

Evaluación Termo-económica del aprovechamiento de los residuos sólidos en la Universidad

Industrial de Santander

Fabio Andres Ortiz Ochoa

Trabajo de Grado para optar al título de Magister en Ingeniería Mecánica

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Ph.D. en Ingeniería Química

Codirector

Fredy Augusto Avellaneda Vargas

Ph.D. en Ingeniería Química, Ambiental y Procesos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Maestría en Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mi amada madre Sonia Ochoa Barragán, quien con su esfuerzo, dedicación y sacrificio nos enseñó a seguir adelante por difícil que parezca el camino, ella ha sido el pilar de mi vida y a quien le debo todo lo que soy.

A mis hermanos Erika Patiño Ochoa y Leonardo Patiño Ochoa, mis cómplices de vida, a ellos gracias por estar ahí siempre, los amo con todo mi ser.

A mi mentor Henry Ochoa Álvarez, quien creyó en mis capacidades, infundió en mí el amor por el estudio y me apoyó para ser profesional, sin su ayuda nada de esto hubiese sido posible.

A mi director de tesis, el profesor Ph.D. Yesid Javier Rueda Ordóñez, por darme la oportunidad de ser parte de este proyecto, por compartir su experiencia y conocimiento.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	11
Abstract.....	12
Introducción.....	13
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
Estructura de la tesis.....	17
2. Evaluación termo-económica de los residuos sólidos orgánicos.....	18
2.1 Introducción.....	18
2.2 Materiales y métodos.....	24
2.3 Descripción.....	25
2.4 Análisis próximo.....	26
2.5 Poder calorífico.....	26
2.6 Análisis termodinámico.....	27
2.6.1 Propuesta de planta piloto.....	27
2.6.2 Balance de materia.....	29
2.6.2.1. Secador.....	29
2.6.2.2 Reactor.....	30
2.6.3 Análisis energético.....	31
2.6.3.1 Secador.....	31
2.6.3.2 Reactor.....	32
2.6.4 Análisis exergético.....	33
2.6.4.1 Secador.....	34
2.6.4.2 Reactor.....	35
2.7 Parámetros de calidad de los pellets.....	35
2.7.1 Absorción de agua.....	35
2.7.2 Durabilidad.....	35
2.8 Análisis Económico.....	36
2.8.1 Costo de los equipos.....	36
2.8.2 Puesta en marcha de la planta.....	36
2.8.3 Costo de mantenimiento.....	36
2.8.4 Costo de operación.....	37
2.9 Resultados.....	37
2.9.1 Análisis próximo.....	37
2.9.2 Poder calorífico superior.....	39

2.9.3 Análisis termodinámico	41
2.9.4 Parámetros de calidad	44
2.9.5 Absorción de agua.....	44
2.9.6 Durabilidad	45
2.9.7 Análisis económico.....	46
3. Clasificación de residuos	50
3.1 Propuesta de recolección.....	50
4. Conclusiones.....	52
Referencias Bibliográficas	55

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Análisis próximo de la biomasa.....	38
Tabla 2 Absorción de agua de los pellets.....	44
Tabla 3 Durabilidad de los pellets	45
Tabla 4 Costos de la planta	47
Tabla 5 Balance general.....	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Centro de acopio de residuos y material de trabajo.....	25
Figura 2 Representación esquemática del proceso de torrefacción y peletización de RSU	29
Figura 3 Balances de masas y de energía en el secador.....	30
Figura 4 Balances de masas y de energía en el reactor.....	31
Figura 5 Modelo del comportamiento de la temperatura para el proceso de torrefacción	33
Figura 6 Comportamiento del Poder calorífico superior	40
Figura 7 Rendimiento de la biomasa a través del proceso de torrefacción.....	41
Figura 8 Comportamiento de la exergía a través del proceso de torrefacción.....	42
Figura 9 Modelo de recolección propuesto.....	51

Lista de Apéndices

Apéndice A. Conjunto de datos del análisis experimental

Apéndice B. Conjunto de datos del análisis termo-económico

Apéndice C. Cálculo termodinámico del secador y del reactor

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

Glosario

Análisis próximo: corresponde a las determinaciones en porcentaje por peso de la humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo.

Aprovechamiento energético: es el proceso por el cual se genera energía, en forma de electricidad, calor o combustible, en este caso, a partir de los residuos.

Biomasa: se refiere a la materia orgánica renovable, como residuos de plantas, animales y procesos biológicos, que puede ser transformada en diferentes formas de energía.

Carbono fijo: residuo combustible que queda al eliminar el material volátil y la ceniza, en este caso de una muestra de biomasa.

Cenizas: residuo no combustible que permanece después de la completa incineración de la biomasa.

Combustibles fósiles: son los combustibles que provienen de la descomposición natural de la materia orgánica y no son renovables (petróleo, carbón y gas natural).

Combustión: reacción química, de velocidad rápida y de tipo exotérmica que genera liberación de energía.

Contenido de Humedad: cantidad de agua contenida en una muestra en condición normal, y la cantidad de agua después de ser sometida a algún tipo de secado.

Digestión anaerobia: es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases llamada “biogás” y a una suspensión de lodos que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica.

Durabilidad: capacidad de los materiales y componentes para soportar cargas recurrentes o de impacto sin sufrir daños.

Economía circular: modelo de producción y consumo que aprovecha al máximo los recursos materiales de los que disponemos alargando el ciclo de vida de los productos, promoviendo que los residuos que generamos puedan servir de materia prima para otras industrias.

Poder calorífico: cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible.

Energías renovables: energías derivadas de procesos naturales que pueden reponerse más rápido o en el mismo tiempo de lo que pueden consumirse.

Exergía: es la parte de la energía que puede ser convertida en trabajo

Hidrofobicidad: propiedad de un material de no absorber agua de sus alrededores.

Material volátil: son desprendimientos gaseosos de la materia orgánica e inorgánica durante el calentamiento.

Pellets: son pequeñas porciones de material aglomerado o comprimido de diferentes materiales, para este caso de material orgánico o biomasa.

Potencial energético: energía que se estima podría ser obtenida de la biomasa seca o con posteriores procesos de valorización.

Proceso termoquímico: son procesos que transforman la biomasa para obtener productos sólidos, líquidos o gaseosos, generalmente mediante reacciones exotérmicas, estos procesos son (Gasificación, pirolisis y torrefacción).

Rampa de calentamiento: es un aumento de temperatura programado hasta alcanzar el punto de ajuste del controlador.

Relleno sanitario: es el espacio donde se depositan los residuos sólidos de una ciudad después de haber recibido determinados tratamientos.

Residuos sólidos: son aquellos materiales desechados tras su vida útil, y que por lo general por sí solos carecen de valor económico.

Termo-economía: es una disciplina que estudia la relación de la termodinámica con la economía para desarrollar el ahorro energético necesario para lograr la mayor eficiencia posible.

Tiempo de residencia: tiempo transcurrido desde que la materia ingresa al sistema hasta que lo abandona.

Resumen

Título: Evaluación termo-económica del aprovechamiento de los residuos sólidos en la Universidad Industrial de Santander*

Autor: Fabio Andrés Ortiz Ochoa**

Palabras Clave: Residuos Sólidos Urbanos, Torrefacción, Poder Calorífico, Exergo-economía, pellets, Valorización energética.

Este trabajo estudia la viabilidad de utilizar como biomasa a los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), específicamente los residuos orgánicos, para ser utilizados en un tratamiento térmico que busca su posterior valorización energética. Se utilizó como modelo de estudio a la Universidad Industrial de Santander (UIS) y se trabajó con los residuos allí generados. Se realizó el pretratamiento de las muestras según recomendaciones obtenidas en la literatura, y se estableció la torrefacción como el tratamiento térmico a utilizar para la valorización de los residuos. Este proceso térmico se realizó a temperaturas de 240, 270 y 300 °C mediante una rampa de calentamiento de 10 °C/min, y se establecieron tiempos de residencia de 40, 50 y 60 minutos para las tres temperaturas. Se evaluó el poder calorífico obtenido del material torrefactado, y con base en la literatura de estudios similares, se estableció el procedimiento más conveniente para el planteamiento del modelo de una planta piloto. Entonces, con base en el modelo propuesto se realizó un análisis económico y se estableció su viabilidad para una posible implementación industrial. Finalmente, a través del análisis energético se obtuvieron poderes caloríficos superiores entre 16.54 y 19.98 MJ/kg y mediante el análisis económico se obtuvo \$1.30 US como el valor requerido para la producción de 1kg de pellets de material torrefactado, se concluye entonces que los RSU orgánicos, son un recurso potencial de energía térmica, y una posible solución al uso de los rellenos sanitarios.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Maestría en Ingeniería Mecánica. Director: Ph.D. Yesid Javier Rueda Ordoñez. Codirector: Ph.D. Fredy Augusto Avellaneda Vargas.

Abstract

Title: Thermo-Economic Evaluation of Solid Waste Utilization at the Industrial University of Santander *

Author(s): Fabio Andres Ortiz Ochoa **

Key Words: Urban Solid Waste, Torrefaction, Calorific Value, exergo-economy, Pellets, Energy Recovery.

This study examines the feasibility of using urban solid waste (USW), specifically organic waste, as biomass for thermal treatment aimed at subsequent energy recovery. The Industrial University of Santander was selected as the study model, and the waste generated on its premises was utilized. Sample pretreatment was conducted following recommendations from the literature, and torrefaction was identified as the thermal treatment method for waste valorization. This thermal process was carried out at temperatures of 240, 270, and 300 °C using a heating rate of 10 °C/min, and residence times of 40, 50, and 60 minutes were established for the three temperatures. The calorific value obtained from the torrefied material was evaluated, and based on literature from similar studies, the most suitable procedure for proposing a pilot plant model was established. Subsequently, an economic analysis was conducted based on the proposed model to determine its feasibility for potential industrial implementation. Finally, through the energy analysis, higher heating values ranging from 16.54 to 19.98 MJ/kg were obtained, and the economic analysis revealed a cost of USD 1.30 required for producing 1 kg of torrefied material pellets. It can be concluded that organic municipal solid waste (USW) is a promising resource for thermal energy generation and a potential solution to address the issue of landfills.

* Degree Work

**Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Master's in Mechanical Engineering. Director: Ph.D. Yesid Javier Rueda Ordoñez. Codirector: Ph.D. Fredy Augusto Avellaneda Vargas.

Introducción

La búsqueda de fuentes de energía sostenibles y respetuosas con el medio ambiente ha cobrado una importancia crucial en los últimos años. El uso de combustibles fósiles para la generación de energía provoca la emisión de gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo que contribuye al calentamiento global, al cambio climático, contaminación del agua, disminución de la calidad del aire y afectación en la salud humana. Además, estos combustibles, son recursos finitos y no renovables (Casas-Jiménez et al., 2021).

La transición hacia la energía sostenible impulsa la innovación tecnológica y fomenta el desarrollo de nuevas industrias y empleos en el sector de las energías renovables (Rivera Delgado et al., 2021). Esto crea oportunidades económicas y promueve el crecimiento sostenible a largo plazo.

