Polipropileno rígido	0,26	0,31	0,28	0,33	0,43	0,65	0,31
		Polietileno de alta dens	0,93	0,71	0,65	0,67	0,90	0,38	0,70
		Polipropileno flexible	1,17	0,81	0,95	0,69	0,56	0,85	0,87
		Icopor	0,23	0,25	0,29	0,51	0,35	0,45	0,30
Otros	0,24	0,21	0,12	0,18	0,02	0,01	0,16		
5	RESIDUOS CAUCHO Y CUERO		1,33	0,42	0,24	0,51	0,13	0,12	0,42
6	RESIDUOS TEXTILES		2,79	2,07	1,88	1,09	1,19	0,53	1,89
7	RESIDUOS MADERA		0,47	0,52	0,14	0,23	0,05	0,10	0,32
8	RESIDUOS METÁLICOS	Ferrosos	0,58	0,57	0,73	0,91	0,54	0,69	0,67
		Aluminio	0,22	0,10	0,10	0,25	0,26	0,26	0,14
		Plomo	0,01	0,00	0,01	0,03	0,30	0,00	0,02
		Cobre	0,00	0,01	0,00	0,00	0,46	0,00	0,02
		Otros	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06	0,00	0,00
9	RESIDUOS DE VIDRIO	Ámbar	0,12	0,05	0,12	1,19	0,22	0,66	0,22
		Transparente	0,55	1,17	1,32	2,57	2,86	4,47	1,46
		Verde y colores	0,71	0,24	0,26	0,62	1,13	1,98	0,40
10	RESIDUOS DE PROD. CERÁMICOS, CENIZA, ROCAS Y ESCOMBROS		0,76	1,68	1,14	0,36	0,23	0,93	1,19

Nota. Composición porcentual de los residuos sólidos residenciales por estrato socioeconómico y la ponderada para la Ciudad de Bogotá. Tomado de: Unidad Administrativa Especial De Servicios Públicos. (diciembre 2011) "Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en la ciudad de Bogotá D.C. 2011."

Con la información anterior, fue posible asegurar en Colombia se producen aproximadamente 27.500 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos, donde más del 60% corresponde a residuos orgánicos, los cuales pueden ser aprovechados con su transformación en gases y sólidos prácticamente inertes, e incluso en biocombustibles, mitigando así el impacto tanto medioambiental como social que tienen al ser desechados en los rellenos sanitarios.

2.2. Estudio de caso: Madrid, Cundinamarca

De acuerdo con lo informado por el viceministro de ambiente Botero, los municipios son los que mayores problemas muestran a la hora de cumplir con los parámetros establecidos en los planes de gestión de residuos sólidos en el país. Además, argumenta que “es muy importante la actualización en el tema de residuos sólidos a través de los planes de gestión, porque se han tenido inconvenientes a la hora de reportar la información”. [46]

Para realizar el diseño del proceso de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos, se tomó como estudio de caso el municipio de Madrid, Cundinamarca, ubicado a 28 km de Bogotá en la provincia de Sabana Occidente, junto con los municipios de Bojacá, El Rosal, Facatativá, Funza, Mosquera, Subachoque y Zipacón. Según registros del DANE, la población del municipio es de aproximadamente 85.050 personas. [47]

El municipio de Madrid, Cundinamarca, es uno de los municipios del departamento que mayor crecimiento ha presentado en los últimos años, tanto poblacional como industrial. De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio, se estima que para 2030 la población actual se duplique, aumentando así la generación de residuos sólidos urbanos y la necesidad de aprovecharlos. [47] Además de esto, este municipio es uno de los diez mayores generadores de desechos en el departamento de Cundinamarca y uno de los pocos que no cuenta con un plan de aprovechamiento de residuos sólidos. [47]

De acuerdo con el *Informe de Gestión Integral de Residuos Sólidos en el Departamento de Cundinamarca*, para el municipio de Madrid, el promedio de

generación de residuos sólidos en el periodo 2018-2019 fue de 1.822 ton/mes [47], los cuales son desechados en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo. Este valor corresponde al 0,22% de los residuos sólidos urbanos producidos en toda Colombia.

La Tabla 7 muestra la caracterización de los residuos en la fuente por sector geográfico, presentada en el documento denominado *Actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) del municipio de Madrid dando cumplimiento a la resolución 0754 de 2014*, el cual fue realizado por la alcaldía municipal a través de dos grupos de trabajo liderados por el Municipio: un grupo coordinador y un grupo Técnico de Trabajo. [48]

Tabla 7.

Generación de residuos en Madrid, Cundinamarca

Parámetro	% en peso por material
Residuos orgánicos	62.4
Papel	5.7
Cartón	3.3
Vidrio	2.6
Plástico	13.2
Metales ferrosos y no ferrosos	1.7
Textiles	2.3
Caucho	0.3
Baterías	0.9
Otros	7.4

Nota. Fragmento de tabla. Caracterización de los residuos en la fuente por sector geográfico, de acuerdo con lo establecido en el título F del RAS en área urbana, para el municipio de Madrid, Cundinamarca. Tomado de: Alcaldía Municipal de Madrid. (2017). “Actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) del Municipio de Madrid dando Cumplimiento a la Resolución 0754 de 2014.”

La selección de este municipio se realizó teniendo en cuenta los problemas tanto de recolección como de manejo y disposición final que presenta, además de la inexistencia de un proceso de aprovechamiento articulado entre los actores del municipio, de acuerdo con lo establecido por la alcaldía municipal [48]. En la Tabla 8 se muestran los principales problemas, los cuales podrían ser mitigados con el desarrollo de este proyecto.

Tabla 8.

Problemas referentes a los RSU en Madrid, Cundinamarca

Número	Problema
P1	Inexistencia de un programa de gestión de RCD
P2	Bajo nivel de asociatividad entre los recuperadores de oficio del municipio
P3	Falencias en la prestación del servicio público de aseo
P4	Inexistencia de un proceso de aprovechamiento articulado entre los actores del municipio
P5	Inadecuado manejo de los residuos sólidos especiales
P6	Falencias en la recolección de residuos sólidos

Nota. Problemas actuales en el municipio de Madrid, Cundinamarca, referentes al manejo y aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos. Tomado de: Alcaldía Municipal de Madrid. (2017). “Actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) del Municipio de Madrid dando Cumplimiento a la Resolución 0754 de 2014”.

2.3. Selección del método térmico de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos

A nivel internacional, existen tres grandes métodos de aprovechamiento energético que se basan en tratamientos térmicos, estos son la incineración, la gasificación y la pirólisis. Cada una de estas tecnologías maneja diferentes condiciones de operación, tal como se mencionaba en el apartado 1.5.

Para llevar a cabo la selección del método térmico de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos, es necesario analizar las diferentes ventajas y desventajas que presentan cada uno de ellos. En la Tabla 9 se presenta una comparación de los tres métodos a analizar, presentada por el estudio *Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada*, donde se evalúan las diferentes ventajas y desventajas que tiene la utilización de estas tecnologías para la gestión integral de los residuos sólidos. [49]

Es importante resaltar que, aunque la incineración ha sido el método más utilizado internacionalmente hasta el momento, la gasificación y la pirólisis también están siendo desarrolladas en los países industrializados.

Tabla 9*Ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos*

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Incineración	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de volumen. • Emisiones controladas. • Aprovechamiento de calor para generación de electricidad y otras. • Alternativa a rellenos sanitarios cuando no hay espacio. • Relativamente silenciosos e inodoros (siempre y cuando se tomen las medidas previstas). 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta inversión inicial. • Costos elevados para evitar contaminación por emisiones. • Dificultad de operación (necesidad de mano de obra especializada). • Posible generación de productos sumamente nocivos para la salud (dioxinas, furanos, metales pesados). • Problemas con las comunidades cercanas al incinerador. • Posibles conflictos con programas destinados a la reducción en la generación de residuos. • Requieren de más energía si se tratan residuos con altos porcentajes de humedad.
Pirólisis	<ul style="list-style-type: none"> • Aprovechamiento de subproductos en otros procesos. • Permite generar productos específicos de acuerdo con las condiciones de operación. • Se evita la formación de compuestos nitrogenados, halogenados y azufrados peligrosos (selección previa de materiales que se ingresan al proceso). • Facilidad de manejo de los productos finales (excepto los líquidos por su alto poder corrosivo y viscosidad). 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de inversión inicial. • Cuidado en la operación para no obtener productos no deseados. • Aún no se cuenta con instalaciones de gran escala. • Los recursos más deseados son separados para fines de reciclaje. • Requieren de más energía si se tratan residuos con altos porcentajes de humedad.
Gasificación	<ul style="list-style-type: none"> • Obtención de un gas de síntesis con varios usos (producción de electricidad, uso como combustible, producción de una amplia gama de químicos). • Facilidad de manejo de los productos obtenidos. • Se evita la formación de compuestos nitrogenados, halogenados y azufrados peligrosos (selección previa de materiales que se ingresan al proceso). 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad de operación. • Experiencias a gran escala limitadas. • Utilización de recursos que preferiblemente son destinados al reciclaje. • Requieren de más energía si se tratan residuos con altos porcentajes de humedad.

Nota. Análisis comparativo de las ventajas y desventajas de los métodos térmicos para el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos. Tomado de: A. Steinvoth, "Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada," *Éxito Empresarial*, No 253, 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_253_240314_es.pdf [Acceso: 24 de marzo 2021]

A través de la información presentada en la Tabla 9, es posible conocer las diferentes ventajas que presenta la incineración de los residuos sólidos urbanos como alternativa para su aprovechamiento, garantizando la utilidad de los productos obtenidos y ayudando al manejo de los residuos presentes en los vertederos. Sin embargo, las desventajas tienen un elevado peso ambiental. Como se mencionaba en el apartado 1.5.1., “desde el punto de vista medioambiental, lo más preocupante es la emisión de gases complejos con propiedades peligrosas, entre ellos dioxinas y furanos, que son productos de la combustión de residuos sólidos urbanos” [37], los cuales son altamente nocivos para la salud. Además de esto, la incineración origina costos adicionales a la ejecución del proceso, puesto que es necesario controlar la contaminación emitida.

Por otra parte, la pirólisis es un método que permite obtener diferentes tipos de productos dependiendo las condiciones de operación con las que se trabaje, siendo esta una gran ventaja, puesto que se puede adaptar a los requerimientos de distintos tipos de procesos. De acuerdo con lo mencionado en el apartado 1.5.3., el proceso tradicional de pirólisis permite transformar la biomasa en tres productos diferentes: el producto líquido, denominado alquitrán o bioaceite, el producto sólido, más conocido como carbón o char y el producto gaseoso el cual puede ser utilizado como gas combustible [42], siendo estos de amplio valor comercial y con una gran variedad de usos en la industria. Sin embargo, es necesario tener precaución con la generación de subproductos no deseados. A pesar de que actualmente no se cuenta con instalaciones a gran escala, es posible innovar en este aspecto.

Finalmente, la gasificación únicamente permite obtener un producto gaseoso, de acuerdo con lo mencionado en el apartado 1.5.2., donde se indica que “en el proceso de gasificación, la materia prima en forma de carbón, madera u otros materiales se calienta en presencia de gases reactivos, y la mayor parte del carbono presente en la materia prima se convierte en una mezcla de gases, incluido el metano (el componente principal del gas natural) e impurezas más un residuo inerte”. [39] A pesar de que este gas, el cual es considerado gas de síntesis, es muy versátil en el campo industrial, el proceso de obtención posee una alta complejidad de operación y se ve poco viable llevar este proceso a gran escala.

Cabe destacar que estos métodos térmicos para el tratamiento y aprovechamiento de residuos sólidos son utilizados como una medida de apoyo en la gestión integral de los mismos y no como un fin en sí. Antes de su transformación en biocombustibles, es necesario promover las actividades de recuperación de materiales reciclables, además de que el vidrio y los metales son componentes no deseables en este tipo de tratamientos. [49]

Con el fin de determinar el mejor método de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos, se realizó el análisis de la información anterior, teniendo en cuenta los parámetros de Seguridad, el Aspecto Operacional, los Costos de inversión y operación y el Impacto ambiental. Para ello, se asigna una calificación a cada uno de los métodos, teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente.

Para el método de selección se estableció una calificación de 4 para Excelente, 3 para Bueno, 2 para Regular y 1 para Malo o Nulo. Además, se dio la misma importancia a todos los parámetros estudiados, por lo tanto, se asignó una ponderación del 25% a cada uno de ellos. En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 10.

Calificación y ponderación de los tratamientos térmicos según los parámetros establecidos

Método	Parámetros				Resultados
	Seguridad	Operacional	Costos	Ambiental	
Incineración	1	2	1	1	1,25
Pirólisis	3	3	2	4	3
Gasificación	3	1	3	4	2,75

Nota. Calificación por puntos para la selección del método de aprovechamiento térmico de residuos sólidos urbanos.

Con el análisis previo, fue posible determinar que el método térmico de aprovechamiento de residuos sólidos que mejor se adapta a los objetivos de este proyecto y es el más conveniente a nivel técnico e industrial es la pirólisis, la cual,

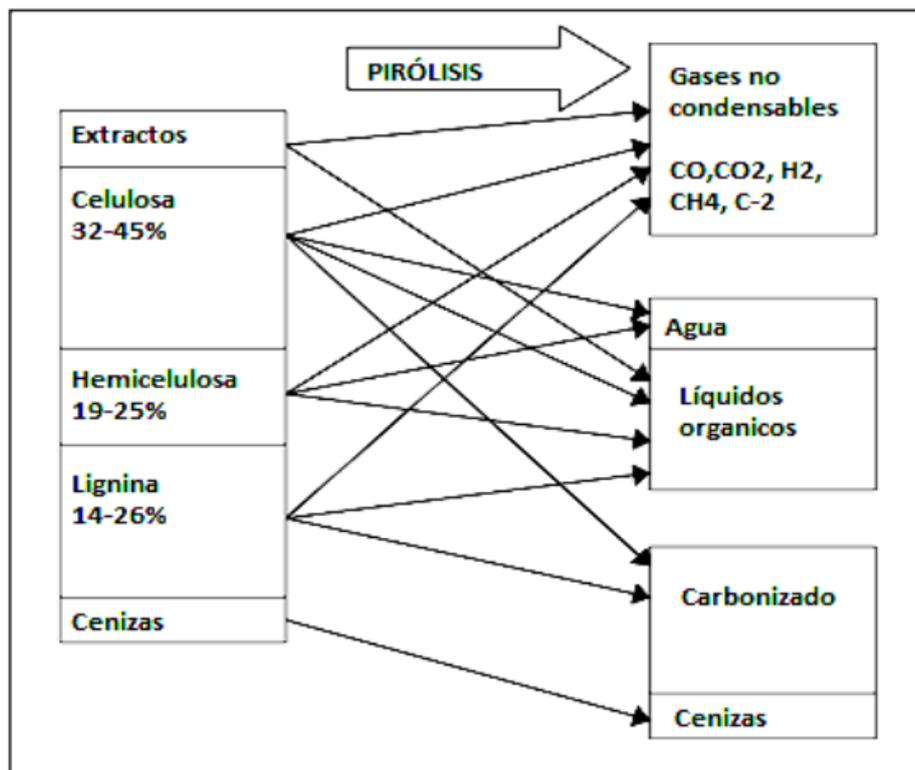
además de presentar diversos productos con un amplio valor comercial, permite innovar en el campo industrial.

2.4. Componentes aprovechables en los residuos sólidos orgánicos

Los residuos orgánicos, además de ser biodegradables, tienen la capacidad de desintegrarse con facilidad, convirtiéndose en otra materia orgánica, por esta razón, son aprovechables en su totalidad. “Entre los residuos sólidos generados en las ciudades, cerca de 40 % son materiales celulósicos o lignocelulósicos que, en su mayoría, no reciben tratamiento alguno, como los pañales desechables usados y el pasto cortado de los jardines” [50]. La figura 5 muestra los productos que se pueden obtener a partir de los componentes aprovechables de la biomasa.

Figura 5.

Productos de la pirólisis de biomasa



Nota. Productos obtenidos a partir de la pirólisis de celulosa, hemicelulosa y lignina, respectivamente. Tomado de: J. I. Montoya Arbeláez et al., *Pirólisis de biomasa*, 1st ed. Diciembre. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2014

De acuerdo con la caracterización de los residuos sólidos en Colombia analizada anteriormente, es necesario conocer con exactitud los componentes que pueden ser aprovechables a la hora de realizar el proceso de pirólisis, los cuales serán transformados en el producto final. Esto permite tener claridad en el proceso que se llevará a cabo dentro del reactor, además de el correcto acondicionamiento de las materias primas.

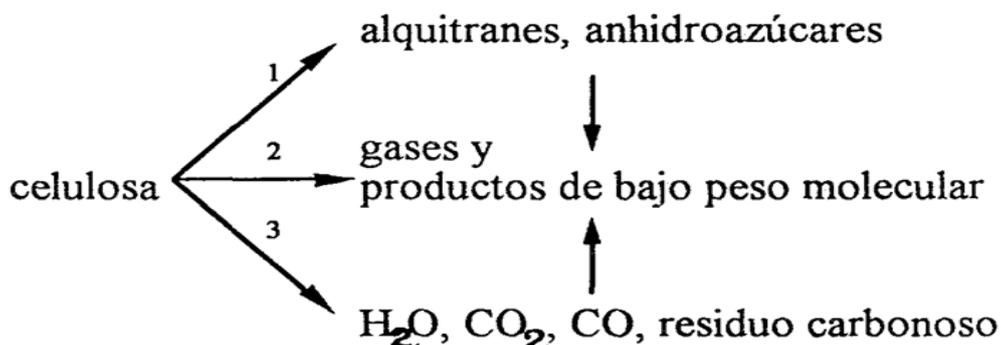
2.4.1. Pirólisis de la Celulosa

La celulosa es la fuente de carbono renovable más abundante del planeta, presente en gran cantidad en fibras vegetales y madera [51]. Es sintetizada en su mayoría por las plantas a través de la fotosíntesis [51], siendo un polímero natural que tiene como estructura base los enlaces 1,4- β glucosídicos [52]. “La celulosa es un polisacárido sintetizado en gran cantidad por las plantas, constituye entre el 35 y el 50% del peso seco de estas, y también es sintetizado por bacterias y una variedad amplia de algas”. [51]

Tradicionalmente, se utilizan diferentes tipos de procesos físicos, mecánicos y químicos para separar la celulosa, dependiendo del nivel de tamaño o del tipo de pureza requerida, tiene lugar una remoción sucesiva de los compuestos no celulósicos presentes o la reducción de tamaño, debido a la estructura jerárquica en la que se está [52]. Para estudiar el mecanismo de pirólisis de la celulosa, se han realizado diversas investigaciones. “El componente celulósico es el mismo en todos los tipos de biomásas, una macromolécula formada por unidades D-glucopiranosas ligadas linealmente por enlaces β - (1 \rightarrow 4), diferenciándose, únicamente en el grado de polimerización” [53]. A continuación se muestra el mecanismo de pirólisis de la celulosa propuesto por Shafizadeh:

Figura 6.

Mecanismo de pirólisis de celulosa propuesto por Shafizadeh.



Nota. Productos obtenidos de acuerdo con el mecanismo de reacción de la celulosa en el proceso de pirólisis. Tomado de: A. N. García C., *Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos*, tesis doc. Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, España, 1993.

«La reacción 3 predomina a temperaturas bajas (por debajo de 300 °C), supone la reducción del grado de polimerización de la molécula por rotura de enlaces, aparición de radicales libres, eliminación de H₂O, formación de grupos carbonilos y carboxilos, evolución de CO y CO₂ y, finalmente, producción del residuo carbonoso. A temperaturas superiores a 300 °C, la celulosa se descompone por un camino alternativo produciendo un pirolizado de alquitranes que contiene levoglucosano (1,6-anhidro β-D-glucopiranos), otros compuestos de anhidroglucosa, oligosacáridos unidos aleatoriamente y productos de descomposición de la glucosa (reacción 1)[...] Además de los compuestos mencionados, el pirolizado contiene cantidades menores de los productos formados a partir de la deshidratación de las unidades de glucosa: furfural, levoglucosenona, derivados del furano y del pirano. Estos productos de deshidratación son muy importantes como intermediarios en la formación del residuo carbonoso». [53]

Por otra parte, a una temperatura superior a 500°C, el proceso de pirólisis da como resultado “reacciones de fisión, deshidratación, desproporción, descarboxilación y descarbonilación, lo que produce una mezcla de volátiles y gases de bajo peso molecular (reacción 2). Estos productos también se forman a partir de reacciones secundarias de alquitranes y por interacciones a altas temperaturas del residuo carbonoso con H₂O y CO₂”. [53]

2.4.2. Pirólisis de la Lignina

La lignocelulosa es el componente principal de las paredes celulares de las plantas, esta biomasa producida por fotosíntesis es la fuente de carbono renovable más prometedora para resolver los problemas actuales de energía y materias prima [54]. Se puede pensar en la lignina como una red polimérica tridimensional aleatoria compuesta por unidades de fenilpropano unidas entre sí en diferentes posiciones [54]. Por las razones anteriores, es imposible determinar cuál es la estructura exacta de la lignina, pero en todas las estructuras de lignina propuestas, parece evidente que existe un alto contenido de núcleos aromáticos. La lignina es la segunda fuente renovable más abundante que existe en la naturaleza después de la celulosa. [54]

Entre algunos de los recursos naturales existentes, los materiales lignocelulósicos juegan un papel muy importante debido a la disponibilidad de este subproducto y las diferentes fuentes agrícolas e industriales que lo producen [54]. Además, debido al inminente agotamiento de los recursos petrolíferos en el mundo, es necesario encontrar nuevas tecnologías que utilicen recursos renovables como la biomasa lignocelulósica. [54]

«La pirólisis de la lignina, componente térmicamente más estable, da lugar a compuestos aromáticos y más carbón que la celulosa [...]. Se producen reacciones de despolimerización, deshidratación y descarbonilación, pérdida de sustituyentes alifáticos, desmetoxilación, reagrupamiento de radicales libres y restos de crackeo [...].

Cuando la lignina se elimina de la biomasa por oxidación selectiva, deja una combinación de celulosa y hemicelulosa llamada *Holocelulosa*. Alternativamente, el componente hemicelulósico podría ser eliminado por hidrólisis controlada, dejando una combinación de celulosa y lignina llamada Lignocelulosa». [53]

2.4.3. Pirólisis de la Hemicelulosa

El término Hemicelulosa es utilizado para designar a un grupo muy variado de heteropolisacáridos presentes en las paredes celulares de diversas plantas, el cual

compone más de un tercio de la biomasa de dichas estructuras. “Los xilanos son los componentes principales de las hemicelulosas contenidas en las maderas duras y en las plantas herbáceas, mientras que las hemicelulosas que contienen mananos como componentes mayoritarios (glucomananos o galactoglucomananos) son típicas de las maderas blandas”. [55]

Por otra parte, debido a que las células vegetales están compuestas en un tercio por hemicelulosas, en la actualidad se ha evidenciado bastante interés acerca de la producción de biocombustibles (entre otros compuestos químicos) utilizando como materia prima la hemicelulosa, además de otros polisacáridos. Además, es necesario tener en cuenta que, a diferencia de la celulosa, que forma microfibrillas compactas, la hemicelulosa tiene una estructura bastante amorfa y es soluble en soluciones acuosas. [55]

«La hemicelulosa es el componente más sensible a la temperatura, descomponiéndose en el rango de 200 a 260°C.[...] Se ha propuesto que la degradación de esta macromolécula tiene lugar en dos etapas: Descomposición del polímero en agua y fragmentos solubles, seguidos por una conversión de los monómeros en volátiles [...]. En comparación con la celulosa, las hemicelulosas producen más gas, menos alquitrán pesado y la misma cantidad de destilado acuoso». [53]

3. PARÁMETROS DE LA PIRÓLISIS PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS

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 [38]. Dichos productos se conocen como char, bioaceite y gas, cuya producción dependerá de las variables y/o parámetros del proceso.

3.1. Variables que afectan el proceso de pirólisis

Entre las variables de proceso que más influyen en la pirólisis, es posible destacar el tipo de biomasa, el perfil tiempo-temperatura y la atmósfera, siendo las dos últimas las más importantes.

Tipo de Biomasa:

- Composición orgánica
- Cantidad de ceniza
- Humedad
- Forma y tamaño de las partículas
- Propiedades térmicas de la biomasa

Perfil Tiempo - Temperatura:

- Tasa de calentamiento
- Temperatura máxima
- Tiempo de residencia

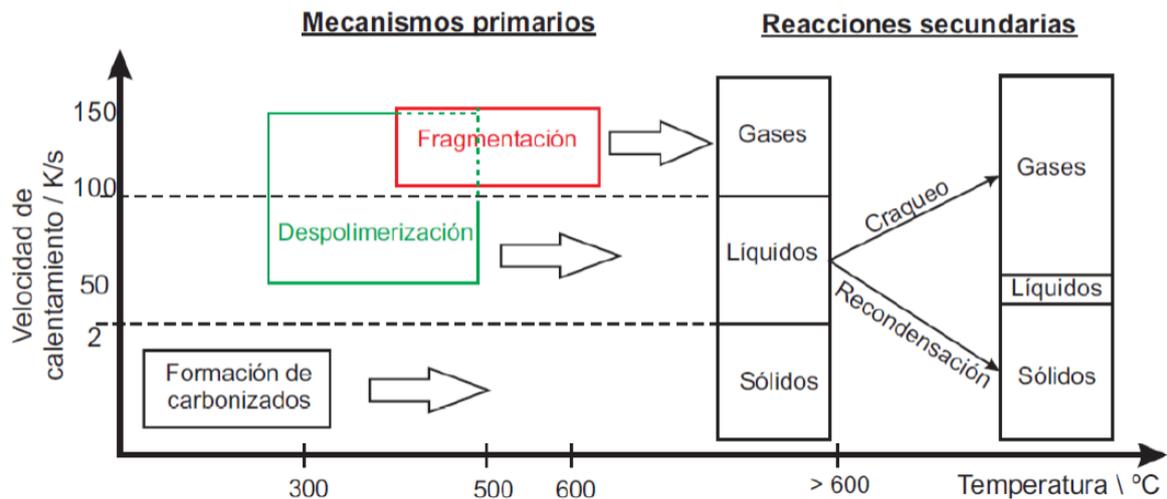
Atmósfera:

- Atmósfera Inerte
- Presión

Al manejar de manera correcta las variables de proceso mencionadas, es posible optimizar o maximizar la fracción del producto deseado, ya sea el sólido, líquido o gaseoso.

Figura 7.

Distribución de los productos de pirólisis



Nota. Distribución de los productos de la pirólisis de acuerdo con la velocidad de calentamiento y temperatura de operación. Tomado de: Dr-Ing. Libardo Mendoza Geney.

La Figura 7 muestra la relación gráfica entre la tasa de calentamiento y la temperatura del proceso. Cuando se trabaja con bajas tasas de calentamiento y altas temperaturas, se maximiza la producción de la fracción sólida. Por otra parte, para la generación de líquidos, es necesario incrementar la tasa de calentamiento y llevar la temperatura hasta 500°C, obteniendo una reacción de despolimerización y maximizando así la producción de la fracción líquida. Finalmente, para maximizar la fracción gaseosa, es necesario trabajar con temperaturas altas (hasta 600°) y altas tasas de calentamiento.

Es necesario mencionar que, a temperaturas mayores a los 600°C y altas tasas de calentamiento, se dan reacciones de craqueo, las cuales consisten en un proceso químico por el cual un compuesto se descompone o fracciona en compuestos más simples. Por otra parte, si se trabaja con bajas tasas de calentamiento y temperaturas mayores a 600°C, los productos se condensan generando material particulado.

En general, la pirólisis es un proceso de descomposición térmica de biomasa en ausencia de oxígeno en el rango de temperaturas de 300 ° C a 600 ° C. Así mismo se considera el paso previo a procesos como la gasificación o la combustión.

Por ejemplo, la pirólisis lenta se realiza a bajas temperaturas comprendidas entre 300 °C y 500 °C, con velocidades de calentamiento menores a 100 °C/min. Estas condiciones permiten la producción de carbonizado con un alto rendimiento, este mismo puede ser utilizado como combustible sólido de fácil transporte o distribución, o en otros casos, como precedente de productos de alto valor, como el carbón activado o biocarbón [56]. Los combustibles sólidos, se pueden utilizar en procesos posteriores de combustión o gasificación sólo si poseen un poder calorífico mayor que la biomasa utilizada originalmente. Por otro lado, aunque los gases obtenidos no constituyan el principal producto del proceso y muchas veces no se utilicen, también tienen potencial para ser aprovechados tanto en aplicaciones energéticas como insumos para la industria química. [56]

3.2. Parámetros de operación para el proceso de pirólisis

De acuerdo con las variables de proceso mencionadas anteriormente, es posible determinar los diferentes parámetros de operación del proceso de pirólisis según los productos que se desea obtener. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que dichas variables dependen también del tipo de pirólisis que se trabaje.

Así mismo, existen procesos previos al utilizar residuos sólidos urbanos como materia prima, esto con el fin de mantener los parámetros de operación similares a los desarrollados anteriormente en proyectos experimentales [57]. Estos procesos consisten en el pretratamiento de la alimentación, de tal forma que se logre eliminar los metales y vidrio que se encuentren en los residuos. Por otra parte, se puede encontrar necesario llevar a cabo proceso de separación, reducción de tamaño o densificación de los mismos. [57]

“La temperatura de operación habitual en un proceso de pirólisis es de 350-850 °C. Este proceso requiere de una fuente de calor externa para mantener la temperatura de operación adecuada” [57]. A continuación, se muestra la tabla 11, donde se relacionan los principales parámetros de operación para los procesos de pirólisis lenta, rápida y flash.

Tabla 11.*Parámetros de operación de los procesos de pirólisis*

Proceso	Tiempo de Residencia	Velocidad de Calentamiento	Temperatura (°C)	Productos
Carbonización	Días	Muy lenta	400	Biocarbón
Pirólisis Lenta	5 - 60 min	Lenta	450 - 500	Gas, líquido y biocarbón
Pirólisis Rápida	0.5 - 5 seg	Rápida	650	Bioaceites
Pirólisis Flash	< 1 seg	Muy rápida	< 650	Bioaceites y gas
Pirólisis Ultrarrápida	< 0.5 seg	Muy rápida	1000	Químicos y gas
Hidropirólisis	< 10 seg	Rápida	< 500	Bioaceites
Metanopirólisis	< 10 seg	Rápida	> 700	Químicos

Nota. Condiciones de operación de los distintos tipos de pirólisis, en donde se tiene en cuenta el tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento, la temperatura de reacción y los diferentes 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.

3.3. Rendimiento

Según la composición de los residuos sólidos urbanos a tratar, además de la tecnología de pirólisis que se utilice, es posible afirmar que la cantidad de productos y su respectivo rendimiento serán diferentes [56]. “El rendimiento de los productos de la pirólisis depende en gran medida de la naturaleza de la materia prima utilizada y de los parámetros del proceso, como temperatura, tasa de calentamiento, tamaño de partícula, tiempo de residencia, entre otros”. [56]

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 [57]. A continuación, se muestra la comparación entre los rendimientos aproximados obtenidos en el estudio para las diferentes fracciones de producto tanto para el proceso de pirólisis lenta, como rápida y flash.

Tabla 12.

Comparación de rendimientos de las fracciones obtenidas en función del tipo de pirólisis

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. Rendimiento de los productos obtenidos en cada uno de los procesos de pirólisis. 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.

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. [57]

3.4. Reactores pirolíticos

Como se ha mencionado anteriormente, la pirólisis es un proceso en el cual se tienen en cuenta tanto la temperatura como la presión para su funcionamiento. Con el paso del tiempo se ha llegado a la conclusión de que al realizar cambios en dichos parámetros de operación, se obtienen diferentes tipos de pirólisis, las cuales se realizan en diferentes reactores.

Existen diferentes tipos de reactores en donde se logra llevar a cabo la reacción pirolítica, estos varían en cuanto al diseño, la instalación y el pretratamiento de la

materia prima [57]. La elección del tipo de reactor de pirólisis depende de los productos que se quieran obtener.

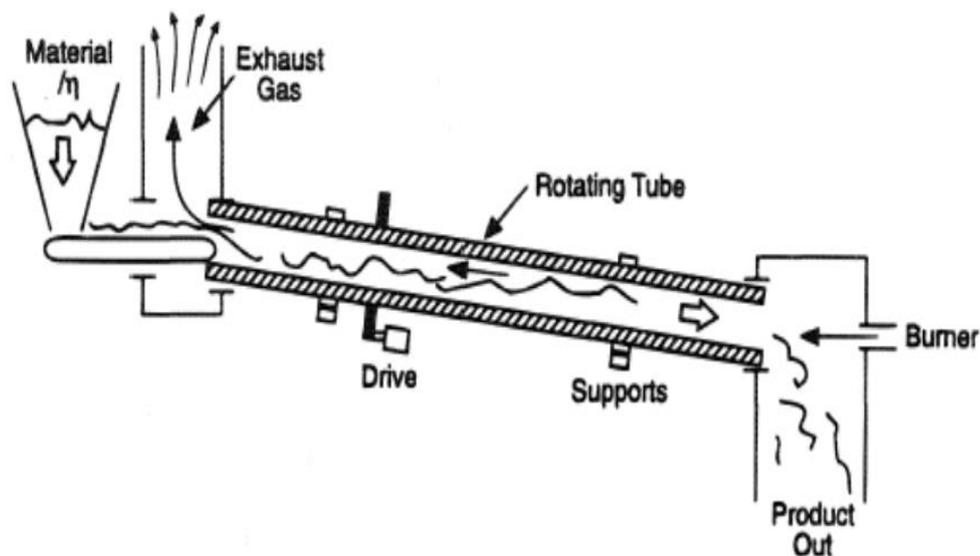
3.4.1. Reactores para pirólisis lenta

3.4.1.a. Horno Rotatorio. El reactor más apropiado para realizar una de pirólisis lenta es un horno rotatorio. Éste es un horno de acero con forma cilíndrica, el cual va girando con el fin de tener un proceso uniforme en el que los residuos se van mezclando, además de un intercambio de calor con mayor eficiencia [38]. Este equipo suele tener una inclinación entre 1 y 10° para favorecer el avance de los residuos. [38]

El horno rotatorio suele encontrarse ubicado justo antes del cuerpo de recuperación de calor en forma de aceite térmico, agua o vapor, al que le cede todo el calor generado por la biomasa o residuo [58]. En la figura 8 se muestra un esquema representativo de este tipo de reactor.

Figura 8.

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.

En el momento de seleccionar la configuración del sistema de combustión del horno rotatorio es importante tener en cuenta algunas características del proceso, tales como el tipo de biomasa o residuo, además de los requerimientos del proceso. [58]

“Entre las configuraciones posibles estarían:

- Sistema de alimentación de combustible mediante empujador hidráulico o tornillo sinfín
- Extracción automática de cenizas en vía seca o en vía húmeda
- Parrilla de recombustión
- Con cámara de post-combustión” [58]

3.4.2. Reactores para pirólisis rápida y flash

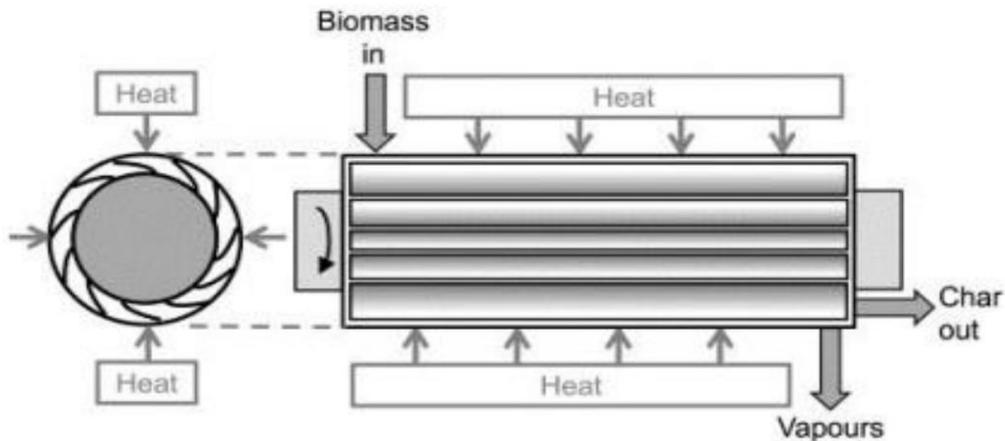
3.4.2.a. Reactor ablativo. En el reactor ablativo el aporte de calor a las partículas de biomasa es por medio del contacto con una pared caliente [59]. La velocidad en el proceso de pirólisis se encuentra limitada por la transmisión de calor en la parte interior de la partícula de biomasa, en la que se desplaza hacia el centro un frente de pirólisis. [59]

Para aumentar la velocidad anteriormente mencionada, se debe reducir el tamaño de la partícula facilitando la presión a la que entran en contacto con la pared del reactor, lo que se logra mediante una fuerza mecánica o centrífuga, favorecida por la disposición de cono rotatorio [59]. Cabe destacar que este tipo de reactor reduce los costos del proceso al reducir las necesidades de un agente fluidizante. [59]

También se entiende como un reactor que utiliza la fuerza centrífuga para lograr altas velocidades de impacto de las partículas de los desechos orgánicos [59], que se descomponen con las paredes del mismo; “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” [38]. A continuación, se muestra el esquema representativo de este tipo de reactor:

Figura 9.

Esquema reactor ablativo



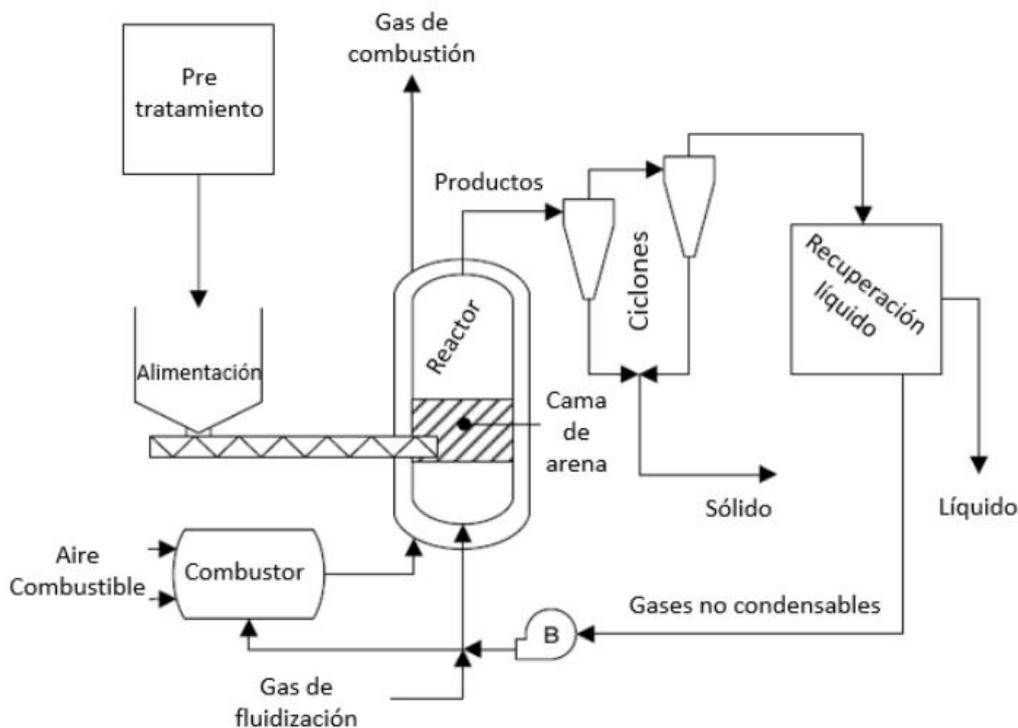
Nota. Reactor ablativo empleado en los procesos de pirólisis rápida y pirólisis flash. Tomado de: M. Cortázar Dueñas, *Estudio comparativo de tecnologías comerciales de valorización de residuos sólidos urbanos*, tesis pre. Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, España, 2014.

3.4.2.b. Reactor de lecho burbujeante. El reactor de lecho burbujeante, también conocido como BFB por sus siglas en inglés, 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 [57]. Por otra parte, el tiempo de residencia del vapor y del sólido está controlado por el agente de fluidización [57], 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. [57]

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 [60]. Es necesario destacar que este tipo de reactor “se comporta como un líquido efervescente de baja viscosidad. De este modo, la forma de las burbujas es parecida en ambos casos: casi esféricas las de pequeño tamaño, alargadas y deformadas cuando crecen, y esféricas con forma de tapón las de mayor tamaño”. [60]

Figura 10.

Esquema de proceso con reactor BFB



Nota. Esquema de proceso para el reactor de lecho burbujeante empleado en los procesos de pirólisis rápida y pirólisis flash. Tomado de: W. D. Fonseca J., *Evaluación de un reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta*, tesis post. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2016.