La biomasa se refiere a la materia orgánica renovable, como residuos de plantas, animales y procesos biológicos, que puede ser transformada en diferentes formas de energía. Entre estas, electricidad, calor o biocombustibles, a través de procesos como la combustión, la pirólisis, la gasificación, o la digestión anaerobia, convirtiendo a los residuos orgánicos en recursos valiosos (Mamvura & Danha, 2020; Tumuluru et al., 2021). En este contexto, la biomasa se ha convertido en una opción cada vez más atractiva y prometedora.

Una de las principales ventajas de la biomasa es que es una fuente de energía neutral en carbono, lo que significa que no contribuye al aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Arauzo et al., 2014).

Al utilizar la biomasa como fuente de energía, se presenta una alternativa prometedora dentro de las energías renovables, se diversifican las fuentes de obtención, se fomenta la

economía circular y se promueve un enfoque más sostenible hacia la producción y el consumo energético, reduciendo así la dependencia de los combustibles fósiles, mejorando la seguridad energética y la estabilidad económica.

Se busca además el aprovechamiento de los residuos sólidos dentro de la posibilidad de generación energética, debido a que solo pueden retornar al ciclo económico y productivo aquellos materiales que aún pueden servir para la producción de nuevos bienes. Sin embargo, no todos los residuos sólidos generados a partir de las actividades de producción y consumo tienen las mismas posibilidades de ser aprovechados, solo aquellos que están incluidos en una cadena de valor (oferta/demanda) (Montes Cortés, 2018), el restante es depositado en los rellenos sanitarios.

El aprovechamiento de residuos sólidos requiere una adecuada selección de componentes aptos para este fin (Acosta-Rubio et al., 2021), esto, debido a los posibles daños a la salud que pueden generar los residuos no aptos para un proceso posterior de recuperación.

Tumuluru et al. (2021) afirma que “la torrefacción es el calentamiento lento de la biomasa en un ambiente inerte o con déficit de oxígeno en el rango de temperatura de 200–300°C” (p. 2). El resultado de utilizar residuos sólidos orgánicos para este proceso será un producto con mayor energía calorífica y un menor contenido de humedad, lo que brinda un mejor rendimiento en el aprovechamiento energético (Ribeiro et al., 2018; Tumuluru et al., 2021). Por lo tanto, procesos térmicos como la torrefacción se presentan como una alternativa económica y relativamente sencilla de implementar para darle un valor agregado a este tipo de biomásas.

Los resultados obtenidos en este trabajo presentan un aporte para el estudio del aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos. Así mismo, la implementación de este tipo de procesos ayudaría a las comunidades aledañas a los rellenos sanitarios, contribuyendo con la

disminución de la contaminación generada y en la posible generación de nuevos empleos. Este estudio aporta al avance científico del uso de la torrefacción para el aprovechamiento y valorización de los residuos sólidos orgánicos. También, abre la puerta a nuevas investigaciones en el área para que se pueda mejorar el proceso, o implementar uno mejor, que solucione la problemática del uso de los rellenos sanitarios y que contribuya al desarrollo municipal y regional.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el aprovechamiento energético de los residuos sólidos torrefactados y convertidos en pellets, generados en la Universidad Industrial de Santander (UIS) mediante un modelo termo-económico.

1.2 Objetivos Específicos

Evaluar los pretratamientos requeridos para los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) aprovechables, dirigido a un proceso de torrefacción y producción de pellets satisfactorio.

Evaluar los procesos de torrefacción y producción de pellets para la valorización energética y económica de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

Establecer la viabilidad termo-económica de la producción de pellets a partir de los residuos torrefactados y no torrefactados mediante un análisis exergo-económico.

Proponer un modelo de clasificación de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), generados en la Universidad Industrial de Santander (UIS), para su separación en aprovechables en la producción de pellets, reciclables e incinerables (Riesgo biológico).

Estructura de la tesis

El capítulo 2 tiene la estructura de un artículo científico, en el cual se desarrollan los objetivos uno, dos y tres. En este capítulo, la introducción condensa el estado del arte, y se propone un modelo de planta piloto según las recomendaciones de la literatura. La parte central del capítulo 2 es una evaluación del poder calorífico de las muestras sometidas a tratamiento térmico y en natura. En la parte final del capítulo 2, se analiza termo-económicamente el rendimiento de los equipos y la energía obtenida del proceso realizado, con el fin de revisar su viabilidad económica y energética. El Capítulo 3 desarrolla el objetivo cuatro, donde presenta la recomendaciones para futuros estudios y también incluye apéndices que complementan la información.

2. Evaluación termo-económica de los residuos sólidos orgánicos

2.1 Introducción

Debido al rápido crecimiento poblacional, las ciudades están generando crecientes niveles de RSU, los cuales, debido a su disposición final en rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto están ocasionando deterioro del paisaje y una problemática de contaminación a gran escala (Ángela & Escobar, 2002). Según un reporte del banco mundial, el mundo genera 2.01 billones de toneladas de desechos sólidos urbanos al año (Kaza et al., 2018). “Un colombiano promedio genera alrededor de 0.75 kilos de residuos al día y una persona podría generar en promedio el equivalente a su peso corporal en 11.6 semanas. Además, en promedio, en el país se aprovecha solo el 12.9% de los residuos generados” (NU. CEPAL, 2021, p, 5), la cantidad restante en la mayoría de las ocasiones no se gestiona de manera segura para el ambiente.

En los últimos 13 años, este tema se ha convertido en un asunto prioritario para los gobiernos municipales, sin embargo, las soluciones planteadas son nuevos rellenos sanitarios en lugares alejados a las cabeceras municipales, reciclaje, y la producción de metano generado por descomposición natural.

En la actualidad, existen rellenos sanitarios a cielo abierto en funcionamiento sin las medidas requeridas para disponer de estos desechos. Sumado a esto, está la acumulación de prácticas inadecuadas en la disposición y recolección de las basuras, y una gestión sin control que produce grandes inconvenientes sociales y ambientales (Noguera & Olivero, 2010).

Respecto a esto, para intentar contener la contaminación por descomposición líquida se hacen piscinas artificiales con el fin de evitar que los lixiviados lleguen al lecho rocoso y se filtren hacia los canales de agua subterránea (acuíferos). Sin embargo, en la mayoría de los casos son

soluciones provisionales y con una duración muy corta, por lo que no representa una estabilidad para el proyecto, o una medida significativa de reducción de la contaminación, o una garantía de seguridad en salud pública.

Respecto a lo anterior, como ejemplo está el relleno sanitario de “El Carrasco” ubicado en la ciudad de Bucaramanga, Santander, Colombia ($7^{\circ}4'43.3''N$; $73^{\circ}8'53.5''W$), el cual, por orden judicial, debió ser clausurado desde el año 2011. Sin embargo, se ha venido decretando emergencias sanitarias por no contar con otro sitio para la disposición de residuos (Superservicios, 2021). Desde el inicio de las emergencias sanitarias, se ha depositado en diferentes celdas aproximadamente 504,000 toneladas de residuos, que cubren un área de $130,000 \text{ m}^2$ (Ximena et al., 2016).

Sumado a lo anterior, el incumplimiento en la instalación de las capas de material con que se cubren los residuos depositados en el relleno sanitario durante un día de operación aporta un alto nivel de infiltración en los períodos de lluvia, generando un aumento en la producción de lixiviados y un funcionamiento inadecuado del relleno sanitario.

El actual sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR) del relleno sanitario, fue diseñado para tratar 3 L/s, y según los datos del operador del sitio, el caudal fue de 4.92 L/s, para el año 2015 (Ximena et al., 2016).

Para el año 2020, la superintendencia de servicios públicos domiciliarios (Superservicios, 2021), calculó una producción de 188,230.01 toneladas de residuos en Bucaramanga, su área metropolitana y municipios aledaños que utilizan “El Carrasco” como sitio de disposición final de residuos. Esta cantidad representa una generación diaria de aproximadamente 522 t/día, de los cuales, la Universidad Industrial de Santander aporta 0.2%, que equivale a un promedio de 0.985 t/día (UIS, 2021). Además, a partir de la caracterización realizada internamente por la UIS, se

sabe que 220.57 Kg son papel, cartón y sus derivados, 15 Kg son metales y vidrios, 69 Kg plásticos y derivados, y 118 Kg son desechos sanitarios. Por lo tanto, solo es posible reciclar 303 Kg/día, los restantes 683 Kg/día son para disposición final en el relleno sanitario.

En la búsqueda de soluciones para la gestión de residuos sólidos, el compostaje se presenta como una alternativa de uso y valorización. Al transformar los desechos orgánicos en compost, no solo reducimos la cantidad de residuos destinados a vertederos, sino que también generamos un valioso recurso que mejora la fertilidad del suelo (Azurduy et al., 2016).

Actualmente, en distintas regiones del país se está trabajando en la valorización de los residuos sólidos urbanos, y con ello, disminuir el impacto producido por los mismos. Entre estos, se tiene el relleno sanitario “Biorgánicos del sur del Huila”, que en el año 2020 procesó 43% de las 2,700 ton/mes que recibieron. Así mismo, la planta de compostaje “ECOSANGIL”, recibió cerca de 1,166 ton/mes en el año 2020 y 1,681 ton/mes en el 2021, de las cuales genera en promedio 57.94 ton/mes. Otras plantas como “RANCHO TRISTE” en La Ceja Antioquia, “Parque Ecológico Reciclante” en Villavicencio Meta (Páez Lugo et al., 2021), y otras en etapa de formación y estructuración se encuentran trabajando en darle un valor agregado a estos desechos. Un proyecto que actualmente se encuentra en etapa de prueba, es la planta generadora de energía por combustión directa ubicada en el archipiélago de San Andrés, con capacidad de 52.5 ton/día a través de los cuales se espera producir 1.2 MW (Torres & Ontiveros O., 2021). Siendo esta, una solución frente a la emergencia sanitaria que enfrenta la isla, debido al poco espacio disponible para implementación de un nuevo relleno sanitario.

Por lo anterior, resulta fundamental la identificación de nuevas alternativas y planteamientos de modelos innovadores para tratamientos de residuos que permitan mitigar el impacto ambiental. Una opción, es utilizarlos como biomasa en la generación de energía. La

biomasa representa una de las principales fuentes de energía renovable en el mundo y de la que se derivan diversos biocombustibles. En América Latina, es la principal fuente de energía no fósil (Rueda-Ordóñez et al., 2021). La biomasa se puede convertir en tres productos diferentes (gas, líquido o sólido) mediante procesos de tratamiento termoquímico (Mamvura & Danha, 2020). Entre estos, la gasificación, un proceso en el que toda la biomasa se somete a altas temperaturas con bajos niveles de oxígeno para producir gas de síntesis, que es una mezcla de gases compuesta por H_2 , CO , CO_2 y CH_4 (Debabrata Barik, 2019). Así mismo, mediante pirólisis, transesterificación, fermentación, digestión anaeróbica y/o procesos de sacarificación para obtener combustibles líquidos como bioaceite, biodiésel o bioetanol (Chen et al., 2011). También, se puede obtener un combustible sólido con propiedades similares a las del carbón mediante la carbonización y la torrefacción, procesos que ocurren entre 200 y 300 °C (Chen et al., 2011; Mamvura & Danha, 2020; Thengane et al., 2022).