En este tipo de reactor, la materia prima “es alimentada a un reactor vertical que contiene una cama de arena caliente. Un flujo de un gas inerte es usado para fluidizar la arena, simultáneamente el gas cumple la función de homogeneizar la mezcla para mejorar las condiciones de transferencia de calor y facilitar las reacciones que ocurren en el proceso” [60]. Con respecto a los métodos de calentamiento, generalmente se hace uso de resistencias, aunque en ocasiones también se hace uso de los productos obtenidos. [60]

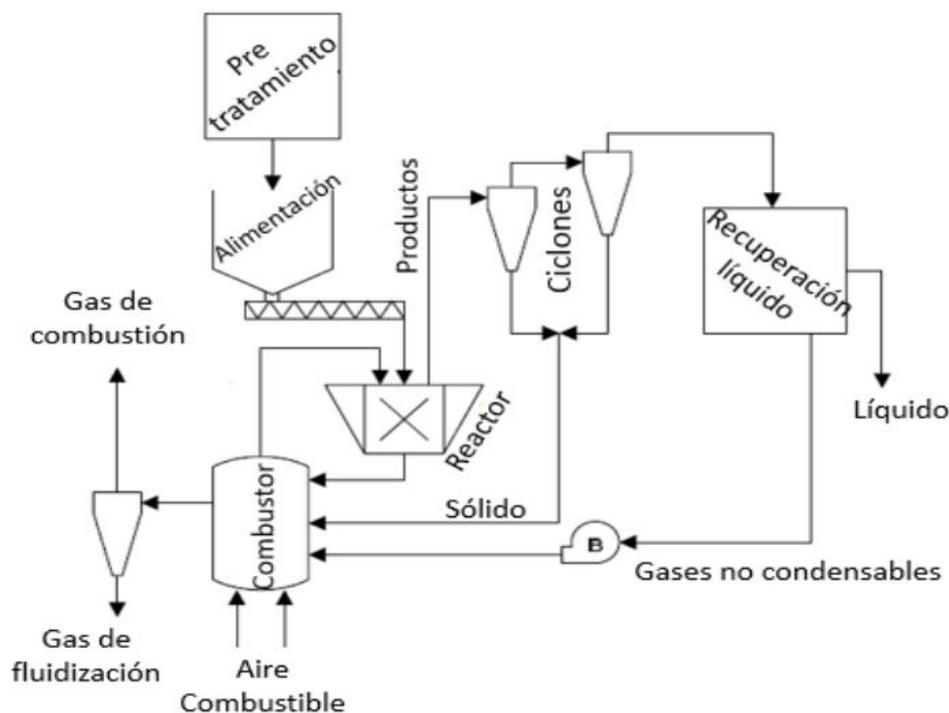
3.4.2.c. Reactor cónico rotatorio. En el reactor de cono rotatorio, las partículas, en este caso, de residuos sólidos, son alimentadas al fondo de un cono junto con un exceso de partículas calientes de arrastre [61]. El mecanismo de este reactor se logra debido a la fuerza centrífuga que obliga a las 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%. [61]

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 [60]. Por otro lado, algunas desventajas son la dificultad de escalar y operar, e incluso involucra problemas de combustión [60]. A continuación, se detalla el esquema del reactor correspondiente:

Figura 11.

Esquema reactor de cono rotatorio



Nota. Esquema de proceso para el reactor de cono rotatorio empleado en los procesos de pirólisis rápida y pirólisis flash. Tomado de: W. D. Fonseca Jaramillo, *Evaluación de un reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta*, tesis post. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2016.

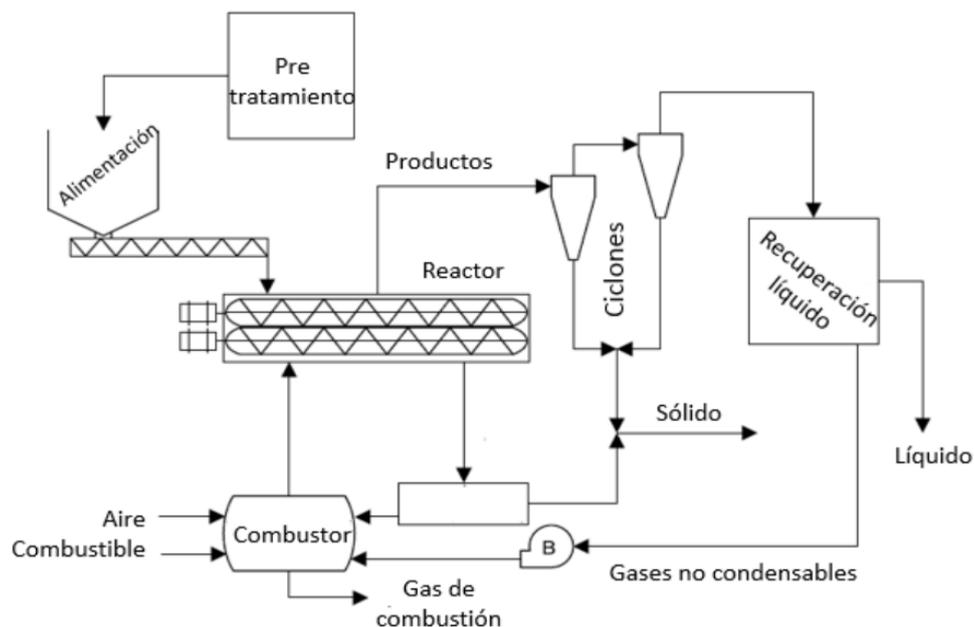
“El reactor de cono rotatorio está compuesto por un recipiente de reacción vertical donde una cama de materia prima permanece bien mezclada debido al gas de fluidización. La materia prima es mezclada usando un cono rotatorio con un sólido como medio de calentamiento”. [60]

En comparación con el reactor ablativo, el reactor cónico rotatorio tiene una mejor calidad de la mezcla durante el procesamiento, por lo que se permite un proceso de calentamiento más rápido, reduciendo así el tiempo de residencia del gas y, por consiguiente, la cantidad de biocarbón sea casi la más pequeña. [38]

3.4.2.d. Reactor de Tornillo sin fin. Al igual que el sistema de cono rotatorio en un reactor de tornillo sin fin las materias primas y los sólidos se mezclan para calentar la muestra. La característica más destacada en este tipo de reactor es la ausencia de un gas de fluidización [60]. El proceso es llevado a cabo en un recipiente horizontal donde es ubicado el tornillo sin fin como se muestra en la figura 12. La corriente de producto del reactor pasa a través de un sistema ciclónico que separa la fase gaseosa de los sólidos, y se utiliza como combustible en un sistema de combustión que se ejecuta simultáneamente con el proceso. [60]

Figura 12.

Esquema reactor de tornillo sin fin.



Nota. Esquema de proceso para el reactor de tornillo sin fin empleado en los procesos de pirólisis rápida y pirólisis flash. Tomado de: W. D. Fonseca Jaramillo, *Evaluación de un reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta*, tesis post. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2016.

Estos reactores de tipo tornillo, son relativamente novedosos en comparación a los anteriormente mencionados [62]. Su principal ventaja 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 [62]. 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. [62]

3.4.3. Otros reactores pirolíticos

Además de los diferentes reactores pirolíticos mencionados anteriormente, para el proceso de pirólisis también es posible utilizar diferentes reactores químicos, los cuales deben estar equipados con los elementos de transferencia de calor necesarios para que se lleve a cabo la pirólisis.

Reactor Batch: este tipo de reactor se caracteriza por disponer de un depósito cubierto por una chaqueta calefactora, además de un dispositivo de agitación mecánico en la mayoría de los casos.[62] Sin embargo, por su método de operación suelen ocurrir reacciones secundarias como aromatizaciones o ciclaciones, lo cual afecta el proceso generando productos secundarios. [62]

Reactor Semibatch: este tipo de reactor es bastante similar al anteriormente mencionado, con la diferencia de que tiene un flujo de gas inerte que generalmente es el nitrógeno y por esto es capaz de desplazar y guiar a los compuestos volátiles generados a otros sectores del equipo, aminorando las reacciones secundarias [62]. Además, los reactores semi-batch junto con los batch, reducen la efectividad del catalizador, haciendo que los rendimientos se mantengan similares entre las reacciones térmicas y las catalíticas. [62]

Reactor de Lecho Fijo: el reactor de lecho fijo es un equipo principalmente utilizado para reacciones catalíticas heterogéneas, donde el catalizador se mantiene en una posición fija. A través de dicho catalizador (lecho), se hace circular el reactivo, ya sea en estado líquido o gaseoso, dando como resultado la degradación del catalizador

[62]. A pesar de su amplio uso en la industria, este equipo presenta múltiples desventajas a la hora de realizar procesos que involucran reacciones pirolíticas con residuos orgánicos. [62]

4. DISEÑO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE RSU

Con un diseño adecuado y la inversión necesaria, los residuos sólidos urbanos acumulados en los rellenos sanitarios pueden dejar de representar una amenaza para la salud pública, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y convertirse en fuentes de energía, lo que ayuda a recuperar los costos de la disposición. Además, a través de los esfuerzos para recolectar y utilizar las emisiones de los rellenos sanitarios, es posible organizar toda la cadena de generación, recolección y disposición de residuos, incluida la separación, organización, provisión y normalización de las condiciones de trabajo digno, planificación a largo plazo de la eliminación de residuos y desarrollo de todas las infraestructuras relacionadas para minimizar el impacto económico, social y ambiental de los residuos sólidos urbanos.

Para el diseño del proceso de pirólisis para la producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos, es necesario en primer lugar determinar el tipo de operación a la cual se llevará el proceso (pirólisis lenta, rápida o flash). De acuerdo con las investigaciones y planteamientos realizados anteriormente, se ve viable emplear la pirólisis rápida en la transformación de residuos sólidos urbanos a biocombustibles, puesto que este tipo de pirólisis posee rendimientos altos para los tres productos deseados.

Por otra parte, es bien sabido que la pirólisis rápida se caracteriza por tener una alta producción principalmente del producto líquido. Además de esto, permite obtener un gas rico y carbón vegetal, mientras que en la pirólisis lenta se obtiene una menor cantidad de combustible líquido y un gas pobre. [63]

En cuanto a la pirólisis flash, este procedimiento es principalmente utilizado únicamente para la producción de biogás, ya que los rendimientos para el producto líquido y el producto sólido son inferiores al 10%. Al tener tiempos de reacción tan cortos, es un proceso de difícil operación y poco utilizado a nivel industrial.

4.1. Etapas del proceso de pirólisis

Debido a que los residuos sólidos urbanos tienen una gran diversidad de materiales, no suelen ser adecuados para el tratamiento a través de un proceso de pirólisis, “esto es debido a que los RSU contienen materiales inorgánicos como metales y vidrio que no participan en las reacciones de degradación, por lo que se malgasta energía calentando dichos materiales, reduciendo así la eficiencia global del proceso” [57]. Con el fin de eliminar estas desventajas, se hace imprescindible realizar un pretratamiento a la alimentación, donde se eliminan principalmente los metales y el vidrio presente en los residuos. Por otra parte, se debe tener en cuenta que el alto contenido de humedad de los residuos puede disminuir su poder calorífico, razón por la cual los RSU deben ser secados antes de ingresar al reactor. Además, también puede ser necesario disminuir el tamaño de partícula, dependiendo del tipo de reactor que se utilice. [57]

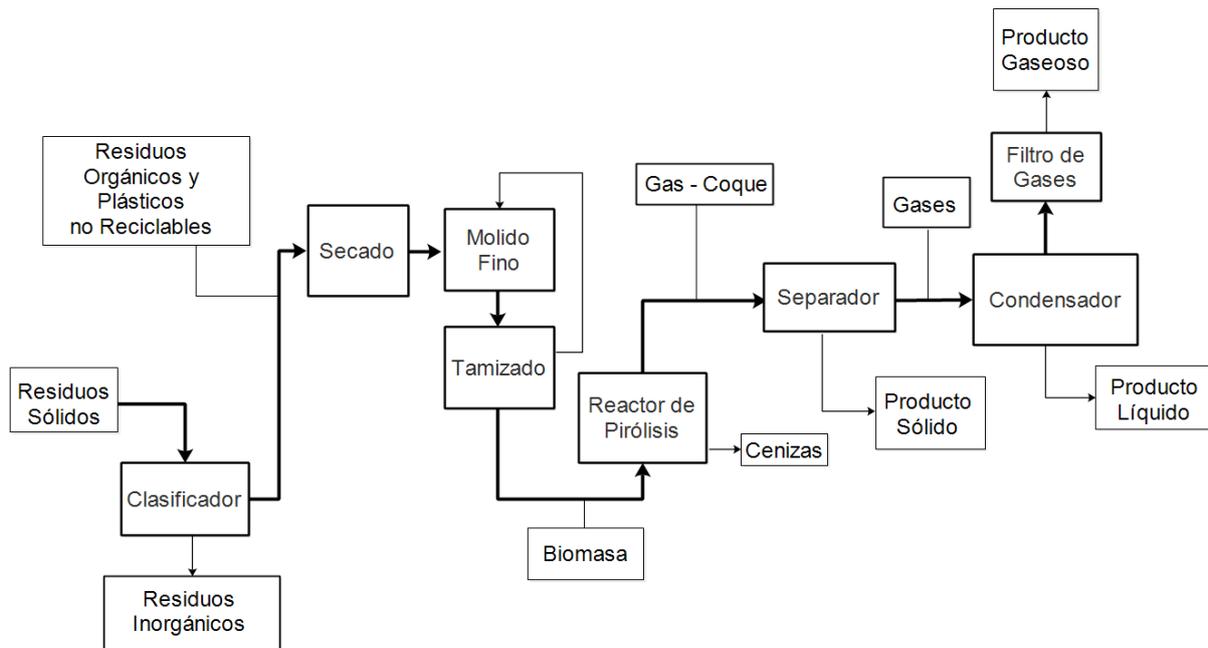
El proceso de aprovechamiento de residuos sólidos no solo requiere del reactor de pirólisis, sino que, previo a la reacción, es necesario de realizar una adecuada selección componentes aptos para el proceso, separándolos de los elementos que pueden causar toxicidad o no son adecuados para el sistema. Dichos elementos pueden ser los residuos clasificados como residuos orgánicos, además de aquellos plásticos y polímeros no reciclables o que no pueden ser reutilizados. Posterior a esto, es preciso realizar el secado de los desechos, con el fin de eliminar el exceso de humedad presente en los mismos y finalmente, controlar el tamaño de partícula de acuerdo con los requerimientos del reactor pirolítico a utilizar. [64][65]

Luego de la reacción de pirólisis, es necesario separar y purificar los productos obtenidos, además de realizar su acondicionamiento para ser almacenados y comercializados. [41] Con esto, es posible concluir que, el proceso de pirólisis está compuesto principalmente por tres etapas: dosificación y alimentación de la materia prima, transformación de la masa orgánica y, por último, obtención y separación de los productos [43].

Según la información anterior, para el diseño de este proyecto, se plantearon las diferentes operaciones y procesos unitarios involucrados en cada etapa, desde la alimentación y acondicionamiento de la materia prima, hasta la obtención tanto del producto líquido, como sólido y gaseoso, las cuales se muestran en la figura 13.

Figura 13.

Diagrama de bloques del proceso



Nota. Diagrama de bloques del proceso teniendo en cuenta las operaciones y procesos unitarios.

4.1.1. Operaciones Unitarias

4.1.1.a. Clasificación de los Residuos Sólidos Urbanos. Por lo general, los residuos sólidos urbanos están compuestos por una gran variedad de elementos, los cuales han sido especificados con anterioridad; esto hace que su clasificación sea un proceso complejo y dispendioso. Sin embargo, en la actualidad existen múltiples instalaciones de clasificación, las cuales tienen como objetivo “seleccionar el contenido del material entrante mediante una combinación de procesos de separación mecánicos o automatizados y procesos manuales con el fin de recuperar las fracciones valorizables y prepararlas para su posterior comercialización” [66]. A través de esta operación unitaria se pretende separar la fracción orgánica y los plásticos no reciclables, siendo esta la materia prima para el proceso de pirólisis, mientras que materiales como vidrio, metal, plásticos, entre otros que pueden ser reutilizables son procesarlos mediante tratamientos térmicos o para su depósito en vertederos [66], o para su reciclaje y reutilización.

Con respecto a la clasificación automática de los residuos, las instalaciones de recuperación utilizan operaciones como el zarandeo, la clasificación por tamaño y la trituración de los mismos. “El zarandeo y la clasificación por tamaño forman parte del proceso de separar diversos componentes que se encuentran en los residuos sólidos urbanos, y es de suma importancia para la recuperación de materiales útiles y valiosos. Además, reducen la cantidad de residuos destinados al vertedero de residuos al permitir darle una nueva vida a los materiales reciclables como diferentes productos”. [67] Estos equipos de zarandeo y clasificación por tamaño pueden separar materiales como vidrio, plástico y papel a través de características como la resistencia al calor, el color del material, su composición, entre otros elementos. [67]

4.1.1.b. Secado de la Biomasa. El contenido de humedad es la magnitud que representa la cantidad de agua en el material sólido y puede expresarse en términos de base de masa seca o masa húmeda [68]. De acuerdo con lo establecido por Alonso, Martínez y Olías en su libro Manual para la gestión de los residuos urbanos, el valor óptimo de humedad para los residuos sólidos urbanos es de 55%, sin embargo, este puede oscilar entre el 25 y el 60% dependiendo de la composición de los mismos. [69]

Con el fin de eliminar o reducir al máximo la humedad presente en los residuos, la biomasa se lleva a un proceso de secado, el cual permite tener una condición de humedad adecuada para su procesamiento posterior, generando así una disminución de los costes de procesamiento, así como de los gastos de almacenamiento y transporte [70][71].

4.1.1.c. Trituración. La significativa reducción en volumen de la masa orgánica mediante un proceso de trituración es un proceso que se realiza con el fin reducir facilitar su transporte en las estaciones de transferencia, además de ser un tratamiento previo al proceso de incineración, e incluso para desecharlos en el relleno sanitario [72]. Este proceso “beneficia al medio ambiente a través de disminuir la contaminación del suelo por desechos acumulados, aire por olores proliferados y agua por fluidos de lixiviados, lo cual se traduce en un elemento jerárquico en la gestión integral de residuos sólidos en la transformación de residuos”. [72]

La trituración también es conocida como desintegración y se realiza en equipos industriales como trituradoras, desintegradoras, quebradoras o machacadoras. [73] La descomposición de los residuos ocurre en diferentes etapas y en una variedad de máquinas. Cuando el material se procesa en la trituradora, se determina como la etapa principal de trituración. Si el material producido a partir de este punto entra en la segunda trituradora, en esta se efectuará la trituración secundaria. Si sigue triturándose en otra máquina, la terciaria, y así consecutivamente [73]. Cabe destacar que los resultados del proceso de trituración se ven influenciados por el estado tanto físico como químico de los residuos.

4.1.1.d. Tamizado. El tamizado es uno de los métodos más utilizados para la clasificación y separación de partículas, basándose en las diferencias de tamaño. “En el tamizado industrial se vierten los sólidos sobre una superficie perforada o tamiz, que deja pasar las partículas pequeñas, o *finos*, y retiene las de tamaños superiores, o *rechazos*”. [74]

«Los tamices o cedazos se construyen con telas de malla de alambre cuyo diámetro de hilos y espaciado entre ellos están previamente especializados. Estas telas de tamizados son el fondo de cajas cilíndricas, metálicas o de madera de diámetro y altura entre 20 y 5 cm respectivamente, con bordes inferiores dispuestos de tal manera que el fondo de uno, encaja perfectamente en el borde superior del otro. El espacio libre entre los hilos del tejido de un tamiz se llama abertura y con frecuencia se aplica la palabra "malla" para designar el número de aberturas existentes en una unidad de longitud; por ejemplo: Un tamiz de malla 10, tiene 10 orificios en una pulgada y su abertura tendrá una longitud de 0.1 pulgadas menos el espesor de un hilo». [74]

En el caso de los residuos sólidos, el funcionamiento es el mismo, una vez haya pasado por el proceso de trituración, este pasará a una especie de selección a partir del tamaño de partícula puesto que se tiene por objetivo retener los residuos sólidos gruesos no sedimentables.

4.1.1.e. Separación. La corriente de salida del reactor pirolítico se caracteriza por ser una mezcla gaseosa con material particulado. Con el fin de separar dicha mezcla

sólido-gas proveniente del reactor pirolítico, se emplea un separador ciclónico. “Los ciclones remueven el material particulado de la corriente gaseosa, basándose en el principio de impactación inercial, generado por la fuerza centrífuga” [75]. Además, es necesario destacar que la velocidad de sedimentación de las partículas se incrementa al utilizar la fuerza centrífuga, haciendo así más efectiva la separación.

4.1.1.f. Condensación. El material volátil, es decir, la corriente gaseosa producto de la pirólisis, está conformado por gas de pirólisis y la fase condensable, también conocida como bioaceite. Con el fin de obtener el producto líquido, “el material volátil se hace pasar por un intercambiador de tubos concéntricos lo suficientemente largo que permita la transferencia de calor con un fluido refrigerante, el cual a su vez es transportado a través de tubos” [63]. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que el bioaceite obtenido contiene agua, la cual es un producto indeseado debido a que disminuye su poder calorífico, por esta razón, se hace necesario el uso de dos intercambiadores de calor conectados en serie. [63]

En resumen, la etapa de condensación se lleva a cabo en un intercambiador de calor de doble tubo, el cual opera en contraflujo, permitiendo así una mayor eficiencia en el proceso y asegurando que condensen todos los gases condensables [63][76]. Como fluido de enfriamiento, se utiliza agua, al ser un recurso económico y de alta disponibilidad, además de su buena capacidad de transferencia de calor. [63]

4.1.1.g. Filtración de gases. El proceso de filtración es una operación unitaria en la que, a través de un medio filtrante, se produce la separación de partículas sólidas, líquidos e incluso gases [77]. En este caso, la filtración se realiza con el fin de remover las partículas contaminantes que pueden estar presentes en el producto gaseoso, afectando su calidad y pureza.