Una alternativa para el uso de los RSU es su procesamiento a través de la torrefacción, proceso que consiste en descomponer térmicamente los residuos orgánicos de forma muy lenta. Este proceso mejora el rendimiento energético de la biomasa al aumentar su densidad energética y reducir su contenido de humedad, posibilitando su uso como fuente de generación de calor (European Commission, 2014). La torrefacción, se considera un método simple, económico y efectivo para transformar las propiedades de la biomasa y que estas sean cercanas a las del carbón (Ribeiro et al., 2018).

Durante la torrefacción, se liberan gases volátiles y se elimina parte del contenido de oxígeno de la biomasa (Cherubini & Strømman, 2011). Como resultado, la biomasa torrefactada produce menos emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos cuando se utiliza como combustible en comparación con la biomasa sin tratar (Lange, 2007; Mamvura et

al., 2018). Al reducir su contenido de humedad y modificar su estructura química mejora la estabilidad y durabilidad de la biomasa, por tanto, se puede transportar y almacenar de manera más eficiente; el material torrefactado se vuelve menos susceptible a la descomposición, al crecimiento de hongos y la degradación microbiana (Thrän et al., 2016). Esto facilita su almacenamiento a largo plazo sin pérdida significativa de calidad.

La biomasa torrefactada puede utilizarse como combustible sólido en sistemas de calefacción residencial o industrial, posible sustituto de los combustibles fósiles, utilizado en la producción de electricidad, la generación de calor para procesos industriales y como materia prima en la producción de biocombustibles líquidos (Kumar et al., 2023). La torrefacción permite aprovechar residuos agrícolas, forestales y biomasa de bajo valor, que de otro modo podría desecharse (Hu et al., 2021; Shaikh et al., 2022). Esto no solo proporciona una forma rentable de gestionar estos residuos, sino que también contribuye a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y a la promoción de la energía renovable.

Para el planteamiento de una alternativa, resulta importante un análisis detallado del aprovechamiento energético que se obtendrá, y del costo-beneficio económico que conlleva. Para esto, resulta un aporte valioso la implementación de un análisis exergo-económico, el cual es una herramienta importante para evaluar la eficiencia energética y económica de un sistema o proceso.

El análisis exergo-económico es una herramienta que combina el análisis termodinámico (exergético) y el análisis económico (Gago et al., 2022). La exergía se centra en la evaluación de la calidad y cantidad de la energía en un sistema, es una medida de la energía útil de un flujo o recurso, es decir, la parte de la energía que se puede convertir en trabajo (Fallahi et al., 2021; Szargut et al., 1987). Por otro lado, el análisis económico evalúa los costos y beneficios

monetarios asociados a un sistema o proceso, desde el punto de vista del país, la población y su impacto en la economía (Duarte et al., 2007). Esto incluye los costos de inversión, los costos operativos, los ingresos generados y otros factores económicos relevantes (Aghbashlo et al., 2021; Bejan et al., 1995).

A través del análisis exergo-económico, se pueden identificar y cuantificar las ineficiencias y las pérdidas exergéticas en un sistema, así como evaluar los costos asociados a estas pérdidas (Soltanian et al., 2022). Esto proporciona una base para la toma de decisiones informadas sobre la viabilidad del proyecto.

Estudios recientes de procesos que utilizan biomasa residual para generar energía, han sido evaluados mediante análisis exergéticos. Jadhao et al. (2017), Nami et al. (2020) y Trindade et al. (2018) calcularon los indicadores exergéticos de equipos utilizados para la generación de energía mediante incineración directa de RSU. Otros estudios se han realizado evaluando las implicaciones económicas del proyecto mediante análisis exergo-económico. Li et al. (2022) evaluó la viabilidad exergo-económica de la conversión de residuos agrícolas en energía utilizando una celda de combustible de carbonato fundido. Kohl et al. (2015) realizó el análisis exergo-económico de la biomasa utilizada en la cogeneración.

Adicionalmente, es posible la mezcla de material orgánico torrefactado con aquellos plásticos y polímeros no reciclables o que no pueden ser reutilizados. Estudios realizados por (Hamid et al., 2022), muestra que el poder calorífico que contienen los desechos plásticos supera los 30 MJ/kg. Esto aumentaría el poder calorífico disponible, y ayudaría a reducir el volumen de residuos contaminantes arrojados al ambiente (Acosta-Rubio et al., 2021). Lo anterior, es una posible solución frente al requerimiento mundial del uso de energías alternativas, de generar una

economía circular y de afrontar los problemas en cuanto a los manejos de los RSU, dándoles una solución económicamente viable y ambientalmente menos perjudicial.

Con base en esto, el objetivo de este trabajo fue determinar el potencial energético promedio de los residuos orgánicos presentes en los RSU, y su viabilidad energética y económica frente a una posible implementación a nivel local. Es importante resaltar que los resultados y análisis presentados en este trabajo, hacen un aporte investigativo al creciente estudio sobre el aprovechamiento de los RSU mediante procesos térmicos. Este estudio es una contribución científica al uso energético de los residuos mediante el proceso de torrefacción y su aprovechamiento económico. Estos resultados son un punto de referencia para nuevos estudios en el área, que permitirán implementar nuevas soluciones a los problemática de disposición final de desechos urbanos, contribuyendo así al desarrollo regional de Colombia.

2.2 Materiales y métodos

Se ha tomado como grupo de control para el estudio de este trabajo a la Universidad Industrial de Santander, ubicada en la ciudad de Bucaramanga, Santander, Colombia (7°8'26"N, 73°7'10"W). Para los residuos sólidos usados como materia prima en el proceso de torrefacción oxidativa, de los puntos de acopio de residuos mostrados la Figura 1 (a) y (b), se seleccionaron los sobrantes de los alimentos utilizados en la preparación de alimentos, los restos de alimentos desechados posterior a la cocción, residuos de poda de jardín, y todo material orgánico encontrado en las bolsas de recolección provenientes de la comunidad universitaria, material que se muestra en la Figura 1 (c). Adicional a esto, se realizaron pruebas en la Universidad de San Sebastián, Concepción, Chile, utilizando como materia prima los residuos generados en esta Universidad, bajo las mismas condiciones de operación que los experimentos realizados en este trabajo, y como equipo para realizar el proceso de torrefacción, se utilizó un horno microondas

marca Uwave 2000. Los poderes caloríficos encontrados para estos experimentos fueron 15.5, 22.87 y 22.72 MJ/kg, para el material base, y los materiales torrefactados a 300 °C y 50 minutos, y 300 °C y 60 minutos respectivamente.

Figura 1

Centro de acopio de residuos y material de trabajo



2.3 Descripción

El proceso de transformar RSU en pellets de carbón se realizó utilizando un horno vertical (Thermolyne F21125), un horno mufla (Terrigeno, modelo D8) y una peletizadora (División Petróleo Colombia, modelo 125). Primero se introdujo la muestra de 9 ± 1 g en cajas Petri abiertas en el horno mufla. Luego, para evaporar la humedad, la muestra se calentó de 26 ± 2 a 106 ± 2 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, y se dejó durante 60 min a la temperatura de secado. Después de seco se trituraron los residuos utilizando un molino de cuchillas, y el producto se tamizó utilizando tamices de 1mm y 3mm. Posteriormente, para la torrefacción, se incorporaron muestras de 10 ± 5 g en el horno vertical, se hizo circular nitrógeno a una tasa de 4 ml/min en la cámara del reactor durante todo el proceso garantizando un estado inerte en la operación. Entonces, se realizaron pruebas para analizar el proceso de torrefacción a

tres temperaturas, 240, 270 y 300 °C, cada una de estas con variación en los tiempos de residencia de 40, 50 y 60 minutos, y todas con 10°C/min como rampa de calentamiento. Luego, el material torrefactado se dejó enfriar hasta temperatura ambiente, por último, se pasó por la peletizadora utilizando para la formación de pellets un troquel plano con perforaciones de 8 mm de diámetro.

2.4 Análisis próximo

Se realizó el análisis próximo de las muestras de biomasa sin tratamiento, biomasa seca y el biocarbón resultado de las diferentes configuraciones de torrefacción, según las siguientes normas estandarizadas: humedad (ISO 18134-3), ceniza (ISO 18122), y material volátil (ISO 18123).

2.5 Poder calorífico

El poder calorífico superior (HHV) se determinó utilizando la Ecuación (1), planteada por (Nhuchhen & Afzal, 2017), donde el material volátil y el carbono fijo se identifican como VM y FC, respectivamente. Como método de comparación, se determinó el HHV utilizando una bomba calorimétrica de oxígeno (Parr, modelo 6200, EE.UU.), siguiendo la norma ASTM D240-09.

$$HHV = 0.1846 * VM + 0.3525 * FC \quad (1)$$

Luego, se realizó el cálculo del poder calorífico inferior (LHV) aplicando la Ecuación (2) (Peduzzi et al., 2016), donde H corresponde al hidrógeno y W la humedad presente en el material.

$$LHV = HHV - 226 * H - 25.1 * W \quad (2)$$

2.6 Análisis termodinámico

El propósito del análisis termodinámico de la planta piloto planteada es llevar a cabo la caracterización termodinámica de las corrientes que forman parte del funcionamiento de la planta. Esto implica atribuir valores específicos de energía y exergía a cada interacción entre el material a procesar, los componentes de la planta y los límites del sistema.

En primer lugar, se presentarán las suposiciones generales realizadas y se describirán las ecuaciones utilizadas para caracterizar la instalación en cuestión. Luego, se abordará el concepto de exergía, que es una variable fundamental en el desarrollo del análisis termo-económico. Finalmente, se llevará a cabo un análisis de todas las interacciones que tienen lugar en cada componente de la planta. El análisis termodinámico en conjunto con el análisis económico que se llevará a cabo en etapas posteriores constituye el punto de partida para el análisis termo-económico global.

2.6.1 Propuesta de planta piloto

Se propone una planta de tratamiento de RSU, con proceso de separación entre los diferentes tipos de residuos, y con proceso de torrefacción para los residuos orgánicos. Se puede observar en la Figura 2, la representación esquemática general del proceso de producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos, el cual inicia con el descargue de los residuos recolectados (corriente 1).

En la banda se realiza la selección y separación de los residuos en orgánicos e inorgánicos, los residuos orgánicos (corriente 2) y los inorgánicos no reciclables (corriente 3). Estos, son el material útil para utilizar en el proceso, trabajando con cada material por separado. Luego se pasa a la etapa de trituración de la biomasa (corriente 4), buscando obtener un material

homogéneo en su forma, el cual permite una mejor distribución de calor y un trabajo más eficiente por parte del secador.