Para el proceso de filtrado, es necesario tener en cuenta la ley de Darcy, la cual afirma que “las fuerzas que provocan la filtración puede ser la gravedad o la presión hidrostática, dado que, si no hay fuerza impulsora de presión a través del medio filtrante, no hay caudal de filtrado” [77]

4.1.2. Procesos Unitarios

4.1.2.a. Reacción de pirólisis. La reacción de pirólisis, como se ha mencionado anteriormente, consiste en el uso de temperaturas muy elevadas en una atmósfera sin oxígeno, con el fin de inducir una descomposición térmica en la biomasa, cambiando así sus propiedades físicas y químicas. Para realizar este proceso se emplea un reactor pirolítico, el cual es el dispositivo encargado de elevar la temperatura de la biomasa.

Previamente, se mencionaron los diferentes tipos de reactores pirolíticos que pueden ser utilizados tanto para la pirólisis lenta como la rápida o flash. De acuerdo con dicha información y teniendo en cuenta que se pretende realizar el diseño de un proceso de pirólisis rápida, es necesario realizar la selección de las diferentes opciones de reactores disponibles: Reactor ablativo, reactor de lecho burbujeante, reactor cónico rotatorio, reactor fluidizado circulante, reactor de tornillo sin fin.

Para realizar la selección del reactor a utilizar, se establecerá una Matriz de Selección, la cual contará con parámetros como eficiencia en la transferencia de calor, el rendimiento del líquido y la seguridad y el sistema de operación.

4.1.2.a.i. Matriz de Selección. Para el desarrollo de la matriz de selección, se evaluaron para cada uno de los reactores mencionados anteriormente, parámetros como la eficiencia en la transferencia de calor, el rendimiento y la facilidad de manejo y control del equipo.

Tabla 13*Descripción de parámetros para la selección del reactor de pirólisis*

Reactor de pirólisis	Parámetros
Reactor Ablativo	<ul style="list-style-type: none"> • Genera altos impactos entre las partículas y las paredes, dando como resultado una alta transferencia de energía calórica de las paredes a la materia prima. [59] • Su mecanismo de aporte de calor a las partículas de biomasa es por contacto con una pared caliente [38], y la velocidad de pirólisis está limitada por la transmisión de calor en el interior de la partícula, en la que se desplaza hacia el centro un frente de pirólisis. [78] • Presenta rendimientos del producto líquido de 80% aproximadamente.[38] • “Posee una superficie caliente en forma de disco, donde la biomasa es ingresada a presión para producir carbón y vapor. De esta manera, presenta ventajas debido a la gran cantidad de material que se puede procesar, al igual de no requerir un medio fluidizante” [78]. Sin embargo, el proceso de construcción y escalado del reactor resulta ser una desventaja. [78] • Puede procesar biomásas con un tamaño de partícula mayor en comparación a los requeridos por otros tipos de reactores pirolíticos, facilitando así el procesamiento del material. [59] • Disminuye los costos del proceso al reducir las necesidades de un agente fluidizante. [78]
Reactor de Lecho Burbujeante	<ul style="list-style-type: none"> • Permite una transferencia de calor eficiente a través del control de temperatura. Se caracteriza por sus coeficientes de transferencia de calor y de masa, los cuales son altos en comparación a otros procesos. [57][79] • Al realizar un mezclado homogéneo de los sólidos se “genera una inercia térmica que impide cambios bruscos de temperatura y da un amplio margen de seguridad para evacuar el calor en procesos muy exotérmicos”. [79] • Es comúnmente utilizado en la producción de aceite pirolítico debido al alto rendimiento en la producción de combustibles. [60] • Gracias al burbujeo, es posible realizar un buen control de las aplicaciones y una mejora del rendimiento del proceso. [60][80] • El comportamiento de las partículas como un fluido permite controlar los procesos fácilmente. [80]

Nota. Primera parte de la descripción de los parámetros de transferencia de calor, rendimiento del producto líquido y facilidad de manejo y seguridad en la operación de cada uno de los reactores para pirólisis rápida a estudiar.

Tabla 13. Continuación.

Descripción de parámetros para la selección del reactor de pirólisis

Reactor Cónico Rotatorio	<ul style="list-style-type: none">• Utiliza el movimiento de las partículas para mejorar la transferencia de calor entre las mismas. “La materia prima está en contacto directo con un lecho de calentamiento de arena u otro sólido inerte, donde se mezcla mecánicamente aprovechando el momento angular del cono. Esto reduce el consumo de Gas de Fluidización y mejora la transferencia de calor”. [81]• A pesar de la complejidad del diseño del reactor, se ha demostrado que se pueden lograr altos rendimientos de biocombustible [78], alcanzando valores de entre 60 y 70%. [61]• Presenta dificultades para su escalado y operación, envolviendo incluso problemas de combustión. [60]
Reactor Fluidizado Circulante	<ul style="list-style-type: none">• “Existen importantes dificultades en el uso de reactores de lecho fluidizado para tratar RSU. En primer lugar, la materia prima suministrada al reactor debe ser pequeña para dar mayor facilidad a que se produzca la fluidización. En segundo lugar, hay un problema para separar el carbón del lecho. Por lo tanto, este tipo de reactor rara vez se utiliza en proyectos de gran escala”. [82]
Reactor de Tornillo sin Fin	<ul style="list-style-type: none">• Su principal limitación es la transferencia de calor. “Este reactor no usa gas de fluidización y su calentamiento es de tipo indirecto por medio de una chaqueta de calentamiento con gases de combustión”. [81]• Puede otorgar una mayor orientación a los rendimientos de los productos deseados debido a la velocidad del giro del tornillo [62], sin embargo, este tipo de reactor se caracteriza por favorecer la obtención del producto en fase sólida, teniendo así un bajo rendimiento del líquido. Estudios registran que el rendimiento del líquido suele estar entre 27 y 42%. [81]• Se caracteriza por permitir la operación en continuo, presentando mínimas restricciones al momento del escalado. [62]

Nota. Segunda parte de la descripción de los parámetros de transferencia de calor, rendimiento del producto líquido y facilidad de manejo y seguridad en la operación de cada uno de los reactores para pirólisis rápida a estudiar.

De acuerdo con la información anterior, se asignó una calificación a cada uno de los reactores, teniendo en cuenta los parámetros estudiados. Para ello, se estableció 4 para Excelente, 3 para Bueno, 2 para Regular y 1 para Malo o Nulo. En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos. Posteriormente, se realizó la ponderación de los parámetros a estudiar, dando la misma importancia a cada uno de ellos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 14.

Calificación de los reactores de acuerdo con los parámetros establecidos

	Transferencia de Calor	Rendimiento del líquido	Manejo y control	Resultados
R. ablativo	4	4	2	3,33
R. de lecho burbujeante	4	3	4	3,67
R. cónico rotatorio	4	3	1	2,67
R. tornillo sin fin	2	2	4	2,67

Nota. Resultados de la calificación por puntos para los reactores pirolíticos, de acuerdo con los parámetros descritos previamente.

En la tabla anterior se evidencia que el Reactor de Lecho Burbujeante obtuvo una mayor calificación con respecto a los otros reactores, demostrando así que este es el equipo más viable para el desarrollo del proceso de pirólisis para la obtención de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos.

Este reactor se caracteriza por permitir una transferencia de calor eficiente, brinda un mezclado homogéneo de los sólidos que impide cambios bruscos de temperatura, dando un amplio margen de seguridad, tiene un alto rendimiento en la producción de combustibles y su manejo y operación son sencillos.

4.2. Variables que afectan el proceso de pirólisis rápida

El proceso de pirólisis rápida para producir bioaceite se ve afectado por variables como la temperatura, la velocidad de calentamiento, el tamaño de las partículas y el tiempo de residencia de las partículas, y el gas dentro del equipo.[83] A continuación se presentan cada uno de los efectos de dichas variables en el rendimiento del proceso:

4.2.1. Temperatura

La temperatura es una de las variables más importantes dentro del proceso de pirólisis, la cual define en gran medida la distribución de los productos. “Aumentos en la temperatura favorecen la formación de gases no condensables mientras disminuyen la producción de carbonizado; temperaturas bajas no permiten la degradación de la totalidad de los compuestos de la biomasa.” [83]

4.2.2. Velocidad de calentamiento

La velocidad de calentamiento del proceso influye tanto en la composición de los productos como en su rendimiento, siendo esta la principal diferencia entre la pirólisis rápida y la pirólisis lenta. [83] “Una alta tasa de calentamiento aumenta el rendimiento de bioaceite mientras que bajas tasas favorecen la formación de producto sólido” [83]. A pesar de que esta es una variable de difícil control y medición, en la literatura se reportan tasas entre 1-100°C/min para pirólisis lenta y >1000°C/min para pirólisis rápida. [84][85]

4.2.3. Tamaño de partículas

El tamaño de las partículas corresponde al diámetro de partícula o tamaño promedio de la materia prima [62]. Por lo general, la biomasa posee una conductividad térmica baja, influyendo así en la tasa de calentamiento del proceso. “Partículas grandes tienen bajas tasas de calentamiento mientras que las de menor tamaño se calientan rápidamente y permiten más fácilmente la salida de los vapores” [83]. El tamaño de partícula recomendado por la literatura para el proceso de pirólisis rápida es < 2mm. [86][87]

4.2.4. Tiempo de residencia

El tiempo que los gases permanecen en el reactor depende del flujo de gas de fluidización y del volumen del reactor [83]. Múltiples estudios han evidenciado que los tiempos cortos de residencia disminuyen la formación de reacciones secundarias, aumentando así la producción del líquido, mientras que altos tiempos de residencia garantizan una mayor conversión de la biomasa para productos gaseosos. [83]

4.3. Condiciones de operación

Generalmente, los procesos de pirólisis se llevan a cabo a presión atmosférica, con temperaturas entre los 300 y los 600 °C y un ambiente inerte. “La pirólisis rápida se destaca, además, por realizarse en condiciones que favorecen altos coeficientes de transferencia de calor y tasas de calentamiento de la biomasa, en un reactor con buen

control de temperatura alrededor de 500°C” [88]. Seguido al proceso de pirólisis, es necesario realizar el debido enfriamiento, separación y condensación del líquido.

Por otra parte, el tiempo de residencia de los productos primarios de la pirólisis en el reactor está entre los 0.5 y los 10 segundos, siendo bastante corto, lo cual permite “maximizar el rendimiento del líquido evitando la fragmentación térmica y catalítica provocada por los vapores que dan lugar principalmente a productos gaseosos no condensables, además de impedir la recombinación de productos primarios de pirólisis a precursores de carbón.”[88] Además, para llevar a cabo este tipo de pirólisis, se requieren tasas de calentamiento mayores a 16.667 K/s. [63]

Para alcanzar las condiciones mencionadas anteriormente, es posible basarse en la transferencia de calor, la cual se logra mezclando a fondo las partículas de biomasa con un portador de energía inerte caliente (como arena de cuarzo) en un lecho fluidizado o usando un dispositivo de mezcla de tornillo mecánico. “También es posible lograr una a la pirólisis rápida, utilizando vacío para evacuar rápidamente los productos primarios de pirólisis, o un mecanismo ablativo que consiste en presionar una astilla de biomasa contra una superficie caliente que rota, exponiendo constantemente una superficie fresca de la biomasa, y remueve continuamente los productos de la pirólisis” [88]. Con estas condiciones, es posible asegurar la remoción del carbón que se va formando.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente y la investigación realizada con respecto a las variables que afectan el proceso de pirólisis rápida, se establecieron las siguientes condiciones de operación:

- Intervalo de temperatura entre 425 y 550°C
- Tamaño de partícula inferior a 2mm
- Tiempo de residencia de gases inferior a 2 segundos
- Tasa de calentamiento mayor a 16.667 K/s

4.4. Balance de materia

De acuerdo con la información presentada en el apartado 2.2, se tomó como caso de estudio para el desarrollo de los cálculos del proceso, la información correspondiente al municipio de Madrid, Cundinamarca, el cual tiene una generación mensual de residuos sólidos de 1.822 toneladas. Además, la Tabla 7 presenta el porcentaje

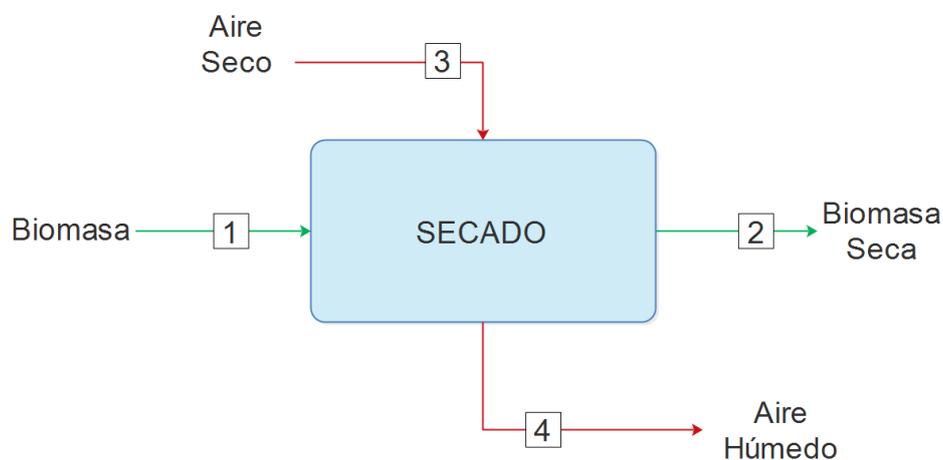
estimado para los residuos orgánicos del municipio, el cual corresponde al 62,4%. A partir de esto, se obtuvo una alimentación al reactor de pirólisis de 1.136,93 ton/mes lo cual equivale a 0,438 kg/s.

4.4.1. Balance de materia en el secador

Para llevar a cabo esta etapa, se plantearon las condiciones de operación teniendo en cuenta el secado directo, en el que la remoción de agua del sólido se lleva a cabo a partir de una corriente de aire caliente [63]. En esta operación se busca obtener una biomasa seca con un máximo de 5% de humedad.

Figura 14.

Unidad de Secado



Nota. Esquema del proceso de secado con sus respectivas corrientes de aire y biomasa.

Para el desarrollo del balance de materia en el secador, se tuvo en cuenta la ecuación general de balance que se muestra a continuación:

Ecuación 1

Ecuación general de balance

$$\text{Salida} - \text{Entrada} + \text{Acumulado} = \text{Generado}$$

Con la ecuación 1, fue posible plantear el balance de materia tanto para la biomasa seca (bs) como para el aire seco (as), además del agua (w), asumiendo un sistema ideal en el que no se presenta acumulación de componentes.

$$\begin{aligned}\dot{m}_{bs,1} &= \dot{m}_{bs,2} \\ \dot{m}_{as,3} &= \dot{m}_{as,4} \\ \dot{m}_1 + \dot{m}_3 &= \dot{m}_2 + \dot{m}_4 \\ \dot{m}_{w,1} + \dot{m}_{w,3} &= \dot{m}_{w,2} + \dot{m}_{w,4}\end{aligned}$$

Para realizar el balance de materia en el secador, se estableció un valor de humedad presente en los residuos sólidos orgánicos de 55%, de acuerdo con lo planteado por Alonso, Martínez y Olías en su libro Manual para la Gestión de los Residuos Urbanos, siendo este el valor de humedad óptimo de los mismos. Teniendo un flujo de alimentación de biomasa de 0,438 kg/s fue posible determinar el flujo de agua presente en los residuos sólidos urbanos y el flujo de lo que correspondería a biomasa seca.

$$\begin{aligned}\dot{m}_1 &= 0,438 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{w,1} &= 0,241 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{bs} &= 0,197 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que se desea secar la biomasa hasta obtener una humedad del 5%, fue posible determinar el valor para el flujo de salida de la biomasa \dot{m}_2 , además del flujo correspondiente al agua $\dot{m}_{w,2}$.

$$\begin{aligned}\dot{m}_2 &= 0,207 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{w,2} &= 0,0104 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Para conocer el flujo de aire necesario para realizar dicho proceso de secado, se estableció como presión de saturación del vapor un valor de 16,59 mmHg [89], el cual corresponde a la temperatura máxima promedio diaria del municipio de Madrid, Cundinamarca, 19°C [90]. Por otra parte, se estableció la presión atmosférica promedio como 1019,1 hPa [91], lo cual corresponde a 764,4 mmHg y una humedad relativa promedio de 71%. [92] Con esta información, fue posible dar resolución a la

ecuación 2, obteniendo una fracción molar de agua en el aire correspondiente a $0,0154 \frac{\text{mol } H_2O}{\text{mol a.s.}}$ y su respectiva fracción másica de $0,00957 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg a.s.}}$.

Ecuación 2

Fracción molar para el agua en el aire

$$y_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_T}$$

Asumiendo que el aire de salida del secador se encuentra saturado, es decir, presenta una humedad relativa del 100%, y manteniendo la temperatura de 19 °C, se resolvió nuevamente la ecuación 2, obteniendo una fracción molar para el agua en el aire de salida de $0,0217 \frac{\text{mol } H_2O}{\text{mol a.s.}}$ y su respectiva fracción másica de $0,0135 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg a.s.}}$. A partir de esto y utilizando la ecuación general de balance, se obtuvo un resultado para \dot{m}_3 de 25,1 kg/s y para \dot{m}_4 de 25,3 kg/s.

De esta manera fue posible concluir que se requieren 25,1 kg/s de aire seco para secar 0,438 kg/s de biomasa, obteniendo 0,207 kg/s de biomasa seca.

Es posible realizar el proceso de secado a una temperatura mayor, lo cual implicaría un flujo menor de aire seco requerido. El secado ocurre a 100-200°C y se consigue reducir el contenido de humedad hasta alrededor de un 5%. [57] Sin embargo, esto hace necesario determinar el consumo energético de dicho calentamiento. Por otra parte, es posible secar previamente el aire utilizando un adsorbente, lo cual sería más económico.

4.4.2. Balance de materia en el reactor pirolítico

La biomasa seca obtenida en la operación de secado pasa posteriormente por un proceso de molienda y tamizado, donde se asumió una eficiencia ideal, por esta razón el valor correspondiente a la alimentación del reactor pirolítico es de 0,207 kg/s.

Para el desarrollo del balance de materia en el reactor, al igual que en el proceso de secado, se tuvo en cuenta la ecuación general de balance. De acuerdo con el análisis teórico realizado en los apartados anteriores, fue posible afirmar que el proceso de

pirólisis, al ser una reacción de degradación térmica, no cuenta con una generación. Por otra parte, se asume un sistema ideal en el que no se presenta acumulación de componentes.

$$\begin{aligned} \text{Entrada} &= \dot{m}_{RSU} = 0,207 \text{ kg/s} \\ \text{Salida} &= \dot{m}_{char} + \dot{m}_{bio-oil} + \dot{m}_{gas} \end{aligned}$$

Por lo tanto,

$$\dot{m}_{char} + \dot{m}_{bio-oil} + \dot{m}_{gas} = 0,207 \text{ kg/s}$$

Con el fin de determinar el flujo de cada uno de los productos de la pirólisis, se empleó la información planteada en la Tabla 12, donde se evidencian los rendimientos obtenidos para la pirólisis rápida, siendo 65% para el líquido, 15% para el sólido y 20% para el gas.

Ecuación 3

Ecuación de Rendimiento

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{\dot{m}_{producto}}{\dot{m}_{RSU}} * 100$$

Obteniendo así,

$$\dot{m}_{char} = 0,15 * 0,207 \text{ kg/s} = 0,0311 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{bio-oil} = 0,65 * 0,207 \text{ kg/s} = 0,1345 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{gas} = 0,20 * 0,207 \text{ kg/s} = 0,0414 \text{ kg/s}$$

La corriente de producto del reactor de pirólisis consiste en una mezcla entre gases condensables, gases no condensables y coque. A partir de diversos procesos de separación, es posible obtener cada uno de los productos en corrientes separadas, tal como se muestra en la Figura 13.

4.5. Balance de energía

Para el desarrollo del balance de energía del proceso, en primer lugar, es necesario conocer la capacidad calorífica de los residuos sólidos urbanos. Para ello, se empleó la información presentada en la Tabla 5, donde se evidencian los porcentajes de cada uno de los componentes químicos presentes en los residuos orgánicos.