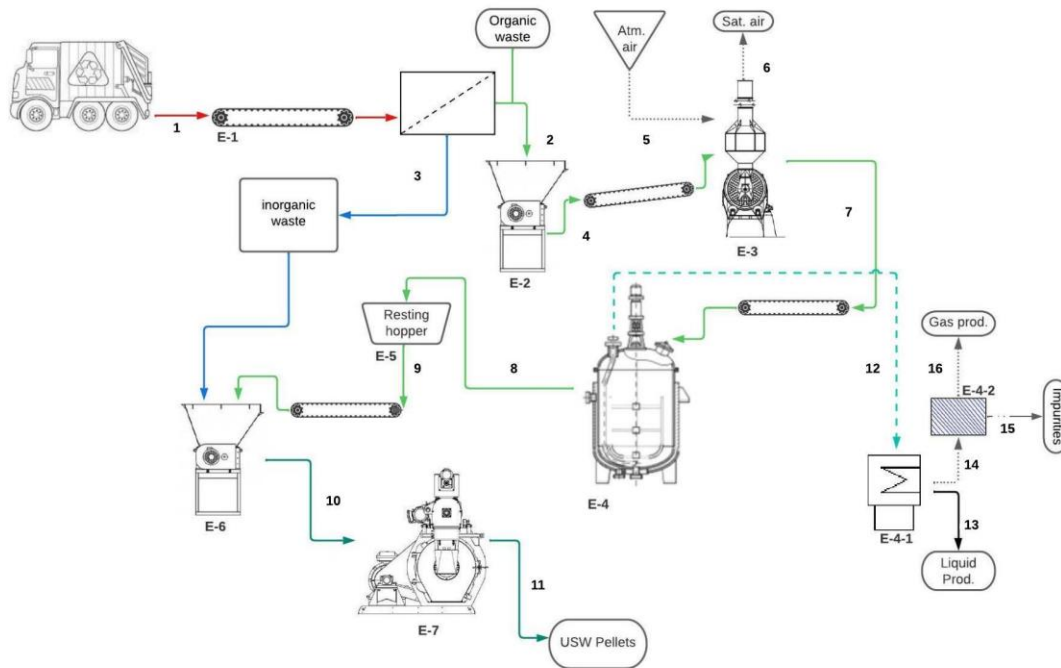
Para el secado, se requiere aire atmosférico (corriente 5), este proceso da como resultado aire saturado (corriente 6) y una biomasa más seca (corriente 7). La reacción de torrefacción produce biocarbón (corriente 8) y productos gaseosos (corriente 12). El biocarbón producido se recolecta en una tolva de reposo que evita la autoignición del material caliente (corriente 9).

Posterior a esto, el material se tritura y tamiza para disminuir el tamaño de la partícula y homogenizar el producto, en esta etapa se puede considerar el uso del material no reciclable y seco, para ser mezclado con el biocarbón (corriente 10). El producto particulado se pasa por la peletizadora para obtener los pellets (corriente 11), que son el producto final de este estudio.

Paralelo a esto, se dan las etapas correspondientes a la separación y filtración de los subproductos (corrientes 13,15 y 16), las cuales salen del campo de este estudio, por lo tanto, no se analizan en este trabajo. Los residuos no aprovechables en tema de recuperación energética o elementos reciclables, se les debe realizar una disposición final ambientalmente correcta.

Figura 2

Representación esquemática del proceso de torrefacción y peletización de RSU



Nota. Bandas de selección(E-1); Trituradora de biomasa(E-2); Secador de biomasa(E-3); Reactor de torrefacción(E-4); Tolva de enfriamiento(E-5); Trituradora de biocarbón (E-6); Peletizadora (E-7); Sistema de condensación(E-4-1); Filtros(E-4-2).

2.6.2 Balance de materia

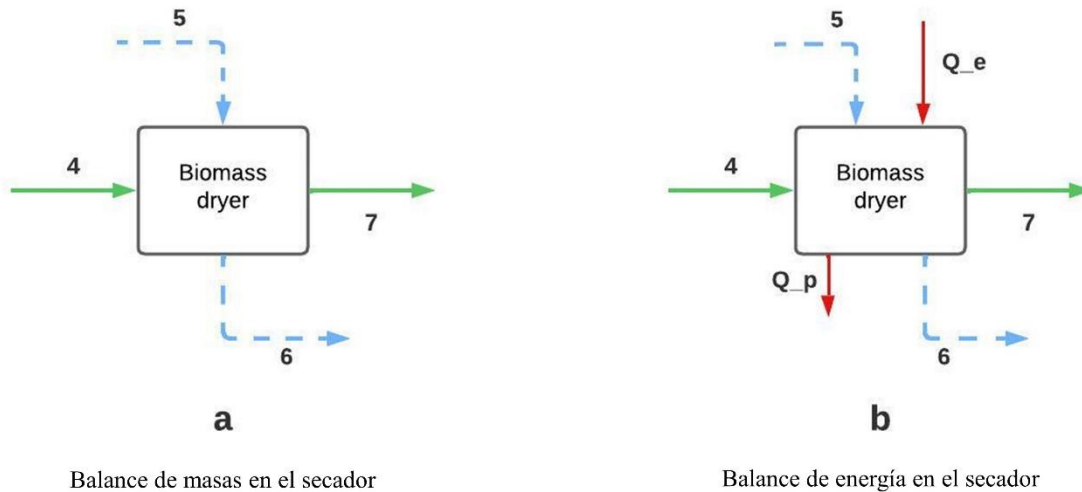
2.6.2.1. Secador. En el caso del secado, el balance de materia analiza el retiro de la humedad inicial de los residuos a través del aire caliente, entre un 70% y 75% (humedad de recepción), hasta humedades del 20% al 30%, a la salida del secador. Según Ivanova et al., (2011) y Villalba Vidales & Arzola de la Peña., (2015), el secado es un requisito importante previo al proceso de densificación de la biomasa.

Se establece el volumen de control como se muestra en la Figura 3 y se plantea el flujo de entrada y salida de la biomasa, del aire atmosférico y de la humedad retirada por este, como

muestra la Ecuación (3). Se asume un sistema ideal en el que no se presenta acumulación de componentes.

Figura 3

Balances de masas y de energía en el secador



$$m_4 + m_5 = m_7 + m_6 \quad (3)$$

$$m_6 = m_5 + m_w \quad (4)$$

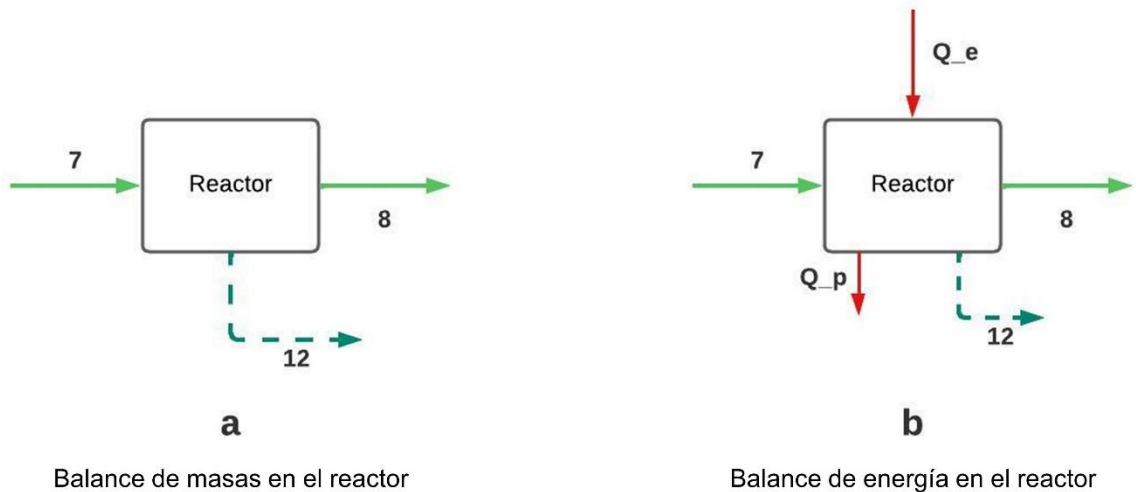
Donde m_4 es la masa del material de entrada, m_5 es la masa de aire en la entrada, m_6 la masa del aire saturado a la salida, m_7 la masa del material a la salida del secador y m_w la masa de agua retirada del material.

2.6.2.2 Reactor. En el reactor mediante calentamiento directo se retira la humedad restante de los residuos (posterior al proceso de secado), hasta lograr humedades del 0% a la salida de este. Para el balance de materia, se establece el volumen de control como se muestra en la Figura 4 (a), y se plantea como entrada la alimentación de biomasa, y como salidas el producto

torrefactado y los productos evaporados como lo indica la Ecuación (5). Se asume un sistema ideal en el que no se presenta acumulación de componentes.

Figura 4

Balances de masas y de energía en el reactor



$$m_7 = m_8 + m_{12} \quad (5)$$

Donde m_7 es la masa de entrada al reactor, m_8 es la masa del material torrefactado y m_{12} la masa del material evaporado.

2.6.3 Análisis energético

2.6.3.1 Secador. Para el balance de energía en el proceso de secado, se tomó la máquina de secado como un volumen de control, como se muestra en la Figura 3 (b). La energía requerida para el calentamiento del aire y la energía asociada a la biomasa de alimentación son consideradas las variables de entrada. Como salidas son consideradas la biomasa seca y la energía del aire saturado, y adicionalmente, fueron consideradas pérdidas de energía debido a la transferencia de calor con el ambiente, según lo indica la Ecuación (6).

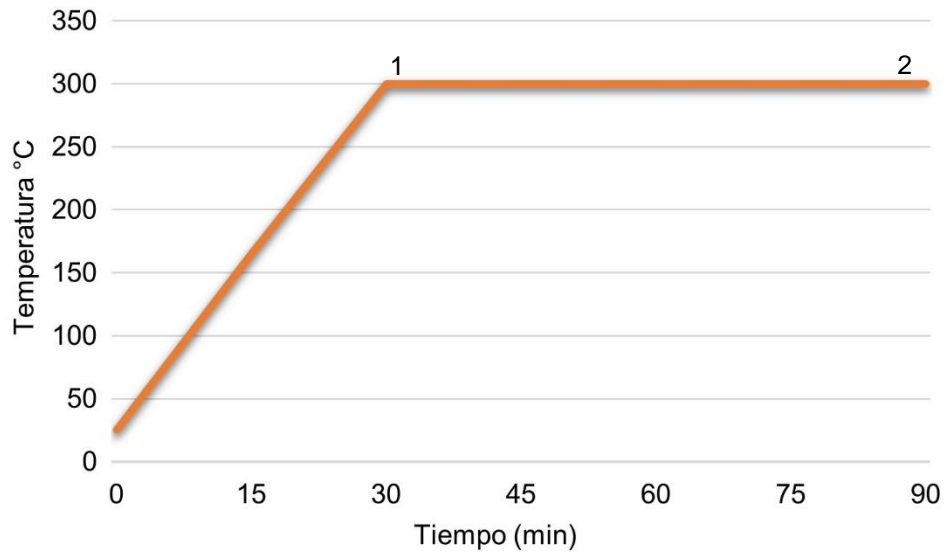
$$Q_e + Q_4 + Q_5 = Q_6 + Q_7 + Q_p \quad (6)$$

Donde Q_e es la energía de entrada, Q_4 es la energía asociada a la biomasa de entrada, Q_5 es la energía asociada al aire inyectado, Q_6 es la energía del aire a la salida del secador, Q_7 es la energía asociada a la biomasa de salida, Q_p el calor de pérdidas y $Q_p \leq 10\% Q_e$.

2.6.3.2 Reactor. Para el balance de energía del proceso de torrefacción se plantea la Ecuación (7), en la cual, el reactor de torrefacción fue definido como el volumen de control como se muestra en la Figura 4 (b). Como entradas, se identificaron la energía consumida por la reacción de torrefacción y la energía asociada a la biomasa que alimenta al reactor. Como salidas se consideran las energías asociadas al carbón vegetal en base seca y el gas de torrefacción, adicionalmente, fueron consideradas pérdidas de energía en el reactor debido a transferencia de calor con el ambiente. Es importante tener en cuenta que el proceso de suministro de energía para el proceso de torrefacción se desarrolla en dos etapas, como se muestra en la Figura 5. La primera etapa equivale a la rampa de calentamiento, la cual es de 10 °C/min hasta alcanzar la temperatura de sostenimiento la cual se estableció en 300 °C, este será el proceso comprendido entre 0 a 1. La segunda etapa, es el tiempo en el que se debe mantener esta temperatura, el cual se estableció como 60 minutos, relacionado al proceso 1 a 2.

Figura 5

Modelo del comportamiento de la temperatura para el proceso de torrefacción



$$Q_{Torr} + Q_7 = Q_8 + Q_{12} + Q_{pr} \quad (7)$$

$$Q_{Torr} = Q_{0-1} + Q_{1-2} \quad (8)$$

$$Q_{pr} \leq 10\% \quad (9)$$

Donde Q_{Torr} es la energía necesaria para realizar el proceso de torrefacción, Q_7 es la energía de la biomasa en la entrada del reactor, Q_8 es la energía de la biomasa a la salida del reactor, Q_{12} es la energía de los productos evaporados de la torrefacción y Q_{pr} el calor de pérdidas en el reactor.

2.6.4 Análisis exergético

La exergía total del proceso viene dada por la Ecuación (10), donde X_f representa la exergía física, y X_q la exergía química, las cuales se evaluarán por separado en cada uno de los procesos.

En este caso de estudio, el aporte y el cambio exergético se presenta en el secador y el reactor de torrefacción, por lo tanto, estos serán los volúmenes de control a analizar.

$$X = X_f + X_q \quad (10)$$

Según Camaraza-Medina et al., (2017), un método aproximado con un 2.5% de error que permite determinar la exergía química de cualquier compuesto sólido biomásico es dado por la Ecuación (11).

$$X_q = \beta * LHV \quad (11)$$

Donde, el coeficiente β se determina según la Ecuación (12), y representa un factor de corrección de la energía total disponible (LHV), en esta ecuación H,C y O son el hidrógeno, el carbono y el oxígeno respectivamente presentes en el biocarbón en unidades porcentuales.

$$\beta = \frac{1.0412 + 0.261 * \frac{H}{C} - 0.2499 * \frac{O}{C} * (1 + 0.7884 * \frac{H}{C})}{1 - 0.3035 * \frac{O}{C}} \quad (12)$$

2.6.4.1 Secador. Para el análisis exergético físico del proceso de secado, el valor se determina según la Ecuación (13), donde el secador fue definido como volumen de control, los cambios de energía del agua, el aire y la biomasa son tomadas como las variables de entrada, y los cambios de segunda ley del agua, el aire y la biomasa, son tomados como las variables de salida.

$$\Delta X_{fs} = [\Delta H_a + \Delta H_w + \Delta H_{4-7}] - T_0 * [\Delta S_a + \Delta S_w + \Delta S_{4-7}] \quad (13)$$

Donde, H_a es la entalpía del aire, H_w es la entalpía del agua, H_{4-7} es la entalpía de la biomasa, S_a es la entropía del aire, S_w es la entropía del agua y S_{4-7} la entropía de la biomasa, la entalpía manejada en unidades de (kJ/kg), y la entropía en unidades de (kJ/kg K).

2.6.4.2 Reactor. Para el análisis exergético físico del proceso de torrefacción, el valor se determina según la Ecuación (14), el reactor fue definido como volumen de control, los cambios de energía de la biomasa, del agua y la generación de energía en los gases productos del proceso son tomadas como las variables de entrada, los cambios de segunda ley de la biomasa, del agua y los gases productos del proceso son tomados como las variables de salida.

$$\Delta X_{fr} = [\Delta H_{7-8} + \Delta H_{evap} + \Delta H_{w_r}] - T_0 * [\Delta S_{7-8} + \Delta S_{evap} + \Delta S_{w_r}] \quad (14)$$

Donde H_{7-8} es la entalpía de la biomasa en el reactor, H_{evap} es la entalpía de los productos evaporados, H_{w_r} es la entalpía del agua en el reactor, S_{7-8} es la entropía de la biomasa, S_{evap} es la entropía de los productos evaporados y S_{w_r} la entropía del agua en el reactor, la entalpía manejada en unidades de (kJ/kg), y la entropía en unidades de (kJ/kg K).

2.7 Parámetros de calidad de los pellets

2.7.1 Absorción de agua

El cálculo de absorción de agua de los pellets se realizó de acuerdo con la Ecuación (15), siguiendo el procedimiento realizado por Pimchuai et al. (2010^a), y Zhang et al. (2022), donde, las muestras se sumergieron en agua a temperatura ambiente (25 °C) durante cuatro horas. Posteriormente, se filtraron y el exceso de agua se eliminó colocando los pellets sobre un papel absorbente.

$$\%Abs. \text{ agua}_{\text{pellets}} = ((\text{saturate pellets} - \text{dry pellets}) / \text{dry pellets}) * 100 \quad (15)$$

2.7.2 Durabilidad

Se realizó el cálculo de durabilidad de los pellets producto de la torrefacción de la biomasa siguiendo la norma ISO 17831-1.

2.8 Análisis Económico

Para este análisis fue considerado el valor de los equipos, valor de la puesta en marcha de la planta, valor de mantenimiento y costo de operación. Se realizaron estimaciones de costos durante todas las etapas del diseño para proporcionar una base para la toma de decisiones en cada etapa.

2.8.1 Costo de los equipos

El costo de los equipos se estableció según el valor comercial encontrado, se estipuló la máxima cantidad de material a procesar, y mediante las características técnicas de estos equipos se establecieron cuáles serían las maquinas idóneas para esta cantidad y proceso.

2.8.2 Puesta en marcha de la planta

Este valor contempla la construcción y adecuación de los espacios de la planta, instalación de los equipos, los servicios necesarios para su correcto funcionamiento y un presupuesto de respaldo que garantice el pago de las obligaciones de la planta durante el tiempo establecido para la regulación y estabilización de la producción.

2.8.3 Costo de mantenimiento

El mantenimiento, en su definición amplia, se ocupa de restaurar la condición del equipo, ajustar y lubricar, reparar y reacondicionar, es decir, preservar los activos para que operen con eficacia y eficiencia. La importancia del mantenimiento se puede juzgar por el hecho de que puede constituir hasta el 15% del costo operativo de una empresa (Haroun, 2015).

Debido a que los factores que afectan una maquina o una planta física son muchos, desde los materiales utilizados para su fabricación y la correcta operación del equipo, hasta las condiciones a las que se encuentran sometidos y no se pueden controlar, tales como humedad del ambiente y temperatura, el valor del costo de mantenimiento no se puede definir con exactitud.

Expertos consultores de la industria estiman que el costo de mantenimiento anual de maquinaria y equipo se sitúa sobre el 5% al 10% del precio de compra de estos (SPC Consulting Group, 2022). Basado en esta información, en este trabajo se estimó un valor anual de mantenimiento cercano a este valor. Por lo tanto, el costo de mantenimiento para la planta se estima entonces en 7% anual.

2.8.4 Costo de operación

Los costos de operación son los gastos necesarios para mantener un proyecto, línea de procesamiento o un equipo en funcionamiento (Zugarramurdi et al., 1998), independientemente de su tipo de operación o tamaño.

Para los costos de operación se estableció como base de cálculo que el consumo energético es eléctrico en todos los equipos que intervienen en la operación. Esto, permite realizar los análisis con la seguridad de que el valor económico de la energía, si se cambiara su fuente a gas u otra, no superará el valor calculado. Entonces, se estimó la cantidad de operarios necesarios para la operación y limpieza de la planta, y se dio un valor estimado para el personal administrativo, necesario para el control y funcionamiento de la operación. Por último, se estimó el costo económico de los servicios públicos inherentes al buen funcionamiento de la planta.

2.9 Resultados

2.9.1 Análisis próximo

En la Tabla 1 se muestran los resultados del análisis próximo, realizados a las diferentes configuraciones de temperatura y tiempo propuestas en este estudio.

Tabla 1*Análisis próximo de la biomasa*

Temperatura [°C]	Tiempo [min]	% Humedad	% Cenizas	% Material volátil	% FC
-	-	68.92	19.46	77.43	3.11
240	40	8.42	22.79	66.16	11.05
240	50	5.31	27.39	63.05	9.56
240	60	4.52	20.33	60.35	19.32
270	40	6.16	25.62	59.17	15.21
270	50	4.89	25.99	57.69	16.32
270	60	4.21	27.11	56.58	16.31
300	40	4.79	25.63	49.56	24.81
300	50	4.69	27.60	47.52	24.88
300	60	3.71	25.50	36.75	37.75

Resultado en color gris se muestran los resultados obtenidos para el material sin tratamiento térmico, posteriormente, se observa el análisis realizado por bloques, donde, con la misma temperatura de torrefacción se están variando los tiempos de residencia. Como análisis general, se evidencia principalmente el comportamiento de la humedad, la cual, como se

esperaba tiende a disminuir a medida que aumentan la temperatura, similar al comportamiento del material volátil, que también tiende a disminuir a medida que se incrementan las condiciones de operación. Las cenizas por su parte conservan un comportamiento similar en las diferentes variaciones de temperatura y tiempo, sin embargo, debido a los diferentes tipos de material orgánico que conforman la biomasa de estudio no es sencillo predecir su comportamiento. El carbono fijo, sin embargo, tiende a aumentar, debido a la desvolatilización del material, mejorando con esto el poder calorífico disponible en la biomasa. En su trabajo, (Zhang et al., 2022) mostró el análisis próximo para pellets de paja de soya y pellets de madera de pino, torrefactados a 250, 300 y 350 °C, con un tiempo de residencia de 45 minutos, así mismo (Cuba et al., 2009) en su trabajo presenta el análisis próximo para pellets de paja de trigo y pellets de aserrín de madera, torrefactados a 250, 300 y 350 °C, con tiempos de residencia de 1, 2 y 3 horas, en estos trabajos se evidencian comportamientos similares, pero con resultados diferentes al anteriormente descrito, esto, debido a la diferentes composiciones de las biomosas estudiadas.