Por otra parte, se consultaron los valores correspondientes al calor específico de cada uno de los componentes presentes en los residuos orgánicos de acuerdo con lo presentado en la Tabla 5. Estos valores se asumieron constantes debido a que, al evaluar las expansiones polinomiales de T para los compuestos Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno, el cambio no fue significativo. Además, no fue posible encontrar las constantes *a*, *b*, *c* y *d* correspondientes a los compuestos Carbono y Azufre en estado puro, ya que estos se encuentran como minerales. La Tabla 15 presenta los valores de Cp consultados para los componentes presentes en los residuos orgánicos.

Tabla 15.

Calor específico de los componentes en los RSU.

Componente	Porcentaje (%)	Calor Específico (J/gK)
Carbono	52	0.709
Hidrógeno	6.62	14.304
Oxígeno	37.55	0.918
Nitrógeno	1.63	1.040
Azufre	0.2	0.708

Nota. Valores del calor específico para los componentes presentes en los residuos sólidos urbanos en J/gK. Tomado de: J. R. Rumble. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 101st Ed. New York: Advisory Board, 2020.

Con los datos presentados en la Tabla 15 se procedió a calcular el calor específico de los residuos orgánicos en conjunto, empleando la ecuación 4.

Ecuación 4

Cálculo del calor específico

$$Cp_m = \sum_1^i x_i Cp_i$$

Como resultado del anterior procedimiento, se obtuvo un calor específico para los residuos orgánicos de 1678,68 J/kgK.

4.5.1. Balance de energía en el reactor

El reactor de lecho burbujeante se caracteriza por contener en su interior un lecho de arena de cuarzo en la mayoría de los casos, el cual es calentado a través de la combustión de un gas combustible en el fondo del mismo. Este calentamiento provee la energía necesaria para llevar a cabo la reacción de pirólisis. En este caso, se realizó el balance de energía, con el fin de determinar el aporte energético realizado por el reactor, teniendo en cuenta la ecuación 5.

Ecuación 5.

Requerimiento energético en el reactor de pirólisis

$$Q_{total} = Q_{sensible} + Q_{reacción} + Q_{latente} + Pérdidas de Calor$$

Donde

Q_{Total} = Energía total en W

$Q_{Sensible}$ = Calor sensible en W

$Q_{Reacción}$ = Calor de reacción en W

$Q_{Vaporización}$ = Calor de vaporización en W

Debido a que la pirólisis es un proceso en el que inicialmente la materia orgánica se reduce a moléculas más simples y, a elevadas temperaturas, algunos productos primarios se reducen a productos secundarios y se volatilizan, es posible concluir que en este proceso ocurren una serie de reacciones tanto exotérmicas como endotérmicas. Por esta razón, en el reactor de pirólisis el calor de reacción se libera de las reacciones exotérmicas y simultáneamente se consume en la vaporización de

los productos [63], siendo así que el calor neto del proceso de pirólisis corresponde únicamente al calor sensible.

$$Q_{total} = Q_{sensible} + Pérdidas de calor$$

De acuerdo con lo anterior, y considerando unas pérdidas de calor del 5% según la configuración del reactor, se tiene que:

Ecuación 6.

Calor sensible para el reactor de pirólisis

$$Q_{sensible} = \dot{m} * Cp * \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

Donde

m = flujo de biomasa en kg

Cp = Calor específico de la biomasa J/kgK

$\partial T/\partial t$ = Variación de la temperatura con respecto al cambio del tiempo en K/s

Reescribiendo la ecuación 8 y considerando que la temperatura de entrada es 19°C, puesto que esta es la temperatura a la cual opera el secador, mientras que la temperatura del reactor corresponde a 487,5°C, siendo este el promedio de intervalo de temperatura de operación establecido en el apartado 4.3., se obtuvo un resultado del intercambio energético entre el reactor y los residuos orgánicos equivalente a 162,8 kJ/s.

Para el funcionamiento del reactor se estableció utilizar parte del biogás producido como gas de servicio. Ante esto, se sabe que el poder calorífico del biogás es en promedio de 21,1 MJ/m³ [93] y, de acuerdo con el balance de materia, se obtuvieron 0,056 m³/s de biogás. Con esta información, es posible concluir que se requiere un 13,86% del biogás producido para el funcionamiento del reactor de pirólisis.

4.5.2. Balance de energía en el condensador

Para desarrollar el balance de energía del condensador necesario para obtener el bioaceite en estado líquido se analizó un intercambiador de calor de doble tubo, el cual opera en contraflujo, con el fin de asegurar que la mayor cantidad de gases condensables pase a estado líquido.

Se tuvo en cuenta que al intercambiador de calor ingresa la corriente gaseosa proveniente del reactor de pirólisis, la cual contiene tanto los gases condensables como los no condensables. Además, es necesario destacar que este intercambiador de calor “contempla no solamente el calor sensible correspondiente al enfriamiento del material volátil, sino que también incluye el calor latente referente al cambio de fase que se produce en la condensación del bioaceite” [63]. Sin embargo, las propiedades del material volátil cambian a lo largo del equipo, aumentando la complejidad del balance de energía en el mismo, razón por la cual no se consideró el calor latente para este caso.

De acuerdo con diversos estudios, se sabe que la temperatura de condensación del bioaceite combustible es mayor a 200°C, con un intervalo de ebullición entre 250 y 350°C para la mayoría de compuestos relacionados con hidrocarburos [94]. Por esta razón, se estableció 200°C como temperatura de salida del bioaceite en el condensador.

Ecuación 7.

Flujo de calor para el condensador

$$Q = \dot{m}_{rsu} C_{p_{rsu}}(T_{out} - T_{in})$$

Donde

\dot{m}_{rsu} es el flujo de biomasa a condensar en kg/s

$C_{p_{rsu}}$ es el calor específico de la biomasa en J/kgK

T_{in} es la temperatura de entrada de la biomasa al condensador en K

T_{out} es la temperatura de salida de la biomasa del condensador en K

Por otra parte, se desea conocer el flujo de agua de enfriamiento necesario para condensar los gases condensables del proceso, la cual se encuentra a 19°C, teniendo en cuenta la temperatura ambiente promedio del caso de estudio. Para esto, se utilizó la ecuación 8.

Ecuación 8.

Cálculo del flujo de agua de enfriamiento

$$\dot{m}_{agua} = \frac{Q}{Cp_{agua}(T_{out} - T_{in})}$$

Como temperatura de salida del agua se tomó un valor de 90°C de acuerdo con lo establecido en el artículo *Fractional Condensation of Biomass Pyrolysis Vapors*, en el cual analizan tanto el proceso de reacción como de condensación del proceso de pirólisis empleando madera como biomasa. [95]

Los resultados obtenidos al dar resolución a las ecuaciones anteriores fueron 80,7 kW para el flujo de calor en el condensador, mientras que el flujo de agua de enfriamiento necesario para llevar a cabo el proceso fue de 0,271 kg/s.

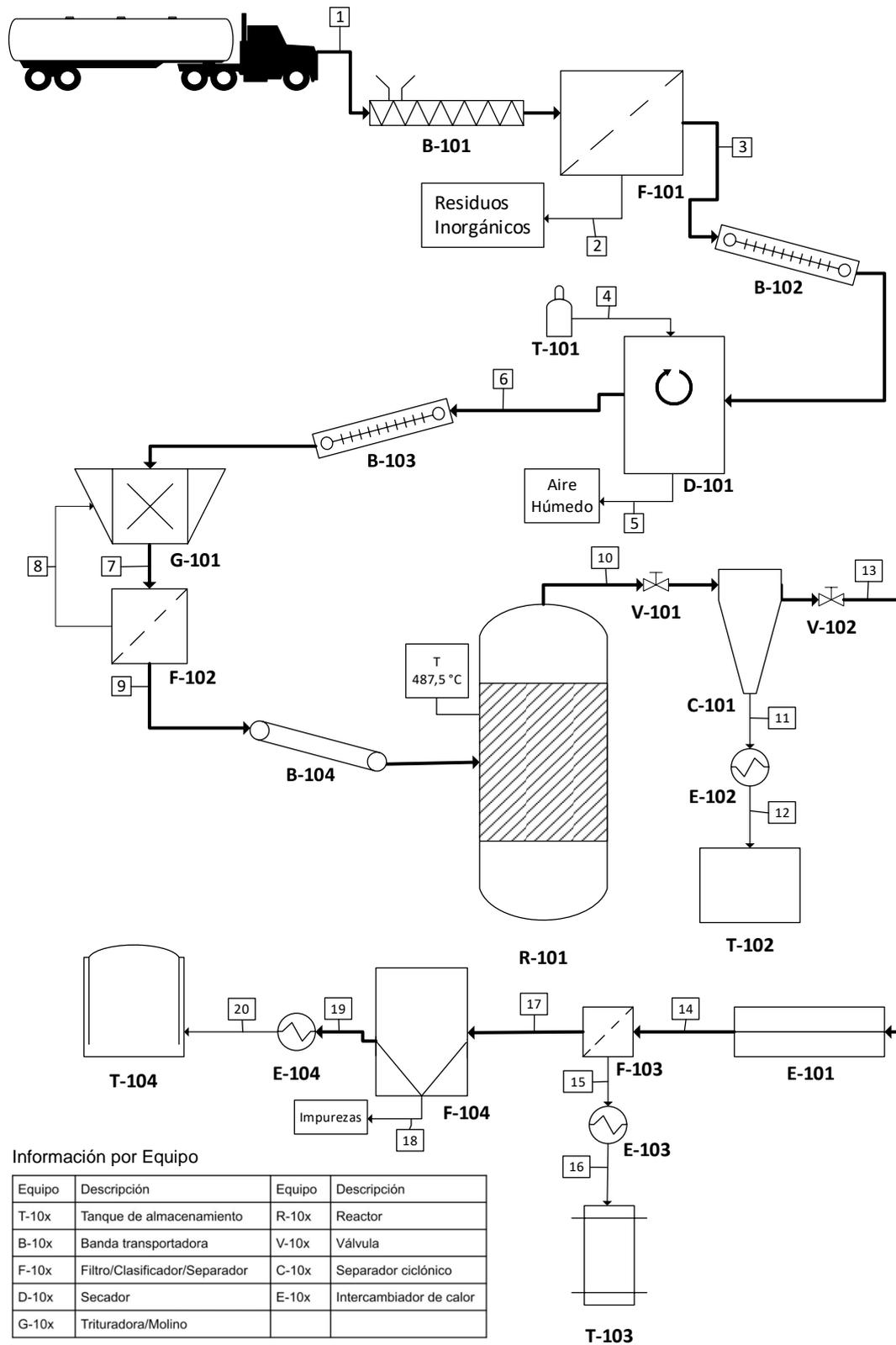
4.6. Diagrama de proceso PFD

Para recopilar la información presentada anteriormente, se decidió realizar el diagrama de proceso PFD, el cual muestra el flujo general de los procesos y equipos de la planta.

La figura 15 muestra el diagrama de proceso de flujo para el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos mediante pirólisis, además de la tabla de información por equipo. Los resultados para el balance de materia correspondientes a cada una de las corrientes se encuentran especificados en la tabla presente en el Anexo A.

Figura 15.

Diagrama PFD del aprovechamiento de residuos sólidos urbanos



Nota. Esquema del proceso para la pirólisis de residuos sólidos urbanos, partiendo de la recepción de los mismos, hasta el almacenamiento de los productos finales.

En la figura 15 se muestra el proceso general de pirólisis para los residuos sólidos urbanos, el cual empieza con la clasificación de los mismos, con el fin de obtener únicamente los residuos orgánicos. Posteriormente, se realiza el acondicionamiento de la biomasa a través del secado, la trituración y el tamizado de la misma para finalmente ingresar al reactor pirolítico de lecho burbujeante.

En la reacción pirolítica se generan los tres productos de interés, sin embargo, es necesario realizar diferentes procesos de separación para obtenerlos de forma pura. Estos procesos de separación consisten en el separador de ciclón para obtener el producto sólido, un proceso de condensación para obtener el producto líquido y la filtración del producto gaseoso para eliminar impurezas. Cabe destacar que las operaciones unitarias de tamizado y filtración de gases se consideran ideales, por lo tanto, no se generan desperdicios ni merma.

Para la trituración, se tiene en cuenta que los equipos empleados pueden ser trituradores domésticos, trituradores comerciales o trituradores municipales, dependiendo de los requerimientos [73]. Para este caso, se emplean trituradores municipales, también conocidos como molinos trituradores de basura, los cuales son de eje horizontal o de eje vertical y pueden tener martillos raspadores. [96] Los molinos de eje vertical Trituran la basura empleando la gravedad, mientras que en los de eje horizontal se requiere que los martillos o elementos trituradores vayan empujando la basura para ser molida. Es importante utilizar un molino de trituración adecuado, con el fin de obtener un material homogéneo, del mismo tamaño y con una forma similar [96], facilitando así el trabajo del reactor pirolítico y aumentando la eficiencia del proceso. De acuerdo con esto, se establece un sistema de trituración que consiste en un tanque receptor, una cinta transportadora, un molino triturador y una cinta para la descarga de residuos triturados. En la cinta transportadora se pueden retirar los elementos que no son aptos para la trituración [73].

Para el tamizado, existe un tamiz con la capacidad de ser usado en sector de tratamiento de residuos sólidos en general y es instalado después de equipos para machacar y moler los mismos. En particular, este tamiz es adecuado para ser usado con cualquier tipo de residuo, incluidos los residuos sólidos urbanos [97].

Con respecto al separador ciclónico, se sabe que “los ciclones constituyen uno de los medios menos costosos de recolección de polvo, tanto desde el punto de vista de operación como de la inversión” [75]. Al ser construcciones simples, no cuentan con partes móviles, facilitando así las operaciones de mantenimiento. Por otra parte, pueden ser hechos de una amplia gama de materiales y pueden estar diseñados para operar a altas temperaturas (hasta más de 1000°C) e incluso altas presiones [75]. Además de esto, los ciclones son adecuados para separar partículas con diámetros mayores de 5 μm [75], sin embargo, en algunos casos se ha logrado separar partículas con diámetros inferiores.

Finalmente, para el proceso de condensación, como se mencionaba anteriormente, se tiene en cuenta un intercambiador de calor de doble tubo, cuya operación es en contraflujo, permitiendo así una mayor eficiencia en el proceso y asegurando que la mayor cantidad de gases condensables pasen a estado líquido. Es posible utilizar una serie de hasta tres intercambiadores de calor para esta operación.

4.6.1. *Dimensionamiento del Reactor de Pirólisis*

Como se mencionó en el apartado 4.1.2, el reactor de pirólisis a utilizar es un reactor de lecho burbujeante. Este reactor se caracteriza por permitir una transferencia de calor eficiente, brinda un mezclado homogéneo de los sólidos que impide cambios bruscos de temperatura, dando un amplio margen de seguridad, tiene un alto rendimiento en la producción de combustibles y su manejo y operación son sencillos. El lecho del reactor es de arena de cuarzo, la cual es muy utilizada a nivel industrial y debido a sus propiedades, genera una buena fluidización y un gran tamaño de burbuja, lo cual beneficia el proceso. Esta arena de cuarzo actúa como un portador de energía inerte caliente, permitiendo así que se dé la reacción de pirólisis.

Para el dimensionamiento del reactor, se tuvo en cuenta el flujo volumétrico con el cual se trabaja, el cual es de 0,056 m^3/s . A partir de este flujo y teniendo en cuenta que el tiempo de reacción es aproximadamente 5 segundos, con una residencia de gases inferior a 2 segundos, se establecieron los parámetros que se muestran en la tabla 16.

Tabla 16.*Dimensionamiento del reactor de pirólisis*

Parámetro	Valor
Temperatura (°C)	487.5
Presión (bar)	1.05
Altura (m)	2
Diámetro del lecho (m)	1.5
Material del lecho	Silica Sand
Flujo volumétrico (m ³ /h)	201.6
Tamaño de partícula (mm)	< 2

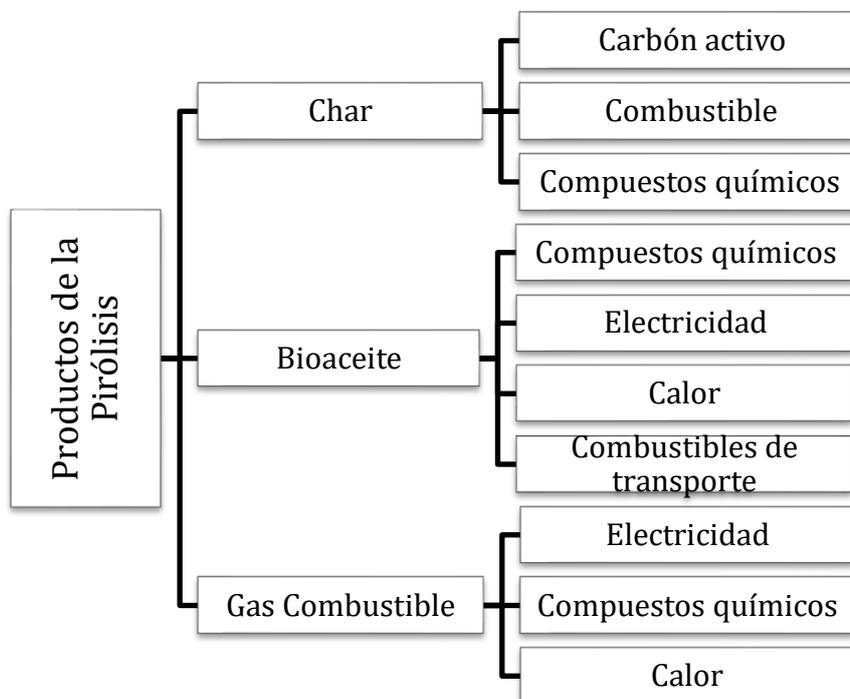
Nota. Parámetros para el dimensionamiento del reactor determinados teniendo en cuenta el estudio *Reactores de Lecho Fluidizado y Lecho Burbujeante en la Gasificación de Biomasa Residual*. [79]

4.7. Descripción de productos

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 [57]. La figura 16 muestra las diferentes aplicaciones que se le pueden dar a los distintos productos de la pirólisis.

Figura 16.

Aplicaciones de los productos del proceso de pirólisis



Nota. Aplicaciones que se le puede dar a cada uno de los productos obtenidos en el proceso de pirólisis. 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.

4.7.1. Producto sólido

El producto sólido de la pirólisis, también conocido como biocarbón, carbón vegetal o biochar, está compuesto principalmente por carbón, sales, metales y cenizas [42] y es el material carbonoso el cual logra reordenarse y establecerse como sólido luego de sufrir varias reacciones termoquímicas. [98]

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 [57]. “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”. [57]

4.7.2. Producto líquido

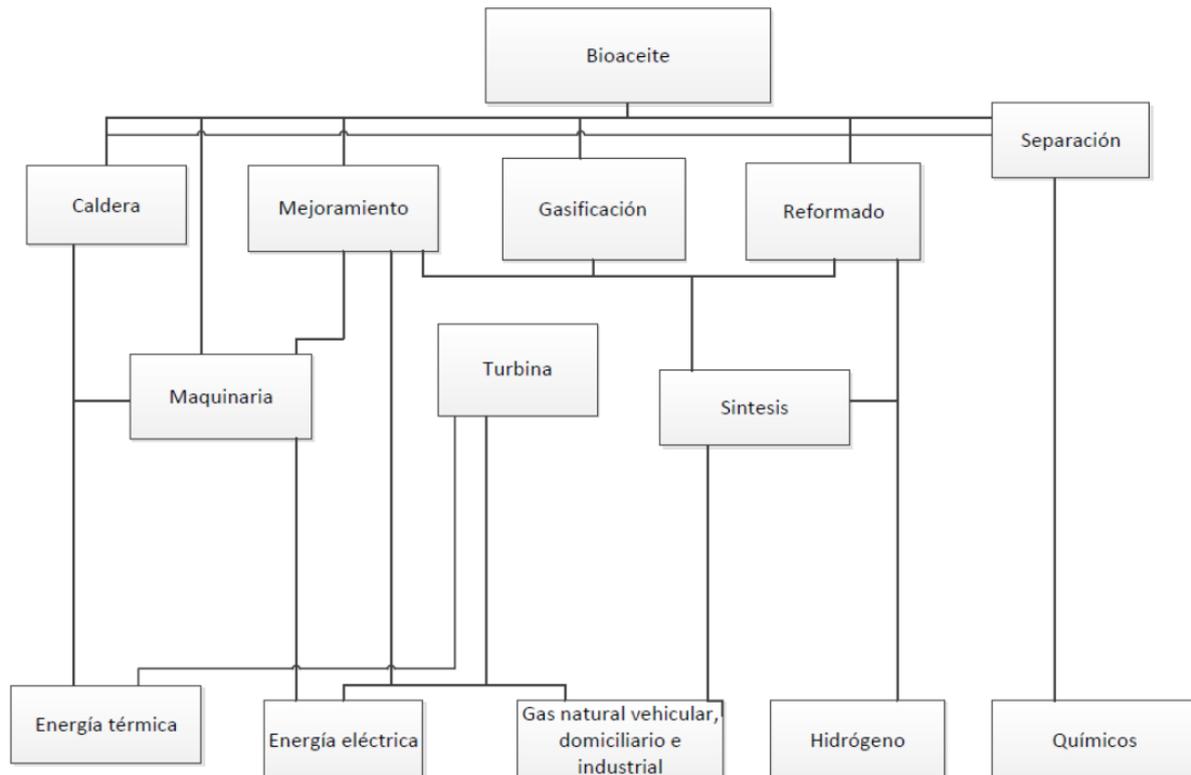
El producto líquido de la pirólisis, también llamado bioaceite, líquido pirolítico o aceite biocombustible, se obtiene como consecuencia de la condensación de los gases condensables y es una mezcla que contiene agua, una alta cantidad de oxígeno y variedad de moléculas de elevado peso molecular [98]. “Esta fase líquida contiene especialmente: fenoles, compuestos aromáticos, aldehídos, alcoholes, ácidos, cetonas, éteres, hidrocarburos, compuestos alifáticos y oxigenados, constituyendo así dos tipos de fases como la acuosa, formada especialmente por estructuras de bajo peso molecular y por último, la no acuosa donde su composición es por compuestos de elevado peso molecular, además de ser insolubles”. [99]

“El bioaceite es un líquido de color café oscuro variando a negro, dependiendo del contenido de partículas sub-micrométricas de carbón presentes. Más denso que el agua y con un fuerte olor a humo, el bioaceite tiene un poder calorífico similar al de la madera y cerca del 50% del poder calorífico de un petróleo combustible en términos volumétricos”. [88]

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 [57]. Por otra parte, el bioaceite es un producto de fácil almacenamiento y transporte al ser un líquido y es considerado como una fuente de energía renovable que se puede usar para producir electricidad o calor, como combustible en vehículos o para obtener compuestos químicos [57]. La figura 17 presenta los diversos usos que se le puede dar al bioaceite.

Figura 17.

Usos del Bioaceite



Nota. Distintas aplicaciones del bioaceite, principalmente a nivel industrial. Tomado de: J. I. Montoya Arbeláez et al., *Pirólisis de biomasa*, 1st ed. Diciembre. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2014

La composición química del bioaceite es compleja y difícil de estudiar debido a la gran cantidad de compuestos presentes, sin embargo, es posible identificar grupos de compuestos como Metanol, Fenol, Acetona, Acetaldehído, Ácido fórmico, Metilfurfural, Etanol, Aceites ligeros, entre otros, mediante técnicas analíticas. [88][42]

Para este trabajo, teniendo en cuenta las características fisicoquímicas que podría tener el bioaceite obtenido, se considerará este como Fuel Oil o Combustóleo. Sin embargo, es necesario realizar la caracterización del mismo, con el fin de conocer con exactitud su catalogación como biocombustible.

4.7.3. Producto Gaseoso

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. [42]

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. [57]

5. ANÁLISIS FINANCIERO DEL SISTEMA DE PIRÓLISIS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RSU

El análisis financiero de este proyecto se realizó a través de la observación de los datos económicos recopilados para así identificar, valorar y comparar entre sí los costos y beneficios asociados a la producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos en su aspecto técnico, social y medio ambiental.

Además, se tuvo en cuenta la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos – CONPES 3874 de 2016, la cual está enfocada en la gestión de los residuos no peligrosos y «busca aportar al desarrollo sostenible y a la adaptación y mitigación del cambio climático, y plantea la base inicial para avanzar hacia la economía circular desde la gestión integral de residuos sólidos. A partir de esta, se quiere lograr que el valor de los productos y materiales se mantengan durante el mayor tiempo posible en el ciclo productivo, que los residuos y el uso de recursos se reduzcan al mínimo, y que los recursos se conserven dentro de la economía cuando un producto ha llegado al final de su vida útil, con el fin de volverlos a utilizar repetidamente y seguir creando valor». [100][101]

5.1. Tamaño de la planta

En primer lugar, es necesario conocer el tamaño de la planta, con el fin de poder determinar el número de equipos necesarios para el proceso, además del área del terreno y las construcciones y edificaciones.

De acuerdo con lo analizado en el capítulo 4, el producto de mayor producción en el proyecto es el bioaceite, razón por la cual se realizó el análisis de la demanda para el mismo, teniendo un valor de 27.083.860 de barriles para el año 2021.

Con dicha demanda y una tasa de crecimiento de la misma del 0,096% [81], según los pronósticos realizados en el documento *Diseño Conceptual De Una Planta Para El Aprovechamiento De Caucho Molido De Neumáticos Usados A Partir De Pirólisis*, es posible calcular el tamaño del proyecto para cubrir la totalidad de la demanda, obteniendo un resultado de 27.331.282 barriles de bioaceite anuales.

Sin embargo, el objetivo principal es mitigar los problemas presentados en la Tabla 8, empleando como materia prima para el proceso, la totalidad de los residuos orgánicos generados en el municipio de Madrid, Cundinamarca, razón por la cual el tamaño de la planta corresponderá al necesario para producir 27.392 barriles de bioaceite anuales, supliendo así el 0.10% de la demanda total del país.

5.1.1. Distribución de la planta

La distribución en planta se refiere a la división de áreas y la disposición física de los elementos de producción o la provisión de servicios. Facilita la integración los factores hombre, materiales y maquinaria y promueven el uso efectivo del espacio, brindando a los clientes un entorno físico adecuado y seguro (interno y externo), la posibilidad de mover materiales según la distancia mínima y realizar ajustes cuando la empresa lo requiera [102]. La distribución de la empresa implica el ordenar los espacios según las necesidades de la planta, movimientos de material, almacenamiento, maquinaria y equipos, área administrativa y servicios para el personal. [102]

En este caso, el proyecto contará con cuatro zonas específicas: zona administrativa, zona de materias primas, zona de producción y zona de almacenamiento de producto terminado, las cuales serán distribuidas en la totalidad del área del terreno de la planta. Se estima que cada una de las zonas tenga un área de 300 metros cuadrados, con un total de 1.200 metros cuadrados.

5.2. Costos de inversión

Los costos de inversión, también conocidos como costos operativos iniciales, corresponden al aspecto monetario referente a la adquisición de los activos necesarios para poner en operación el proyecto, es decir, son todos aquellos costos que se dan desde la concepción de la idea que da origen al proyecto hasta poco antes de la producción del primer producto o servicio.

Para determinar los costos de inversión de este proyecto se tuvieron en cuenta parámetros tales como el costo del terreno, el costo de la maquinaria y los costos de construcciones y edificaciones, lo cual es información económica necesaria para

introducir los valores de las variables de entrada que requiere el proyecto, y que es esencial para el correcto análisis financiero del mismo. Cabe destacar que se consultaron los costos del terreno en la zona cercana al relleno sanitario Nuevo Mondoñedo, ya que esta es la fuente principal de materia prima, mientras que para el costo de cada uno de los equipos se realizaron las correspondientes cotizaciones, además de consultas en comercios electrónicos. Por otra parte, los costos fueron consultados en dólares y se utilizó la tasa de cambio para el día 26 de abril del 2021, la cual corresponde a COP\$3.695,01.

En la tabla 17 se presentan las inversiones fijas, entre las cuales se tienen tanto el costo del terreno y las edificaciones necesarias para llevar a cabo las operaciones del proceso de pirólisis como los costos de los equipos y la maquinaria descrita en el apartado 4.1. Para el costo de las construcciones y edificaciones se tomó en cuenta un valor de COP\$624.086,44 por metro cuadrado. [103] Además, se tuvieron en cuenta las depreciaciones tanto de las construcciones y edificaciones, con una tasa de depreciación anual del 2,22% y una vida útil equivalente a 45, mientras que para la maquinaria y equipos se consideró una tasa de depreciación del 10% con una vida útil equivalente a 10 años. [104]

Finalmente, se realizaron los cálculos correspondientes, obteniendo que los costos de inversión corresponden a un total de COP\$1.063.995.327.

Tabla 17.*Costos de Inversión para el proceso de pirólisis de RSU.*

	Tipo Activo	Cant.	Precio (\$)	Valor total (\$)	Vida útil (años)	Depreciación (\$)	Salv. (\$)
Inversiones fijas							
No depreciables							
Terreno		1200	120.000,00	144.000.000,00	*	0,00	0,00
Depreciables Inmuebles							
Construcciones y Edificaciones	Inmueble	1	748.903.729	748.903.729,00	45	16.625.663,00	582.647.009
Total				892.903.729,00		16.625.663,00	
Depreciables, máquinas y equipos							
Clasificador de residuos	Máquinas y equipos	1	69.466.188,00	69.466.188,00	10	6.946.618,80	0,00
Secador de Biomasa	Máquinas y equipos	1	11.454.531,00	11.454.531,00	10	1.145.453,10	0,00
Triturador de residuos	Máquinas y equipos	1	25.865.070,00	25.865.070,00	10	2.586.507,00	0,00
Tamiz de finos	Máquinas y equipos	1	14.262.738,60	14.262.738,60	10	1.426.273,86	0,00
Reactor de lecho burbujeante	Máquinas y equipos	1	29.672.480,00	29.672.480,00	10	2.967.248,00	0,00
Separador ciclónico	Máquinas y equipos	1	7.438.055,13	7.438.055,13	10	743.805,51	0,00
Condensador	Máquinas y equipos	1	2.586.507,00	2.586.507,00	10	258.650,70	0,00
Bombas	Máquinas y equipos	2	1.478.004,00	2.956.008,00	10	295.600,80	0,00
Filtro de gases	Máquinas y equipos	1	1.847.505,00	1.847.505,00	10	184.750,50	0,00
Tanque de Almacenamiento	Máquinas y equipos	3	1.847.505,00	5.542.515,00	10	554.251,50	0,00
Total				171.091.597,7		17.109.159,77	

Nota. Determinación de los costos de inversión para el proyecto, teniendo en cuenta las inversiones fijas.

5.3. Costo de insumos

Para determinar los costos del proceso de producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos, es necesario conocer tanto el costo de la materia prima como los costos energéticos y la mano de obra necesaria para llevar a cabo el proceso.

5.3.1. Costos de Materia Prima

Antes de la recolección y el tratamiento, el valor de los residuos sólidos urbanos orgánicos se asigna como cero pesos (\$0,00) para ingresar al proceso de tratamiento. Este valor se da porque los residuos sólidos municipales se entregan gratuitamente antes de ser procesados en el sitio de disposición final [105]. Después de la recolección, los desechos orgánicos correrán con el costo de transporte y recolección, por lo cual, en la tabla 19, se muestran como residuos orgánicos recolectados. [105]

Para conocer el costo de transporte y recolección de los residuos sólidos urbanos por parte de la planta, se realizó el análisis presentado en la Tabla 18.

Tabla 18.

Costos de Transporte y Recolección de los RSU

Descripción Ítem	Cantidad (horas/mes)	Precio Unitario (\$)	Precio total (\$)
Volqueta	68,4	25.000	1.710.000
Tolva de recepción	68,4	1.573	107.593
Total			\$1.817.593

Nota. Análisis de los costos de transporte y recolección de residuos sólidos urbanos, teniendo en cuenta los equipos necesarios y las respectivas horas al mes de uso.

De acuerdo con lo anterior, el costo de recolectar y transportar 1 kilogramo de residuos sólidos es de COP\$0,998, mientras que el resultado para los costos anuales de materia prima fue de COP\$21.811.116.

5.3.2. Costos energéticos

Para el análisis de los costos energéticos del sistema de producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos, se tuvo en cuenta la energía eléctrica consumida tanto por el molino de trituración, como por el tamiz de finos. Además, se considera la energía eléctrica consumida por la bomba necesaria para suministrar el agua de enfriamiento.

Por otra parte, se tuvieron en cuenta las tarifas de energía eléctrica (\$/kWh) reguladas por la Comisión de Energía y Gas (CREG), presentadas por Enel-Codensa para el mes de marzo del año 2021, siendo estas las tarifas más recientes que se tienen a la fecha. Para este proyecto, se tomó el valor correspondiente a las tarifas no residenciales, es decir Industrial y Comercial, suponiendo que el sistema eléctrico es propiedad de Codensa, el cual es de COP\$679,84.

Tabla 19.

Tarifas de energía eléctrica (\$/kWh)

Modalidad (Todo consumo)	Propiedad de Codensa (\$/kWh)	Propiedad del Cliente (\$/kWh)
E1	566.5330	528.1195
E2	566.5330	528.1195
E3	566.5330	528.1195
E4	566.5330	528.1195
E5, E6, Industrial y Comercial	679.8396	633.7434
Exenta de contribución	566.5330	528.1195

Nota. Tarifas de energía eléctrica de la empresa Enel-Codensa para el mes de marzo del año 2021. Tomado de: Enel Codensa, “Tarifas de energía”. Grupo Enel Colombia, [En Línea]. Disponible: <https://www.enel.com.co/es/personas/tarifas-energia-enel-codensa.html> [Acceso: Abril 10, 2021].

Para determinar el consumo energético de cada uno de los equipos mencionados y su respectivo costo, se tuvo que, de acuerdo con la información provista por los fabricantes y las fichas técnicas presentadas en los anexos, la bomba necesaria para el agua de enfriamiento consume 4,0 kWh/t, el molino de trituración de residuos

consume 3,7 kWh/t y el tamiz de finos consume 2,2 kWh/t. La tabla 20 muestra los costos energéticos mensuales que representa el uso de estos equipos.

Tabla 20.

Costos energéticos mensuales

Equipo	Consumo energético (kWh/t)	Costo mensual de funcionamiento (\$/mes)
Bomba	4,0	1.910.166
Molino de Trituración	3,7	1.349.617
Tamiz de Finos	2,2	802.475
Total		4.062.258

Nota. Costos energéticos mensuales para la bomba, el molino de trituración y el tamiz de finos.

De acuerdo con la información presentada en la tabla anterior, es posible concluir que los costos energéticos anuales para el proceso de producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos corresponden a COP\$48.747.096. Por otra parte, para analizar el consumo energético del reactor de pirólisis, se estableció que el 13.86% del biogás producido puede ser utilizado como combustible en el proceso, razón por la cual no se consideraron los costos energéticos del reactor.

5.3.3. Costos Mano de Obra

Los costos de mano de obra hacen referencia a cada uno de los pagos en los que incurre la empresa por la totalidad de sus empleados. Para este caso se consideraron el número de empleados necesarios para manejar los equipos que intervienen en el proceso de producción de los residuos sólidos urbanos. Además, se tuvo en cuenta una jornada laboral de un único turno diurno de 8 horas diarias, obteniendo así un total de 48 horas laboradas semanalmente por cada uno de los empleados.

De acuerdo con lo anterior, se consideró que el salario básico de cada uno de los operarios de la planta es equivalente al salario mínimo legal vigente, el cual corresponde a COP\$1.014.980 incluyendo el auxilio de transporte. Además, en el costo por operario se tuvo en cuenta el valor correspondiente a las prestaciones

sociales, asumiendo un riesgo nivel IV para todos ellos. La Tabla 21 muestra la cantidad de empleados necesarios para operar cada uno de los equipos del proceso junto con su respectivo costo.

Tabla 21.

Costos mensuales de mano de obra

Equipo	Cantidad Operarios	Costo por operario (\$)	Costo total (\$)
Clasificador de RSU	2	1.494.239	2.988.478
Secador para biomasa	1	1.494.239	1.494.239
Triturador de RSU	1	1.494.239	1.494.239
Tamiz de finos	1	1.494.239	1.494.239
Reactor de lecho burbujeante	2	1.494.239	2.988.478
Separador ciclónico	1	1.494.239	1.494.239
Condensador de gases industriales	1	1.494.239	1.494.239
Filtro de gases	1	1.494.239	1.494.239
Total	11	**	14.942.390

Nota. Costos mensuales de mano de obra, incluyendo las prestaciones sociales correspondientes, utilizando un nivel de riesgo de IV.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 21, los costos anuales de mano de obra corresponden a COP\$179.308.680.

5.3.4. Gastos Administrativos

Los gastos de administración se refieren a gastos que no pueden relacionarse directamente con las actividades económicas que realiza la empresa en el proceso de fabricación o producción. En este caso, se tuvo en cuenta el personal administrativo que se presenta en la Tabla 22.

Tabla 22.*Gastos mensuales administrativos.*

Personal	Cant	Gasto por personal (\$)	Gasto total (\$)
Gerente	1	12.388.160	12.388.160
Secretaria	1	3.077.040	3.077.040
Ingeniero de Proceso	1	7.838.300	7.838.300
Vendedor	2	4.615.560	9.231.120
Servicios generales	1	1.459.461	1.459.461
Total	6	-	33.994.081

Nota. Gastos mensuales correspondientes al personal administrativo, incluyendo prestaciones sociales y asumiendo un nivel de riesgo de entre I y III, según sea el caso.

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla anterior, los gastos anuales administrativos corresponden a COP\$407.928.972.

5.4. Ingresos

Para el cálculo de los ingresos del proyecto se tuvieron en cuenta tanto el precio de venta del bioaceite, siendo este el producto de mayor interés, como del biogás y el biocarbón. En la tabla 23 se muestran los ingresos de producción por cada uno de los productos del proceso de pirólisis, teniendo un total de ingresos de COP\$1.185.295.009.

Tabla 23.*Ingresos de producción*

Producto	Precio de Venta (COP\$/und)	Producción anual (und)	Ingresos Anuales (COP\$)
Bioaceite	14.816	27.392	405.839.872
Biogás	1.207	1.161.506	1.401.937.742
Biocarbón	159.444	967	154.182.348
Total			1.961.959.962

Nota. Ingresos de producción para cada uno de los productos de la pirólisis e ingresos totales. La unidad correspondiente para el bioaceite es barriles, para el biogás, m^3 y para el biocarbón, toneladas.

Cabe destacar que los valores correspondientes al precio de venta de cada uno de los productos de la pirólisis fueron tomados desde sus variantes comerciales, es decir, fuel oil, gas natural y carbón. La cotización fue realizada para el día 30 de Mayo de 2021.

5.5. INDICADORES FINANCIEROS

Para determinar los indicadores financieros TIR y VPN, en primer lugar, se realizó el cálculo de los flujos de caja para 5 años, teniendo en cuenta tanto los ingresos, como los costos de producción, los gastos fijos y los gastos anuales. Además, se estableció un porcentaje de impuestos del 32% [106].

Tabla 24.*Flujos de Caja para la producción de biocombustibles a partir de RSU*

Periodo	0	1	2	3	4	5
Ingresos		\$ 1.961.959.962	\$ 2.060.057.960	\$ 2.163.060.858	\$ 2.271.213.901	\$ 2.384.774.596
Costos de producción		\$ 201.119.796	\$ 211.175.786	\$ 221.734.575	\$ 232.821.304	\$ 244.462.369
Gastos fijos		\$ 48.747.096	\$ 51.184.451	\$ 53.743.673	\$ 56.430.857	\$ 59.252.400
Gastos variables		\$ 407.928.972	\$ 428.325.421	\$ 449.741.692	\$ 472.228.776	\$ 495.840.215
Depreciación activos		\$ 33.734.823	\$ 33.734.823	\$ 33.734.823	\$ 33.734.823	\$ 33.734.823
Utilidad antes de impuestos		\$ 1.270.429.275	\$ 1.335.637.480	\$ 1.404.106.095	\$ 1.475.998.141	\$ 1.551.484.789
Impuestos (32%)		\$ 406.537.368	\$ 427.403.994	\$ 449.313.950	\$ 472.319.405	\$ 496.475.133
Utilidad después de impuestos		\$ 863.891.907	\$ 908.233.486	\$ 954.792.145	\$ 1.003.678.736	\$ 1.055.009.657
Depreciación activos		\$ 33.734.823	\$ 33.734.823	\$ 33.734.823	\$ 33.734.823	\$ 33.734.823
Inversiones	\$ 1.063.995.327					
Activos fijos						
Activos diferidos						
Capital de trabajo						
Flujo Neto	\$ -1.063.995.327	\$ 897.626.730	\$ 941.968.309	\$ 988.526.968	\$ 1.037.413.559	\$ 1.088.744.480

Nota. Flujo de caja neto para los primeros 5 periodos de producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos, con un incremento del 5% anual en los ingresos, costos de producción, gastos fijos y gastos variables.

Con los resultados presentados en la tabla 24, se realizó el cálculo de la Tasa Interna de Retorno TIR y el Valor Presente Neto VPN, obteniendo resultados de 84% y COP\$731.874.000, respectivamente.

Teniendo en cuenta que, la tasa interna de retorno (TIR) es la tasa de rentabilidad que ofrece una inversión a partir del porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá la misma, es posible afirmar que para un periodo de 5 años, la producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos, ofrece una tasa de beneficio del 84%, mostrando así una buena rentabilidad a futuro para el proyecto.