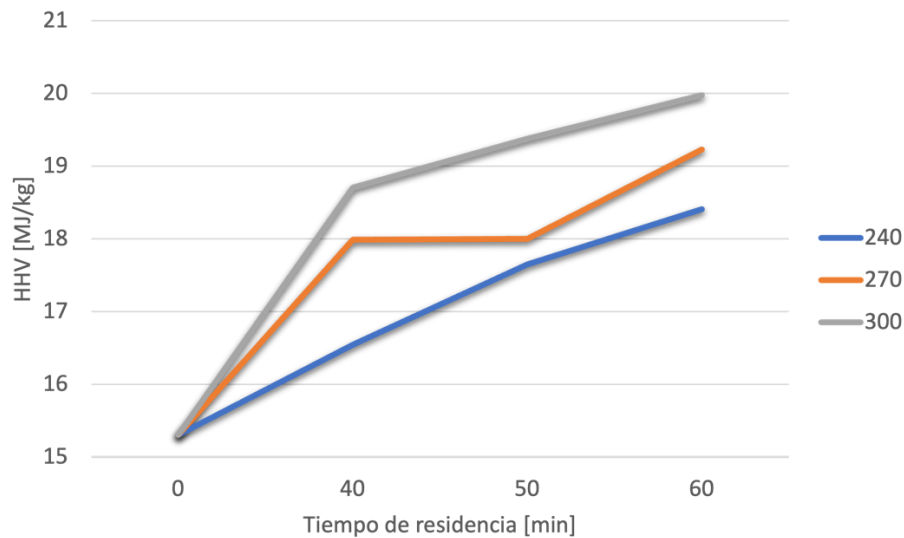
Se evidencia además, que las variaciones en las características de la biomasa no son lineales, como se esperaría de una biomasa de igual composición y tamaño, esto, es debido a que la biomasa estudiada, como ya se mencionó, son residuos de basura de los hogares, poda de jardín, etc., la cual recibe material orgánico de toda índole, por tanto, la trituración y la mezcla de este material solo garantizaría el tamaño de las partículas, pero no se podría garantizar que la composición sea la misma para cualquier muestra tomada.

2.9.2 Poder calorífico superior

En la Figura 6 se aprecia el aumento del poder calorífico superior, realizados a las diferentes configuraciones de temperatura y tiempo propuestas en este estudio.

Figura 6

Comportamiento del Poder calorífico superior



Se puede evidenciar el crecimiento del poder calorífico en relación con el aumento de la temperatura y el tiempo de residencia en el proceso de torrefacción, el punto inferior de la gráfica corresponde al poder calorífico superior de la biomasa seca, sin ningún tipo de tratamiento, este, se utiliza como punto de comparación en la evaluación del aumento energético.

El poder calorífico superior obtenido para temperaturas de 270 y 300 °C, y tiempos de 50 y 60 minutos, están en el rango de 18 a 20 MJ/kg.

Estos poderes caloríficos, se asemejan con valores de otras biomásas sometidas a proceso de torrefacción, como 20.94 MJ/kg informado por (A. Silveira et al., 2023), producto torrefactado de la mezcla de varios residuos de maderas a 275 °C y 60 min de residencia. Pimchuai et al. (2010b) informó valores de 17.59, 18.96 y 24.39 MJ/kg, para productos torrefactados de cáscara de arroz, cáscara de maní y bagazo de caña respectivamente, estos, torrefactados a 300 °C y 60 minutos de residencia. Cuba et al. (2009) en su estudio, analizó el

poder calorífico de pellets de paja de trigo y pellets de aserrín de madera, encontrando valores de 20.02 y 19.87 MJ/kg respectivamente, para un proceso de torrefacción a 280 °C y 60 minutos.

En su trabajo, (Barrera Zapata et al., 2014) calculó el poder calorífico superior de los carbones minerales presentes en Colombia, con valores entre 22.1 y 32.6 MJ/kg, el cual se usa como punto de comparación para los productos torrefactados obtenidos.

2.9.3 Análisis termodinámico

En la Figura 7 se muestra el rendimiento de la biomasa durante el proceso de torrefacción, así como en la Figura 8 se muestra el comportamiento exergetico a través de los equipos que componen el proceso.

Figura 7

Rendimiento de la biomasa a través del proceso de torrefacción

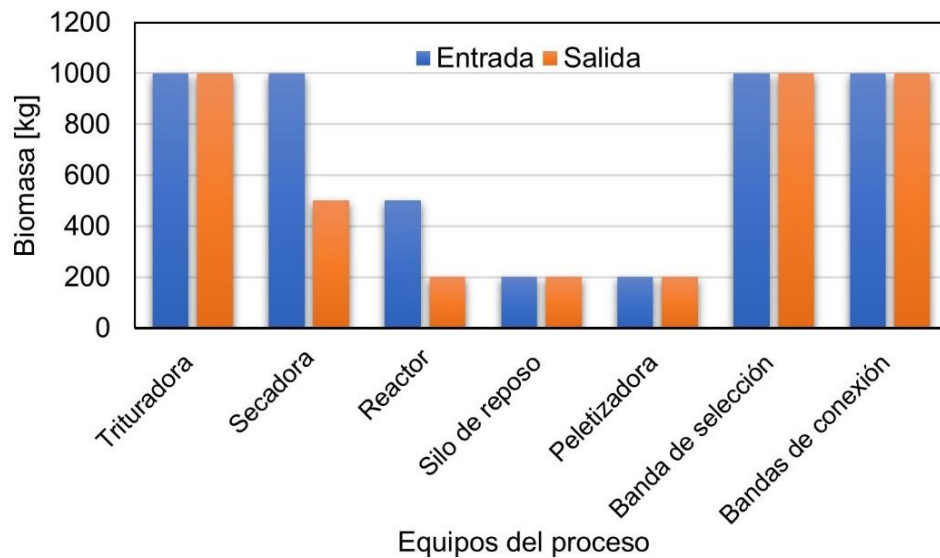
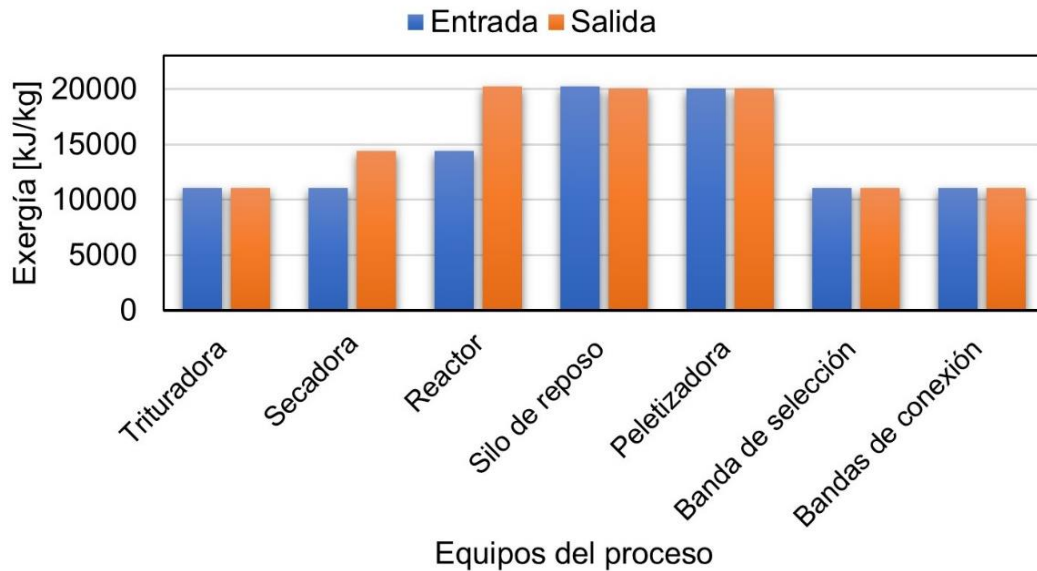


Figura 8

Comportamiento de la exergía a través del proceso de torrefacción



Comparando la información contenida en la Figura 7 y en la Figura 8 se observa que la masa disminuye a medida que aumenta la exergía disponible en el biocarbón, esto, se da en primera instancia por la eliminación de la humedad inherente a los residuos, la cual aporta de un 50% a un 70% del total en peso de la biomasa.

En el proceso de secado se elimina el agua en exceso contenida en la biomasa, aproximadamente un 50% del peso inicial de esta, gracias a este proceso se obtiene una ganancia aproximada del 37% de la exergía obtenida. Así mismo, en el proceso de torrefacción se obtiene un aumento significativo de la ganancia exergética del combustible. Esta, se incrementa en aproximadamente un 64% debido a la reducción de las fracciones orgánicas contenidas en el material volátil de la biomasa. Con ello, también la eliminación de gran parte del oxígeno contenido en el material, por lo cual el poder calorífico del biocarbón aumenta, a medida que disminuye su masa (Arteaga Pérez et al., 2016). En este proceso térmico, se pierde

aproximadamente el 60% del peso de la biomasa que ingresa al reactor, de estos, un 10% corresponde al agua restante del material, el otro 50% se compone de materiales volátiles, combustible líquido y combustible gaseoso, en donde estos dos tipos de combustibles posterior a procesos de separación podrían ser utilizados como fuente energética.

En las gráficas se puede evidenciar que en equipos como la trituradora y en las bandas de conexión y selección se realiza un gasto energético que no conlleva a la generación de exergía. Sin embargo, son etapas necesarias en el proceso para la homogenización y correcta distribución del material de trabajo. La peletizadora por su parte no es un equipo que aporta en la ganancia exergética del biocarbón, pero brinda calidad al producto final entregado, ya que al compactar el biocarbón facilita su manipulación y evita que las partículas más pequeñas sean arrastradas como material particulado al aire.

Es importante evidenciar que, para el proceso de refinación de la biomasa, solo el secador y el reactor influyen en la ganancia exergética. Además, existe una pérdida exergética inferior al 1% en la tolva de reposo debido al enfriamiento del biocarbón, la cual es imposible de evitar debido a la diferencia de temperatura entre el carbón producto de los procesos y el ambiente. Por último, es necesario aclarar que podría existir otra pérdida exergética si no se realiza el proceso de torrefacción inmediatamente después de finalizado el proceso de secado, y aunque la pérdida al igual que en la tolva sería inferior al 1%, esta pérdida sí es posible evitar.

En estudios similares, Granados et al. (2014) realizaron comparaciones de exergía y de rendimiento másico para seis tipos de biomasa, donde analizaron la pérdida de masa debido al proceso de torrefacción y con ello la ganancia exergética por unidad de masa, así como la disminución de exergía con relación a la masa total suministrada. Además, el proceso térmico se realizó a 250°C y un tiempo de residencia de 30 minutos, las irreversibilidades más significativas

se evidenciaron para la fibra de palma de aceite y para el vástago del plátano, con una reducción aproximada de 5000 kJ y 5500 kJ respectivamente. Esta irreversibilidad es ocasionada por los gases de escape, los cuales se podrían aprovechar en el precalentamiento de la biomasa de entrada o recirculándolos directamente al horno para reducir las irreversibilidades del proceso.

2.9.4 Parámetros de calidad

Para esta etapa del estudio, se seleccionaron y se analizaron solo las muestras de producto torrefactado que presentan los poderes caloríficos más altos, en este caso, fueron las muestras tratadas a temperaturas de 270 °C y 300 °C, y tiempos de residencia de 50 y 60 minutos.

2.9.5 Absorción de agua

La Tabla 2 presenta los resultados de las pruebas de absorción de agua realizadas a los pellets.