Por otra parte, para un periodo de 5 años, el valor presente neto muestra un resultado positivo de COP\$731.874.000, lo cual indica que los dineros invertidos en el proyecto rentan a una tasa superior a la tasa de interés de oportunidad; por tanto, el proyecto es factible.

5.6. Análisis de los beneficios del proyecto

Como se ha mencionado anteriormente, los desechos son un tema que debe ser tratado con cuidado, aún más los residuos sólidos urbanos, los cuales debido a sus diversas características químicas, las cuales generan problemas de salubridad y deterioro al medio ambiente.[38] “Estos efectos son provocados principalmente por contaminación atmosférica, contaminación edáfica, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, afectación por olores y proliferación de plagas y aparición de focos infecciosos”. [38]

La mayoría de los problemas por olores se generan debido al proceso de descomposición donde se lleva a cabo una reducción [13]. “La acumulación de residuos urbanos y la posterior degradación con ayuda del sistema climático como el viento y la temperatura produce malos olores a las poblaciones cercanas por la producción de ácido sulfhídrico” [38]. Además de esto, para verter los residuos en los diferentes rellenos sanitarios, se hace necesario utilizar diferentes tipos de maquinaria para procesos de trituración, cernido, transporte y ventilación, lo cual en la mayoría de los casos genera ruidos fuertes y molestos, afectando así tanto a los trabajadores como a la población presente en los alrededores. [13]

Entre los diferentes beneficios tanto sociales como ambientales que se podrían presentar como consecuencia del desarrollo de este proyecto, se puede destacar:

- Conservación de recursos

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. [13]

- Recuperación de áreas

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 RSU. [13]

- Disminución en niveles de contaminación

Los altos niveles de contaminación generados por los RSU debido a su proceso natural de descomposición (producción de metano), además de la proliferación de vectores, pueden ser disminuidos con una correcta disposición y manejo de los mismos. [13]

- Conciencia ambiental

Al crear una conciencia ambiental en la población, los métodos de manejo de RSU pueden ser más efectivos, aumentando el aprovechamiento que estos pueden tener. [13]

- Aumento en la vida útil del relleno sanitario

El aprovechamiento de desechos orgánicos contribuye a la disminución de basura dispuesta en los rellenos sanitarios, ocasionando una prolongación en la vida útil de

los mismos ayudando a minimizar los impactos sociales a largo plazo consecuentes.

[13]

- Mejora de la calidad de vida de las comunidades cercanas a los rellenos sanitarios

Con el desarrollo del proyecto planteado en este trabajo de grado, además del aspecto técnico y económico, es posible destacar los beneficios que el mismo traería a las comunidades aledañas a los vertederos, aportando a la disminución de ruido y los malos olores, mejorando así la habitabilidad de estas zonas y la calidad de vida de la población.

6. CONCLUSIONES

En Colombia, el manejo de residuos sólidos es una actividad regulada por diferentes empresas prestadoras de servicios públicos, las cuales se encargan de la recolección y disposición final de los mismos en los diferentes rellenos sanitarios del país, de acuerdo con lo establecido por el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS). Sin embargo, la mayoría de rellenos sanitarios se encuentran en un punto crítico y su funcionamiento trae más problemas que beneficios, haciendo necesaria la búsqueda de alternativas para el manejo y aprovechamiento de la gran cantidad de residuos sólidos que se producen diariamente en el país.

Los componentes aprovechables presentes en los residuos sólidos orgánicos son principalmente la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, los cuales a partir de una descomposición térmica pueden ser fácilmente transformados en biocombustibles, teniendo en cuenta que estos son el 40% de la totalidad de residuos sólidos generados en las ciudades

El proceso de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos a través de la pirólisis cuenta con diferentes etapas que van desde el acondicionamiento de la materia prima, pasando por la reacción de pirólisis y finalizando en la separación y purificación de los productos, permitiendo procesar los residuos sólidos urbanos producidos en el municipio de Madrid Cundinamarca, obteniendo un total de un total de 967,3 toneladas de biochar, 4183,5 toneladas de bioaceite y 1287,7 toneladas de biogás anualmente.

Los productos de la pirólisis de residuos sólidos urbanos pueden ser considerados como biocombustibles de segunda generación, los cuales tienen múltiples usos que van desde la generación de electricidad y energía, hasta su uso como materia prima en diversos compuestos químicos y combustibles.

La pirólisis es un método térmico con un alto potencial para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos ya que permite obtener diferentes tipos de productos dependiendo las condiciones de operación con las que se trabaje, a diferencia de la gasificación, la cual es empleada únicamente para la obtención de biogás. Por otra

parte, el impacto ambiental generado por la pirólisis es mucho menor en comparación con la incineración, siendo este último un método que genera productos sumamente nocivos para la salud y diversos problemas a las comunidades aledañas.

La pirólisis como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos es un proceso que incluye diversos costos para su desarrollo. A partir del análisis de dichos costos y los ingresos, fue posible determinar la tasa interna de retorno del proyecto, identificando que la producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos ofrece una tasa de beneficio del 84%, mostrando así una buena rentabilidad a futuro para el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Salud (Julio 26, 1983). “Decreto 2104 de 1983”. [En línea]. Disponible en: <http://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?id=1802220> [Acceso: enero 04, 2021].
- [2] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. “‘Bogotá debe ser más ambiciosa en el reciclaje y separación en la fuente’: Ministro de Ambiente” (2018). [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/3610-bogota-debe-ser-mas-ambiciosa-en-el-reciclaje-y-separacion-en-la-fuente-ministro-de-ambiente> [Acceso: enero 04, 2021].
- [3] Semana, “Basura a punto de explotar”, Mayo 11, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://sostenibilidad.semana.com/impacto/articulo/manejo-de-residuos-en-colombia-es-una-bomba-a-punto-de-estallar/40963>. [Acceso: enero 04, 2021]
- [4] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (Octubre 17, 2018). “PIENSA UN MINUTO ANTES DE ACTUAR : GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS” [En Línea]. Disponible en: <https://cutt.ly/snvshdE> [Accedido: Enero 04, 2021]
- [5] A. Barradas R., “Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales ESTADO DEL ARTE.” tesis doc. Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico de Minatitlán, Minatitlán, Veracruz, México, 2009.
- [6] Ambiente Bogotá, “Residuos peligrosos y especiales”. Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2015. [En Línea] Disponible en: <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/residuos-especiales-y-peligrosos> [Accedido: Enero 04, 2021]
- [7] P. A. Salazar S., Evaluación y seguimiento del manejo de residuos especiales y peligrosos generados en la Universidad de Córdoba - campus Berástegui, tesis pre. Facultad de Ingeniería, Universidad de Córdoba, Montería, Córdoba, 2020.

- [8] A. Mulero Mendigorri, "Residuos sólidos urbanos e industriales: situación y gestión en España," *Estudios Geográficos*, vol. 59, no. 232, p. 473, Jul. 2018, doi: 10.3989/egeogr.1998.i232.612.
- [9] Gobierno de España. "Biorresiduos," Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2019. [En Línea] Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/biorresiduos/> [Accedido: Enero 04, 2021]
- [10] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental. Residuos sólidos. Guía para la separación en la Fuente. GTC 24. Bogotá: ICONTEC, 2009, p. 7.
- [11] Secretaria General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (Agosto 06, 2002). "Decreto 1713 de 2002". [En Línea] Disponible en: <https://www.mincit.gov.co/ministerio/normograma-sig/procesos-de-apoyo/gestion-de-recursos-fisicos/decretos/decreto-1713-de-2002.aspx> [Accedido: Enero 04, 2021]
- [12] CCA (2017). Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte. [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/Vnvsd7j> [Accedido: Enero 04, 2021]
- [13] G. Jaramillo Henao y L. M. Zapata Márquez, Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia, tesis esp. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2008.
- [14] C. A. Severiche S., R. L. Acevedo B., "Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación", *Ingenium*, vol 14, no.28, pp. 6-15, sept, 2013, doi: <https://doi.org/10.21500/01247492.1330> [Acceso: Enero 05, 2021]
- [15] Urbaser. "Estado de los Rellenos Sanitarios en tiempos de cambio climático",

Cátedra Ambiental Internacional Urbaser, 2021. [En Línea] Disponible en: <https://urbaser.co/wp-content/uploads/2021/03/Memoria-Catedra-Ambienta-2403-.pdf> [Accedido: Abril 07, 2021]

[16] Corantioquia. “Gestión Integral de residuos sólidos”. Gobierno de Antioquia. 2018. [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/ynvsae3> [Accedido: Enero 05, 2021]

[17] Instituto Nacional de Salud (Mayo, 2010). “Manual de Gestión Integral de Residuos”.

[18] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Junio 06, 2003). “Decreto 1505 de 2003” [En Línea] Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Normativa/Decretos/dec_1505_060603.pdf [Accedido: Enero 05, 2021]

[19] A. Saez, J. A. Urdaneta G. “Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe”, Rev. Omnia. vol 20, no 3, pp. 121-135, dic, 2014. [En Línea] Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf> [Acceso: Enero 05, 2021]

[20] El Tiempo, “Los cuatro rellenos en crisis que pueden causar emergencias sanitarias”, Octubre 13, 2018. [En Línea] Disponible en: <https://www.eltiempo.com/justicia/investigacion/colombia-no-tiene-rellenos-sanitarios-y-mantiene-un-mal-manejo-de-basuras-279956> [Accedido: Enero 05, 2021]

[21] Semana, “Basuras en Colombia: un problema al que no se le puede echar tierra”, Octubre 13, 2020. [En Línea] Disponible en: <https://www.semana.com/impacto/articulo/basuras-en-colombia-un-problema-al-que-no-se-le-puede-echar-tierra---noticias/56387/> [Accedido: Enero 05, 2021]

[22] K. M. Noguera-Oviedo, J. Olivero-Verbel, “Los rellenos sanitarios en latinoamérica: Caso colombiano,” Rev- Investig, Rev. Acad. Colomb. Cienc., vol 34, no 132, pp. 347-356, Sep., 2010. [En Línea] Disponible

en:https://www.researchgate.net/publication/301799194_Los_rellenos_sanitarios_en_latinoamerica_Caso_colombiano [Accedido: Enero 05, 2021]

- [23] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (Diciembre, 2019). “Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2018”. [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/0nvsolz> [Accedido: Enero 05, 2021]
- [24] E.S.P. “Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo RSNM”, Empresa de Servicios Públicos de Cajicá S.A. [En Línea] Disponible en: <https://www.epccajica.gov.co/wp-content/uploads/2019/10/INFORMACION-ASEO-CCU.pdf> [Accedido: Marzo 23, 2021]
- [25] Superservicios. “Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo”, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019. [En línea] Disponible en: <https://cutt.ly/8nvsy2M> [Accedido: Febrero 19, 2021]
- [26] Semana, “Así cambiará el reciclaje en Colombia tras entrada en vigencia de una norma”, Octubre 20, 2020. [En Línea] Disponible en: <https://www.semana.com/empresas/articulo/cuales-son-las-politicas-de-reciclaje-en-colombia/304115/> [Accedido: Febrero 19, 2021]
- [27] Semana, “El 78% de los hogares colombianos no recicla,” Marzo 01, 2020. [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/knvstFC> [Accedido: Febrero 19, 2021]
- [28] M. Medina, “Cooperativas de recicladores Informales en América Latina”, Colegio de La Frontera Norte, Tijuana, B.C., México, 2017. [En Línea] Disponible en: <https://silo.tips/download/cooperativas-de-recicladores-informales-en-america-latina> [Accedido: Febrero 19, 2021]
- [29] A. M. Aguirre-Sierra, “Aprovechamiento de Residuos Sólidos en Colombia” Universidad Pontificia Bolivariana, 2018. [En Línea] Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.11912/3644> [Accedido: Enero 12, 2021]
- [30] P. Román, M. M. Martínez, A. Pantoja, “Manual de Compostaje del Agricultor.

Experiencias en América Latina.” Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, ONUAA (FAO). [En Línea] Disponible en: <http://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf> [Accedido: Enero 12, 2021]

[31] P. Bueno Márquez, M. Jesús, D. Blanco, and F. Cabrera Capitán, “Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de compostaje.” Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva. [En Línea]. Disponible en: <https://cutt.ly/UnvsrkT> [Accedido: Enero 12, 2021]

[32] J. Moreno, R. Moral, Compostaje, España: Mundi-Prensa Libros, S.A., 2007.

[33] E. Salinas Callejas y V. Gasca Quezada, “Los Biocombustibles”, El Cotidiano., n.157, pp. 75–82, Sep, 2009, doi: 10.1787/agr_outlook-2010-6-es. [Accedido: Enero 12, 2021]

[34] A. D. Gonzalez, V. Kafarov, “PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES DE TERCERA GENERACIÓN: EXTRACCIÓN DE ACEITE DE MICROALGAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL”, En nombre del IV Simposio de Química Aplicada – SIQUIA, 2009, pp.2-10.

[35] M. Armenta-Bojórquez et al., “BIOFERTILIZANTES EN EL DESARROLLO AGRÍCOLA DE MÉXICO” Ra Ximhai, vol. 6, no. 1, pp. 51–56, 2010, [En Línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/461/46112896007.pdf>.

[36] DGDCUNAM, “Así funcionan los biofertilizantes,” Universidad Nacional Autónoma de México, Divulgaciones de Ciencia, 2016. [En línea] Disponible en: http://ciencia.unam.mx/leer/570/Asi_funcionan_los_biofertilizantes [Accedido: Enero 12, 2021].

[37] J. L. Sánchez T. MODELACIÓN DE LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS COMO ALTERNATIVA COMPLEMENTARIA AL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN BOGOTÁ, tesis pre. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia, 2012.

- [38] X. E. Castells, Tratamiento y valorización energética de residuos. 1ra Ed. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2012.
- [39] S. Boslaugh. Gasification. Salem Press Encyclopedia. 2020. [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/4nvwco> [Accedido: Mar. 23, 2021]
- [40] D. X. Bastidas I., N. A. Miño P., Caracterización comparativa del proceso de pirólisis de dos biomásas, tesis pre. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2019.
- [41] M. Klug, "Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa," Rev de Química PUCP, vol 26, no 1-2, pp. 37-40, 2012. [En Línea] Disponible en: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547/5543> [Accedido: Enero 13, 2021]
- [42] A. Urien P. "OBTENCIÓN DE BIOCARBONES Y BIOCOMBUSTIBLES MEDIANTE PIROLISIS DE BIOMASA RESIDUAL," tesis M.Sc. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, España, 2013.
- [43] M. del C. Hernández-Berriel et al., "GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE," Rev. Internacional de Contaminación Ambiental, vol. 32, no. Residuos sólidos, pp. 11–22, Dic. 2016, doi: 10.20937/rica.2016.32.05.02. [Accedido: Enero 13, 2021]
- [44] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico y Ambiental. Seminario sobre el aprovechamiento y manejo de los residuos sólidos. Manizales. Mayo 5. 2004. p. 3.
- [45] Unidad Administrativa Especial De Servicios Públicos. (Diciembre, 2011) "Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en la ciudad de Bogotá D.C. 2011". [En Línea] Disponible en: http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/documentos/caracterizacion/residenciales_02-29-2012.pdf [Accedido: Enero 14, 2021]

- [46] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. ““Los municipios están en mora de cumplir con los planes de Gestión de Residuos Sólidos”: viceministro de ambiente” [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/5nva7j3> [Accedido: Enero 14, 2021]
- [47] Contraloría de Cundinamarca. (2019) “Gestión Integral de los Residuos Sólidos en el departamento de Cundinamarca,” [En Línea] Disponible en: <http://www.contraloriadecundinamarca.gov.co/images/INFORME%20RESIDUOS%20SOLIDOS.pdf> [Accedido: Enero 14, 2021]
- [48] Alcaldía Municipal de Madrid. (2017) “Actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) del Municipio de Madrid dando Cumplimiento a la Resolución 0754 de 2014.” [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/cnva3oY> [Accedido: Enero 14, 2021]
- [49] A. Steinvorth, “Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada,” *Éxito Empresarial*, No 253, 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_253_240314es.pdf [Acceso: 24 de marzo 2021]
- [50] I. Delfín-Alcalá Y C. Durán-De-Bazúa, “Biodegradación De Residuos Urbanos Lignocelulósicos Por Pleurotus,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 19, no. 1, pp. 37–45, 2017. [En Línea]. Disponible en: <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/25180/23672#>. [Accedido: Enero 14, 2021]
- [51] I. Gutiérrez-Rojas, N. Moreno-Sarmiento, y D. Montoya, “Mecanismos y regulación de la hidrólisis enzimática de celulosa en hongos filamentosos: casos clásicos y nuevos modelos,” *Rev. Iberoamericana de Micología*, vol. 32, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.riam.2013.10.009.
- [52] P. F. Gañán et al., “Celulosa: un polímero de siempre con mucho futuro,” *Rev.*

Colombiana de Materiales, Edición Especial, pp. 01-04, Ago. 30, 2017. [En Línea]
Disponibile en: <https://cutt.ly/unva2Su> [Accedido: Enero 14, 2021]

[53] A. N. García C., Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos, tesis doc. Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, España, 1993.

[54] A. Alvarez-Castillo et al., “Aprovechamiento Integral de los Materiales Lignocelulósicos,” Rev. Iberoam. Polim, vol. 13, no. 4, pp. 140–150, 2012, [En Línea]. Disponible en: <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/SEPT12/alvarez.pdf>. [Accedido: Enero 20, 2021]

[55] S. Rivas S. Valoración de Hemicelulosas de Biomasa Vegetal, tesis doc. Facultad de Ciencias de Ourense, Universidad de Vigo, Ourense, España, 2014.

[56] R. Millán, L. María, C. Domínguez, M. Alejandra, S. Vargas, and F. Emiro, “Effect of temperature on energy potential of pyrolysis products from oil palm shells,” Rev. Tecnura, vol. 20, no. 48, pp. 89–99, 2016, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a06.

[57] 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.

[58] Innergy, “Horno rotativo, cámaras de combustión innergy,” Innergy. [En Línea] Disponible en: <https://innergy-global.com/es/divisiones/innergy-heavy-industries/soluciones/sistemas-de-combustion/horno-rotativo-rotaterm> [Accedido: Enero 20, 2021]

[59] J. Greaves G. Modelado Cinético de la Pirólisis Rápida de Biomasa en Reactor Spouted Bed Cónico, tesis pre. Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco, España, 2019.

[60] J. I. Montoya Arbeláez et al., Pirólisis rápida de biomasa, 1st ed. Diciembre. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2014.

- [61] W. D. Fonseca J., Evaluación de un reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta, tesis M. Sc. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2016.
- [62] G. A. Obando, Condiciones de diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos (ROS), tesis M. Sc. Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas, Universidad de Manizales, Manizales, Colombia, 2015.
- [63] A. C. Andrade G., A. C. Corredor R. Análisis Energético Del Esquema Tecnológico Del Proceso De Pirólisis Rápida Para La Producción De Bioaceites A Partir De Neumáticos De Desecho, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2019.
- [64] SEDESOL. Manual Técnico, Administrativo para el servicio de Limpia Municipal. pp. 104. [En Línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/15481573-6-1-antecedentes-6-0-pirolisis-sedesol.html> [Acceso: Febrero 01, 2021]
- [65] D. F. Garzón A., Aprovechamiento de los Residuos Orgánicos del Relleno de Doña Juana para Obtención de Energía, tesis post. Facultad de Educación Permanente y Avanzada, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., Colombia, 2019.
- [66] Gobierno de España. "Sistemas de Tratamiento," Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2019. [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/PnvaMM5> [Accedido: Febrero 04, 2021]
- [67] McLanahan, "Manipulación y reciclaje de Residuos," McLanahan. [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/MnvaNzD> [Accedido: Febrero 05, 2021]
- [68] E. Martines L., L. Lira C., "Análisis y Aplicación de las Expresiones del contenido de Humedad en Sólidos", En nombre de Simposio de Metrología, 2010, pp. 01-06.
- [69] C. A. Alonso, E. Martinez-Nieto y J. Olías. Manual para la gestión de residuos

urbanos, 1a Ed. España: El consultor de los ayuntamientos, 2003.

- [70] R.M. Roque, Uso de la Biomasa Forestal y Resultados de Propiedades Dendroenergéticas para Especies de Interés. Universidad Nacional de Ciencias Forestales, 2017.
- [71] Dorset GM, “Secado de Biomasa”, Dorset GM Green Machines. [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/vnvskLj> [Accedido: Febrero 05, 2021]
- [72] D. E. Arias-Pozo, A. S. Mayorga-Pardo, Estudio del proceso de trituración de los residuos sólidos orgánicos para reducir la contaminación residual en el mercado mayorista de Ambato, tesis pre. Facultad de Ciencia e Ingeniería, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2013.
- [73] N. P. Waganoff, Trituración-Molienda y Separación de Minerales, 1a Ed. Buenos Aires: Librería Editorial Alsina, 1956.
- [74] Facultad de química UNAM. “Procesos De Separación I”. [En Línea] Disponible en: <http://depa.fquim.unam.mx/procesos/PDF/ProcesosI.pdf> [Accedido: Febrero 08, 2021]
- [75] C. A. Echeverri L., “Diseño óptimo de ciclones,” Rev. Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 5, no. 9, pp. 123–139, Jul. 2006, [En Línea] Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242006000200011. [Accedido: Febrero 08, 2021]
- [76] O. A. Jaramillo, Intercambiadores de calor, Centro de Investigaciones en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 2017.
- [77] I. Martín, R. Salcedo, R. Font., “Mecánica de fluidos: Tema 5. Operaciones separación sólido-fluido”, Universidad de Alicante. [En Línea] Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/11/tema5_operaciones%20separacion.pdf [Accedido: Febrero 08, 2021]

- [78] S.C. Rojas G., Determinación de las condiciones necesarias para la obtención de lecho fluidizado en un reactor pirolítico mediante experimentación en un modelo en frío transparente, tesis pre. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia, 2014.
- [79] M.E. Durán G., “Reactores de Lecho Fluidizado y Lecho Burbujeante en la Gasificación de Biomasa Residual”, Rev Fuentes: El Reventón Energético, vol 12, no. 2, pp. 35-43, jul/dic 2014. [En Línea] Disponible en: <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/viewFile/4789/4935> [Accedido: Febrero 08, 2021]
- [80] D. Marrupe A., Diseño de un reactor de Lecho Fluidizado para la Transformación Termoquímica de Biomasa u Otros Combustibles, tesis pre. Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2014
- [81] D. Chivatá T y C.C. Duarte F., Diseño Conceptual de una Planta para el Aprovechamiento de Caucho Molido de Neumáticos Usados a partir de Pirólisis, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., Colombia, 2018.
- [82] I. Ledesma M., Diseño de una planta piloto de pirólisis rápida de la fracción orgánica de rechazo de RSU, tesis pre. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2017.
- [83] L.A. Blanco L., Modelado y simulación del proceso de pirólisis rápida de biomasa en un reactor de lecho fluidizado, tesis M.Sc. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia, 2014.
- [84] P. de Wild, H. Reith y E. Heeres, “Biomass pyrolysis for chemicals,” Biofuels, vol. 2:2, pp. 185-208, 2011. doi: 10.4155/bfs.10.88
- [85] A. S. Kalgo, The development and optimisation of a fast pyrolysis process for bio oil production, tesis doc. Aston University, Birmingham, U.K., 2011.

- [86] P. Basu, "Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design." Elsevier Inc, Burlington, MA, 2010.
- [87] A. V. Bridgwater, D. Meier, y D. Radlein, "An overview of fast pyrolysis of biomass," Rev. Org. Geochem., vol. 30, no. 12, pp. 1479–1493, Dec. 1999. doi:[https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(99\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(99)00120-5)
- [88] F. Santos, J. Colodette y J. H. de Queiroz, Bioenergía & Biorrefinaria - Cana-de Açúcar & Espécies Florestais, Brasil: Produção Independente, 2013.
- [89] M. Hadzich, Termodinámica Problemas y Aplicaciones en Ingeniería 1. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. 2006
- [90] Weather Spark, Clima promedio en Madrid Colombia, Weather Spark. [En Línea] Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/23360/Clima-promedio-en-Madrid-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o> [Accedido: Mayo 30, 2021]
- [91] Tiempo y Temperatura, El Tiempo en Madrid, Colombia, tiempoytemperatura.es [En Línea] Disponible en: <http://tiempoytemperatura.es/colombia/madrid.html> [Accedido: Mayo 30, 2021]
- [92] The Weather Channel, Pronóstico del tiempo y condiciones meteorológicas para Madrid, Cundinamarca, weather.com [En Línea] Disponible en: <https://weather.com/es-CO/tiempo/hoy//eefd66d2696bd1eee20599a5ad47982cc7ccee114d5bb9fdeff2894e0a9b6b99> [Accedido: Mayo 30, 2021]
- [93] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2011) "Manual de Biogás"
- [94] RECOPE. (2011) "Manual de Productos". [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/AmTU9aK> [Accedido: Mayo 30, 2021]
- [95] R. Westerhof, et al., "Fractional Condensation of Biomass Pyrolysis Vapors", Rev.

Investig. Energy&Fuels, vol 1, no. 25, pp. 1817-1829, 2011. doi: dx.doi.org/10.1021/ef2000322

[96] Interempresas, “Los molinos trituradores en el proceso de reciclaje de plásticos”, Canales Sectoriales Interempresas. [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/hnvszPt> [Accedido: Febrero 08, 2021]

[97] Interempresas, “Tamiz de finos Daga MR52 - Industria del agua - Tamiz de finos”, Feria Virtual Interempresas. [En Línea] Disponible en: <http://www.interempresas.net/Agua/FeriaVirtual/Producto-Reja-tamiz-Daga-MR52-113998.html> [Accedido: Febrero 24, 2021]

[98] X.M. Campoverde J., Obtención y Valoración de Combustible Líquido por medio de Pirólisis, a partir de Residuos Domésticos, tesis pre. Facultad de Ciencias, Universidad Politecnica Salesiana, Sede Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2016.

[99] Q. Bu et al., “Production of phenols and biofuels by catalytic microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass,” Rev. Bioresource Technology, vol. 108, pp. 274–279, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2011.12.125.

[100] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. “Gestion integral de Residuos de Aparatos Electrónicos”. [En Línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/e-book_rae_/contenido_2_3.html [Accedido: Mayo 30, 2021]

[101] Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2016) “Documento CONPES 3874”, [En Línea] Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf> [Accedido: Mayo 30, 2021]

[102] R. Muther. Distribución en Planta. 2a ed., España: Editorial Hispano Europea, 1970.

- [103] L. E. Cuellar Y. y Y. C. Soto T. Proyecto de Construcción de una Bodega para la Empresa Refriautomatismos, tesis esp. Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Piloto de Colombia, Colombia, Bogotá, 2013.
- [104] Gerencie.com, “Vida útil de los activos fijos o depreciables”. [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/1nvhQ5Q> [Accedido: Mayo 30, 2021]
- [105] J. D. Arias Sánchez y C. J. García Mejía, Análisis Comparativo de Proyectos de Aprovechamiento Energético de Residuos Orgánicos Biodegradables Utilizando Evaluación Financiera, tesis pre. Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2016.
- [106] La República, “La tarifa del impuesto de renta a empresas en Colombia es de las más altas de la Oede”, Junio 04, 2021. [En Línea] Disponible en: <https://cutt.ly/RnvhLw2> [Accedido: Mayo 31, 2021]
- [107] A. C. Martinez 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.
- [108] Enfrecycling. “Directorio de ENF de la Industria del Reciclaje”. Shenzhen Zhongrui Weishi Optoelectronic Co., Ltd. [En línea] Disponible en: <https://es.enfrecycling.com/shenzhen-zhongrui-weishi-optoelectronic-co-ltd/id/30005> [Acceso: Abril 14, 2021].
- [109] XKJ Group “China Henan Xingyang Mining Machinery Manufactory”. China XKJ Group. [En línea] Disponible en: <https://www.xkjgroup.com/> [Acceso: Abril 14, 2021].
- [110] Grnwe Machinery Co.,Ltd., “Waste plastic recycling plant| pet, pe/pp, abs/ps recycling line| Plastic Crusher”. Machine-DONGGUAN GRNWE MACHINERY CO.,LTD. [En línea] Disponible en: <https://cutt.ly/8nvaCyt> [Acceso: Abril 14, 2021].
- [111] Gaofu, “Sieving Machine Manufacturer - Gaofu”, Screening Machine Company,

[En Línea] Disponible en: <https://www.gaoful.com/> [Acceso: Abril. 14, 2021]

[112] Haiwang Technology Group, “Cyclone”, Haiwang [En Línea] Disponible en: <http://en.wh-hw.com/> [Acceso: Abril 14, 2021]

[113] Rayentank Co., Ltd. “ Products - Tuber Heat Exchanger“ Wenzhou Rayen Machinery Co., Ltd. [En línea] Disponible en: <http://www.rayentank.com/products.html> [Acceso: Abril 14, 2021].

[114] Jhenten “JHENTEN MACHINERY CO.,LTD.,” Jhenten [En Línea] Disponible en: <https://www.jhenten.com/en/> [Acceso: Abril 14, 2021]

[115] Purity Pump Co., LTD “Monoblock Pump, End Suction Pump supplier” China Centrifugal Pump manufacturer. [En Línea] Disponible en: <https://cnpurity.en.made-in-china.com> [Accedido: Abril 14, 2021]

[116] J. R. Rumble. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 101st Ed. New York: Advisory Board, 2020.

[117] Enel Codensa, “Tarifas de energía”. Grupo Enel Colombia, [En Línea]. Disponible: <https://www.enel.com.co/es/personas/tarifas-energia-enel-codensa.html> [Acceso: Abril 10, 2021]

LISTA DE ABREVIATURAS

RSU. Residuos Sólidos Urbanos
INS. Instituto Nacional de Salud.
PGIRS. Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos.
CRA. Comisión Reguladora de Agua potable y saneamiento básico.
CARDER. Corporación Autónoma Regional de Risaralda.
CAR. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
FS. Fundación Social.
SUI. Sistema Único de Información.
BFB. Reactor de Lecho Burbujeante (Bubbling Fluidized Bed)
bs. Biomasa seca.
as. Aire seco.
w. Agua.
 \dot{m} . Flujo másico.
 C_p . Calor específico.
 Q . Energía.
 W . Trabajo
 ΔH . Cambio de entalpía
 ΔE_c . Cambio de energía cinética.
 ΔE_p . Cambio de energía potencial.
 h . Entalpía.
 x . Composición.
 dT . Derivada con respecto a la Temperatura
 ∂T . Derivada parcial con respecto a la Temperatura
 ∂t . Derivada parcial con respecto al tiempo.
 T . Temperatura.
CONPES. Consejo Nacional de Política Económica y Social
TIR. Tasa Interna de Retorno.
VPN. Valor Presente Neto.
COP. Peso Colombiano.
CREG. Comisión de Regulación de Energía y Gas.

ANEXOS

ANEXO 1
ESPECIFICACIONES DEL PROCESO

Tabla de Balance de Materia

N°.Corriente	Características				
	Flujo másico (kg/s)	Flujo Volumétrico (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Temperatura (°C)	Presión (bar)
1	0.703	*	*	19	1.05
2	0.265	*	*	19	1.05
3	0.438	*	*	19	1.05
4	25.1	21.09	1.19	19	1.05
5	25.3	2.76	9.18	19	1.05
6	0.207	*	*	19	1.05
7	0.207	*	*	19	1.05
8	0	*	*	19	1.05
9	0.207	*	*	19	1.05
10	0.207	*	*	487.5	1.05
11	0.031	7.21e ⁻⁵	430	487.5	1.05
12	0.031	7.21e ⁻⁵	430	19	1.05
13	0.176	*	*	487.5	1.05
14	0.176	*	*	200	1.05
15	0.135	1.41e ⁻⁴	960	200	1.05
16	0.135	1.41e ⁻⁴	960	19	1.05
17	0.041	0.037	1.10	200	1.05
18	0	*	*	200	1.05
19	0.041	0.037	1.10	200	1.05
20	0.041	0.037	1.10	19	1.05
Agua Enfriamiento	0.271	2.71e ⁻⁴	1000	19	1.05

Nota. Tabla de Balance de Materia para el diagrama de proceso presentado en la figura 15. Debido a la complejidad de la composición de algunas corrientes, se desconoce su valor de densidad y, por consiguiente, su flujo volumétrico, razón por la cual son marcados como *.

ANEXO 2.

FICHAS TECNICAS PARA LOS EQUIPOS PROPUESTOS

Clasificador de residuos sólidos

Modelo	6SXZ-68	6SXZ-136	6SXZ-272	6SXZ-408	6SXZ-612	6SXZ-680
Salida (t/h)	0,6-1	1,2-2	2,4-5	4-7	6-10	8-16
Llevar más (malo: Bueno)	> 12,5: 1	> 12,5: 1	> 12,5: 1	> 12,5: 1	> 12,5: 1	> 12,5: 1
Clasificación de precisión	≥ 99.99%	≥ 99.99%	≥ 99.99%	≥ 99.99%	≥ 99.99%	≥ 99.99%
Voltaje (V/Hz)	220V, 50HZ	220V, 50HZ	220V, 50HZ	220V, 50HZ	220V, 50HZ	220V, 50HZ
Fuente de alimentación (Kw)	1,0-1,3	1,4-1,8	2,5-2,9	4,8-5,2	6,6-7,2	8,5-10,5
Presión (Mpa)	0,4-0,6	0,5-0,7	0,6-0,8	0,6-0,8	0,6-0,8	0,6-0,8
Consumo de aire (L/min)	<1000	<1800	<3200	<4800	<5600	<6100
Peso	260kg	440kg	820kg	1180kg	1620kg	2200kg
Dimensión	950*1510*1428mm	1290*1510*1770mm	2010*1530*2100mm	2680*1530*2100mm	3710*1530*2100mm	4200*1530*2250mm

Secador de tambor giratorio para biomasa

Type:	Three Cylinder/Four Cylinder
Dryer Material:	Alloy Steel Plate
Voltage(v):	380
Capacity(t/h):	5-50
Early moisture(%) :	15%
Final moisture(%) :	below 0.5-1%
Dryer service life:	Over 10 years
Suitable materials:	Drying non-sticky, good fluidity material, such as sand, coal ash, pulverized coal, mineral, slag.
Drying material size(mm):	below 20-40mm block material, aggregates, powder materials
Application:	Cement plant, slag powder and dry-mixed mortar production line.
Weight(ton):	According to capacity customized
Matching Parts:	cylinder device,transmission device,overall stand,rolling support,Sealing device,discharge end,Closed air discharge device

Molino de trituración

Model	MG-3HP	MG-5HP
Rotary speed (RPM)	150	150
Rotor knives	24	30
Fixed knives	8	10
Rotor diameter (mm)	185	185
Rotary zone width	335	395
Feed port	400x400	600x400
Crushing chamber	400x400	600x400
Power (KW)	2.2	3.7
Weight	150	160
Dimensions (MM)		
Length A	800	800
Height B	650	660
Height C	580	580
Length D	515	570
Width E	470	470
Width F	435	435

Tamiz de finos

Model	Size (mm)	Material granularity(mm)	screen surface leanangle(°)	Amplitude (mm)	Layers	Power(kw)
SZF-520	500X2000	0.074-10	0°-7°	4-10	1-6	2x(0.4-0.75)
SZF-525	500X2500					2x(0.4-0.75)
SZF-1020	1000X2000					2x(0.4-0.75)
SZF-1025	1000X2500					2x(0.4-1.1)
SZF-1030	1000X3000					2x(1.1-1.5)
SZF-1040	1000X4000					2x(1.1-1.5)
SZF-1235	1200X3500					2x(1.1-2.2)
SZF-1250	1200X5000					2x(1.1-2.2)
SZF-1535	1500X3500					2x(1.1-2.2)
SZF-1565	1500X6500					2x(2.2-3.7)
SZF-1845	1800X4500	0.074-15				2x(2.2-3.7)
SZF-2050	2000X5000					2x(2.2-3.7)
SZF-2260	2200X6000					2x(2.2-3.7)
						2x(2.2-3.7)

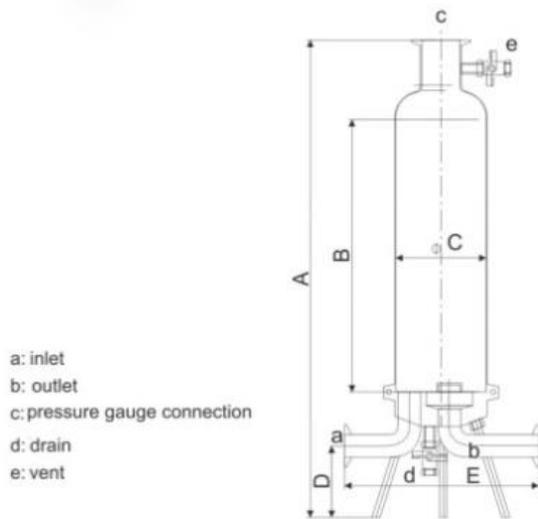
Separador ciclónico colector de polvo

Model		Unit	Nx400	Nx500	Nx600	Nx700	Nx800	Nx900
Model of mill		m	1.5	1.83	2.2	2.4	2.6	3.0
Output	Materials	t/h	14-20	19-28	28-35	33-46	52-65	75-95
	Cement	t/h	12-16	16-22	20-26	26-35	43-54	68-76
Fineness	Materials	%	8-10					
	Cement	%	2-4					

Condensador

Model	Product capacity (T/H)	Working temperature (°C)	Heat exchanger area(m ²)	The Diameter of Pipe(mm)
LEX-1	1	20-147°C (According to customer requirements)	0.1~20M ²	Φ6/Φ9/Φ12/Φ16/Φ19/ Φ25mm
LEX-2	2			
LEX-3	3			
LEX-5	5			
LEX-8	8			
LEX-10	10			
LEX-15	15			
LEX-20	20			
LEX-30	30			
we can design drawing according to your requirements.				

Filtro de gases combustibles



Name	Inner Surface
Max Operate Pressure (Mpa)	1.0
Max Operate Temp	110
Pressure Tolerance On Weld	0.85
Corrosion By Acid	0

Bomba

Model no.	FS50-32	FS65-40	FS65-50	FS80-65
HS code	8413709990			
Power up to	1.1-4kW	1.5-7.5kW	3-11kW	4-22kW
Voltage	1x220V-240V, max. 2.2kW; 3x380V-415V		3x380V-415V	
Frequency	50Hz			
Pipe size	50x32mm	65x40mm	65x50mm	80x65mm
Cable	No Cable			
MOQ	10pcs			
LOGO	WASSERMANN or OEM			
Certificate	CE			
Packing	Carton, 8pcs/ctn			
Warranty	18 months			
Payment term	TT,LC, any pay way can support			
Delivery term	30-40 days on receipt of the down payment or LC			
Loading Port	Ningbo, Shanghai, any port in China			
Sample	Free sample to check quality for order confirmation			

All the parts of product are tested 100%, better quality control, competitively price, timely deliver. We are the professional water pump factory !

ANEXO 3

RECOMENDACIONES

Es de vital importancia realizar una previa evaluación de los residuos sólidos urbanos presentes en el relleno sanitario con el que se trabajará, con el fin de conocer con mayor exactitud los componentes a tratar en el proceso de pirólisis.

Realizar una debida supervisión del equipo de clasificación de residuos sólidos urbanos para evitar que residuos sólidos inorgánicos pasen al reactor de pirólisis, puesto que dichos elementos requieren una mayor cantidad de energía para su transformación y pueden afectar los productos finales.

Calcular los balances de energía para cada una de las operaciones y procesos unitarios involucrados en el proceso, con el fin de tener un dato más acertado de los costos energéticos del mismo. Además, tener en cuenta la posibilidad de utilizar aire caliente para la operación de secado y tener en cuenta los respectivos costos energéticos.

Realizar el dimensionamiento exacto de cada uno de los equipos involucrados en el proceso, teniendo en cuenta la cantidad de material a procesar. Además, para el dimensionamiento del secador, realizar la curva de secado correspondiente a la biomasa, con el fin de obtener resultados más específicos y acertados.

El dimensionamiento del reactor presentado esta basado en un estudio igualmente teórico, por lo que se recomienda realizar dicho dimensionamiento de forma exhaustiva, teniendo en cuenta los diferentes parámetros de los fluidos, el diámetro y peso la arena del lecho, los caudales tanto de la alimentación como de las recirculaciones, el diámetro de alimentación, la variación de la fracción de sólidos en función a la altura y realizar las correspondientes simulaciones previas a la construcción del mismo.

Para el análisis de los costos de inversión, realizar las cotizaciones respectivas a los equipos dimensionados, puesto que los valores planteados en este trabajo de grado

corresponden a un aproximado de los costos de cada equipo, teniendo en cuenta su ficha técnica, más no es un valor exacto.

Determinar parámetros como el calor específico de los residuos sólidos urbanos y de los productos de manera experimental con el fin de conocer con mayor exactitud los requerimientos energéticos de cada uno de los equipos que intervienen en el proceso.

Analizar los costos involucrados con la purificación del biogás, puesto que este contiene CO_2 , H_2S , vapor de agua, nitrógeno y oxígeno, generando un producto con más de 97% de metano, siendo este más adecuado para su uso comercial.

Incluir la demanda presente para los tres productos de pirólisis a la hora de determinar el tamaño de la planta para desarrollar un correcto diseño de la misma.

En caso de desarrollar el proyecto de manera experimental, realizar la debida caracterización de los productos de la pirólisis de los residuos sólidos urbanos, con el fin de determinar si sus características fisicoquímicas están acordes a lo exigido de manera comercial.