Tabla 2

Absorción de agua de los pellets

Temperatura [°C]	Tiempo [min]	% Absorción de agua
-	-	-
270	50	57.1%
270	60	54.9%
300	50	50.4%
300	60	41.7%

El comportamiento de los pellets sumergidos se comparó teniendo en cuenta su tratamiento térmico, además, se comparó con el comportamiento del material base, sometido a las mismas condiciones de la prueba.

Los datos obtenidos muestran una reducción creciente de absorción de agua por parte de los pellets, a medida que la temperatura y el tiempo del tratamiento térmico aumenta. Se pasó de un nivel de absorción del 57.1% al 41.7%, para los materiales a 270 °C y 50 minutos, y 300 °C y 60 minutos respectivamente. Para el caso del material base, cuando fue puesto en agua se evidencio de manera muy rápida su capacidad de absorción, al minuto de la prueba el pellet ya estaba completamente disuelto, por lo cual, no fue posible determinar su porcentaje de absorción.

Estos resultados son similares a los encontrados por Tumuluru et al. (2021) y Zhang et al. (2022) en sus trabajos, se analiza la absorción de agua en pellets torrefactados y pellets sin torrefactar, y se evidencia que a mayor temperatura de torrefacción y mayor tiempo de exposición al tratamiento térmico, mejor es el comportamiento hidrofóbico de los pellets, es decir, menor cantidad de agua absorben, además, en ambos estudios se señala que los pellets sin torrefactar se diluyen en el agua a pocos minutos de iniciar la prueba.

2.9.6 Durabilidad

La Tabla 3 presenta los resultados de las pruebas de durabilidad realizadas a los pellets.

Tabla 3

Durabilidad de los pellets

Temperatura [°C]	Tiempo [min]	% Durabilidad
-	-	91,8%
270	50	84,9%
270	60	78,2%
300	50	74,7%
300	60	71,3%

Los datos obtenidos muestran la reducción de la durabilidad a medida que la temperatura y el tiempo del tratamiento térmico aumenta.

Se puede observar una reducción de la durabilidad, la cual disminuye del 91.8% para el caso del material base, hasta un 71.3% para el material torrefactado a 300 °C y 60 minutos. Según (Colley et al., 2006), el parámetro de durabilidad es aceptable por encima del 80%, promedio entre 70% y 80%, y bajo cuando es inferior a 70%.

Esta reducción en la durabilidad puede deberse a la disminución de la humedad de la biomasa, la cual presenta una función importante en la cohesión de las partículas adyacentes, y a la descomposición de la lignina y la hemicelulosa, debido a la temperatura y al tiempo del tratamiento térmico (Tenorio et al., 2015).

Un comportamiento similar es encontrado en el estudio de Zhang et al. (2022), en su trabajo, muestra una reducción creciente en la durabilidad de los pellets a medida que aumenta la temperatura de torrefacción. Así mismo, Dyjakon et al. (2021) presenta resultados similares, y señala “La disminución significativa en la durabilidad mecánica de los pellets debido a la torrefacción se debe en parte a la descomposición de los compuestos lignocelulósicos bajo la influencia de la temperatura” (p. 7).

2.9.7 Análisis económico

La Tabla 4 presenta los valores unitarios de las máquinas seleccionadas para este proceso, así como el valor unitario estimado de depreciación por equipo, el cual es calculado según la vida útil del equipo referenciada por los fabricantes. También, el valor mínimo unitario recomendado para el proceso de mantenimiento anual, y el consumo eléctrico unitario de los equipos en potencia y en valor, obtenidos según ficha técnica del equipo. Los gastos energéticos

para el proceso de secado y torrefacción son calculados según la cantidad de biomasa disponible para procesar.

Con números resaltados en gris se muestran los valores totales, que corresponden a la suma de los valores unitarios, estos valores son necesarios para el cálculo del costo de producción, y determinar la inversión que se debe realizar para la compra y puesta en marcha de este tipo de plantas.

Tabla 4

Costos de la planta

Equipos	Cant.	Costo T.	Depreciación anual 10%	Costo Mtto. Anual 7%	KW/Día	Costo KW/Día
Trituradora	2	2500	250	175	36.67	4.62
Secadora	1	5000	500	350	544.44	68.60
Reactor	1	24946	2495	1746	136.32	17.18
Silo de reposo	1	2500	250	175	0.00	-
Peletizadora	1	5000	500	350	14.80	1,86
Banda de selección	1	2500	250	175	32.00	4,03
Bandas de conexión	6	6000	600	420	108.00	13,61
Total		48446	4845	3391	872.23	109.9

Nota. Los valores de la tabla están dados en \$ US.

La Tabla 5 presenta el balance general del proyecto, en otras palabras, el resumen de los ítems más relevantes en la realización del proyecto.

Tabla 5

Balance general

Descripción	Valor final
Producción/Ton (Kg)	200.00
Costo fijo de producción/día (US\$)	\$ 259.31
Costo producción/kg (US\$)	\$ 1.30
Rentabilidad 20% (US\$)	\$ 0.26
Precio de venta/Kg (US\$)	\$ 1.56
Inversión Total US\$	\$ 249,304.20

Nota. El valor de 1 US\$ se asumió como 5,000 COP\$.

Se obtuvieron 200 kg de biomasa torrefactada, a partir de una tonelada de residuos orgánicos. Para el caso particular de este estudio, esta sería la producción por día de la planta. El costo fijo de operación diaria, para este volumen de residuos será de \$ 259.31 US, por tanto, el valor por kg de biomasa obtenida será de \$1.30 US. Además, se estimó un porcentaje de rentabilidad del 20% como posible ganancia en caso de comercialización del producto, con lo cual se establece un posible precio de venta de \$1.56 US por kg. Este valor es superior al del carbón mineral, el cual se ha comercializado a lo largo del año 2023 en un valor cercano a los \$150 US por tonelada (La República, 2023).

El valor de inversión total calculado es \$ 249,304.20 US, el cual corresponde a la suma de los costos totales explicados en la Tabla 5, a la estimación de valores para la adecuación y puesta a punto de la planta, y al valor estimado de gastos de funcionamiento hasta lograr el

estado de equilibrio de la operación, y la planta sea autosustentable. Por último, se calculó el periodo de recuperación de capital, que, para este caso de estudio, se obtendrá en un periodo de 17 años.

Es importante resaltar que se asumió el costo de \$ 1 USD como \$ 5,000 COP para efectos de cálculo.

3. Clasificación de residuos

Se define el residuo o el desecho, como “Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento, cuya calidad no permite usarlo nuevamente en el proceso que lo generó” (Sánchez y Gándara, 2011, p. 243).

En Colombia, mediante la Resolución 2184 de 2019 se adoptó el código nacional de colores para la separación de residuos sólidos en la fuente, y debe implementarse en todos los municipios y distritos del país a partir del 1 de enero de 2021 de la siguiente manera:

Color blanco para depositar los residuos aprovechables como plástico, vidrio, metales, papel y cartón.

Color negro para depositar residuos no aprovechables como sobras de comida procesada, papel higiénico, servilletas, papeles y cartones contaminados con comida o húmedos, papeles metalizados, entre otros.

Color verde para depositar residuos orgánicos aprovechables como los restos de comida cruda, desechos agrícolas, etc.

Color rojo para los residuos peligrosos, con riesgo biológico o infeccioso, radioactivos, corrosivos, explosivos, etc.

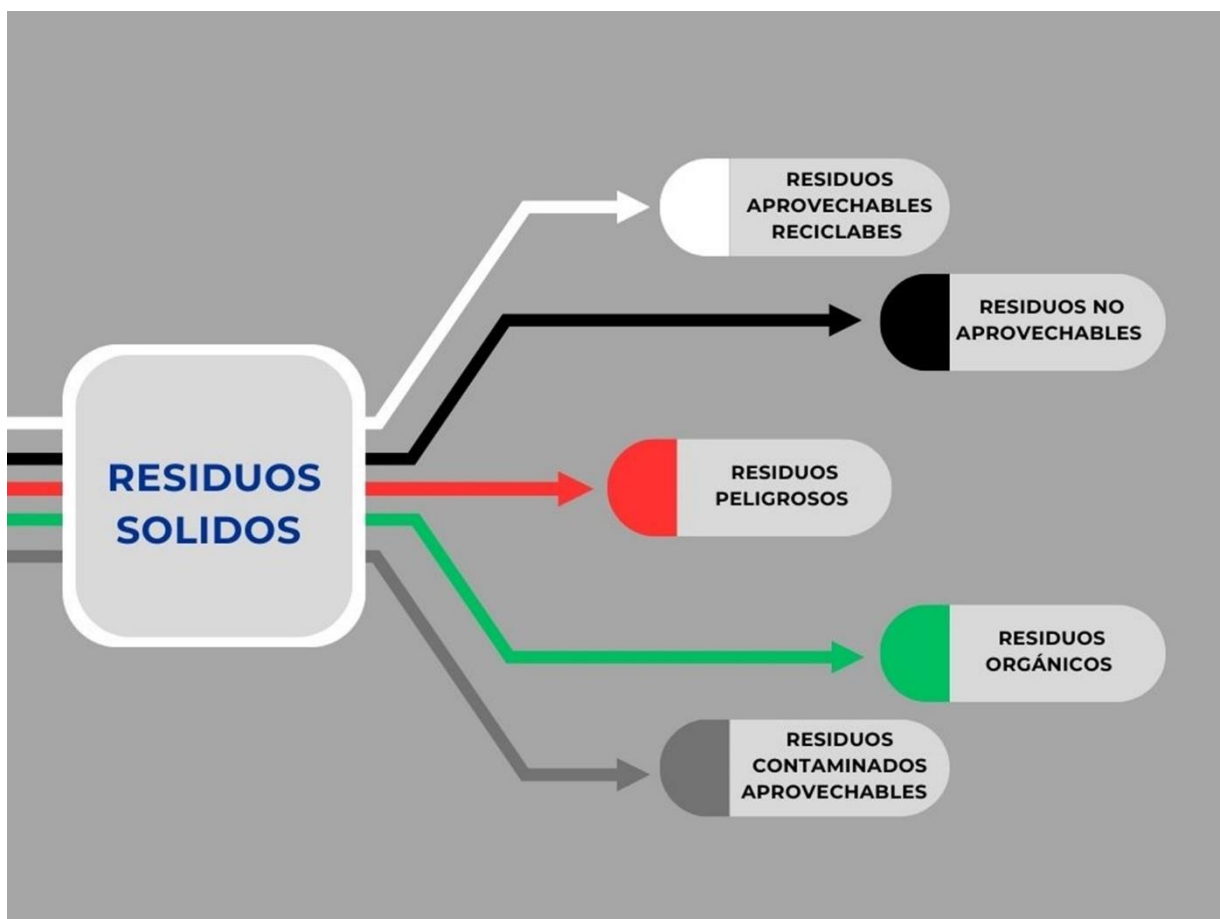
3.1 Propuesta de recolección

Se plantea una modificación al método de recolección como se muestra en la Figura 9, mediante la implementación de la bolsa gris para la recolección de residuos de papel, cartón y elementos elaborados con material biodegradable, si estos están contaminados por grasa, cualquier residuo alimenticio o húmedos. También la utilización de esta bolsa para la recolección

de los residuos de comida procesados. Este tipo de residuos no pueden ser reciclados ni aprovechados posteriormente, sin embargo, son útiles en la obtención de material torrefactado, el cual es el objetivo de estudio de este proyecto. En esta modificación al proceso de recolección, el material útil para el proceso de torrefacción sería el disponible en las bolsas verde y gris.

Figura 9

Modelo de recolección propuesto



4. Conclusiones

- ✦ La trituración y el proceso de secado como pretratamientos de la biomasa disminuyen el gasto energético en el proceso de torrefacción y mejora los resultados del proceso.
- ✦ El proceso de torrefacción mejora la densidad energética de la biomasa y disminuye la posibilidad de presentar deterioro biológico. La peletización por su parte, facilita el manejo, transporte y el almacenamiento del biocarbón, beneficios que facilitan su comercialización.
- ✦ El costo de producir biocarbón procesado supera el precio del carbón mineral, lo que dificulta su viabilidad económica para una posible implementación industrial.
- ✦ Los elementos como papel, cartón y productos biodegradables, incluso si están húmedos o contaminados con grasa u otros residuos alimenticios, son aprovechables para la obtención de material torrefactado. Se sugiere la recolección de estos elementos en bolsas de un color específico, integrándolas al sistema actual de recolección de residuos.
- ✦ Por cada 1000 kg de residuos procesados se obtienen aproximadamente 200 kg de biocarbón, es decir que el rendimiento del material es de aproximadamente el 20%. Cabe resaltar que se planteó el uso de los equipos con un volumen de operación inferior a su capacidad estándar, por tanto, los mismos equipos son capaces de producir más cantidad de biocarbón en el mismo tiempo.
- ✦ Se estima que, con un volumen de producción inferior a 1 tonelada de residuos diarios, no se justifica el gasto económico en la recuperación de los subproductos del proceso.

- ✦ Como un factor de diseño, el gasto energético para el proceso de producción se calculó como consumo eléctrico, esto permite un ahorro económico al utilizar gas, calor de desecho y la energía térmica del biocarbón producido en los procesos que así lo permitan.
- ✦ Los pellets producto del material torrefactado muestran un menor porcentaje de humedad, mayor porcentaje de carbono fijo y un mayor poder calorífico en función de la temperatura y el tiempo de torrefacción, esto, debido a la degradación de sus constituyentes menos energéticos, mejorando con ello su eficiencia energética.
- ✦ Entre las temperaturas y los tiempos evaluados en esta investigación, los pellets, producto del material torrefactado a 300°C y 60 minutos, presentaron la mejor característica energética.
- ✦ Los resultados de durabilidad aceptables y promedio obtenidos en las muestras evaluadas, indican que los pellets tendrían un buen comportamiento en cuanto a manejo y transporte se refiere.
- ✦ Los pellets torrefactados presentan buen comportamiento respecto a la absorción del agua, por lo cual, pueden almacenarse sin el riesgo de presentar deterioro biológico.
- ✦ La conversión de los desechos sólidos urbanos orgánicos en biomasa para la creación de pellets torrefactados es una perspectiva energéticamente viable. Esto se sustenta en su notable poder calorífico. No obstante, desde una perspectiva económica, el proceso de producción aún no se ha optimizado lo suficiente para rivalizar con la competitividad del carbón mineral, el recurso que se busca reemplazar con esta alternativa. Aunque el material sin torrefactar, en su estado seco, podría presentarse como una fuente de energía más asequible y eficaz, su almacenamiento se convierte en un desafío. Su propensión a absorber humedad dificulta su conservación a largo plazo, lo que limitaría su utilización

en el tiempo y aumentaría los problemas de degradación biológica.

No obstante, la aparente inversión significativa requerida por esta alternativa merece una consideración más profunda. Su implementación ofrece una solución crucial para dos desafíos ambientales de gran importancia: la sustitución de las fuentes de combustibles fósiles y la reducción de la dependencia de los vertederos de residuos. A medida que sopesamos los costos aparentes, es crucial sopesar los beneficios a largo plazo, no solo en términos económicos, sino también en el ámbito de la sostenibilidad.

Referencias Bibliográficas

- A. Silveira, E., Santanna Chaves, B., Macedo, L., Ghesti, G. F., Evaristo, R. B. W., Cruz Lamas, G., Luz, S. M., Protásio, T. de P., & Rousset, P. (2023). A hybrid optimization approach towards energy recovery from torrefied waste blends. *Renewable Energy*, *212*, 151–165. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.05.053>
- Acosta-Rubio, D., Castro-Camacho, L., & Moreno-Arias, C. A. (2021). Pirólisis rápida para producir biocombustibles con residuos sólidos urbanos: estudio de caso, Madrid, Cundinamarca. *Gestión y Ambiente*, *24*(Supl3), 47–58. <https://doi.org/10.15446/ga.v24nSupl3.97273>
- Aghbashlo, M., Khounani, Z., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Gupta, V. K., Amiri, H., Lam, S. S., Morosuk, T., & Tabatabaei, M. (2021). Exergoenvironmental analysis of bioenergy systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *149*, 111399. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111399>
- Arauzo, J., Bimbela, F., Ábrego, J., Sánchez, J. L., & Gonzalo, A. (2014). Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa. *Boletín Del Grupo Español Del Carbón*, *33*, 2–6. <http://hdl.handle.net/10261/108763>
- Arteaga Pérez, L. E., Segura, C., & Diéguez Santana, K. (2016). Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica. *Afinidad: Revista de Química Teórica y Aplicada*, *ISSN 0001-9704*, *73*(573), 60–68. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/308445>.
- Azurduy, S., Azero, M., & Ortuño, N. (2016). Evaluación de Activadores Naturales para Acelerar el Proceso de Compostaje de Residuos Orgánicos en el Municipio de Quillacollo.

In *ACTA NOVA* (Vol. 7).

http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-

[07892016000200002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892016000200002&lng=es&tlng=es).

Barrera Zapata, R., Pérez Bayer, J. F., & Salazar Jiménez, C. (2014). Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas. *Revista ION*, 27(2), 43–54. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2014000200005&lng=en&tlng=es.

Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. (1995). *Thermal Design and Optimization*. John Wiley & Sons.

Camaraza-Medina, Y., Cruz-Fonticiella, O. M., & García-Morales, O. F. (2017). Element for the Estimation of Thermodynamic Properties of Cane and Forest Biomass. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(4), 76–82.

<https://www.redalyc.org/journal/932/93254138007/html/>

Casas-Jiménez, P. M., Escudero-González, C. A., Martínez-Guerrero, T. Z., Mendoza-Díaz, M. del C., Gutiérrez-Ortega, Dra. N. L., & Ramos-Ramírez, Dra. E. (2021). Procesos sustentables para la producción de biocombustibles: a review. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 10.

<https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3454>

Chen, W. H., Cheng, W. Y., Lu, K. M., & Huang, Y. P. (2011). An evaluation on improvement of pulverized biomass property for solid fuel through torrefaction. *Applied Energy*, 88(11), 3636–3644. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.040>

- Cherubini, F., & Strømman, A. H. (2011). Principles of Biorefining. *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes*, 3–24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385099-7.00001-2>
- Colley, Z., Fasina, O. O., Bransby, D., & Lee, Y. Y. (2006). Moisture Effect on the Physical Characteristics of Switchgrass Pellets. *Transactions of the ASABE*, 49(6), 1845–1851. <https://doi.org/10.13031/2013.22271>
- Cuba, T., Ferro, D., Soler, B., & Zanzi, P. (2009). TORREFACCIÓN DE BIOMASA DENSIFICADA. *Tecnología Química*, XXIX, 180–186. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543761022>
- Debabrata Barik. (2019). Chapter 3 - Energy extraction from toxic waste originating from food processing industries. *Woodhead Publishing*, 17–42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102528-4.00003-1>
- Duarte, T., JIMENEZ ARIAS, R. E., & RUIZ TIBANÁ, M. (2007). Economic analysis of projects of investment. *Scientia et Technica*, XIII(35), 333–338.
- Dyjakon, A., Noszczyk, T., & Mostek, A. (2021). Mechanical Durability and Grindability of Pellets after Torrefaction Process. *Energies*, 14(6772). <https://doi.org/10.3390/en14206772>
- European Commission. (2014). *La torrefacción: la última novedad en la bioenergía | News | CORDIS | European Commission*. <https://cordis.europa.eu/article/id/36589-torrefaction-the-bioenergy-newcomer/es>
- Fallahi, A., Farzad, S., Mohtasebi, S. S., Mandegari, M., Görgens, J. F., Gupta, V. K., Lam, S. S., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2021). Sustainability assessment of sugarcane residues valorization to biobutadiene by exergy and exergoeconomic evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147, 111214. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111214>

- Gago, L., Schpetter, N., Mandrile, A., & Stark, N. (2022). Eco Exergo Economía: análisis exergético para el estudio de energías renovables y el ambiente. *Vetec Revista Académica de Investigación, Docencia y Extensión de Las Ciencias Veterinarias*, 3(3), 64–65.
<https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/Vetec/article/view/7200>
- Granados, D. A., Velásquez, H. I., & Chejne, F. (2014). Energetic and exergetic evaluation of residual biomass in a torrefaction process. *Energy*, 74(C), 181–189.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.05.046>
- Hamid, D. A. S. A., Purnomo, C. W., & Ahmad, J. S. M. (2022). Feasibility Study and Processing Temperature Effect on Recycling of Aluminium-Plastic Package into Solid Fuel. *Key Engineering Materials*, 920 KEM, 74–80. <https://doi.org/10.4028/P-RJ26CI>
- Haroun, A. E. (2015). Maintenance cost estimation: application of activity-based costing as a fair estimate method. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 21(3), 258–270.
<https://doi.org/10.1108/JQME-04-2015-0015>
- Hu, Q., Jung, J., Chen, D., Leong, K., Song, S., Li, F., Mohan, B. C., Yao, Z., Prabhakar, A. K., Lin, X. H., Lim, E. Y., Zhang, L., Souradeep, G., Ok, Y. S., Kua, H. W., Li, S. F. Y., Tan, H. T. W., Dai, Y., Tong, Y. W., ... Wang, C. H. (2021). Biochar industry to circular economy. *Science of The Total Environment*, 757, 143820.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143820>
- Ivanova, T., Havrland, B., Pobedinsky, V., & Muntean, A. (2011). Analysis of system of biomass drying by use of experimental dryer with solar collector. *Engineering for Rural*, 336–341. <http://dspace.uasm.md:8080/xmlui/handle/123456789/5811>
- Jadhao, S. B., Shingade, S. G., Pandit, A. B., & Bakshi, B. R. (2017). Bury, burn, or gasify: assessing municipal solid waste management options in Indian megacities by exergy

analysis. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(5), 1403–1412.

<https://doi.org/10.1007/S10098-017-1338-9/TABLES/5>

Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank.

<http://hdl.handle.net/10986/30317>

Kohl, T., Teles, M., Melin, K., Laukkanen, T., Järvinen, M., Park, S. W., & Guidici, R. (2015).

Exergoeconomic assessment of CHP-integrated biomass upgrading. *Applied Energy*, 156,

290–305. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.06.047>

Kumar, A., Bhattacharya, T., Shaikh, W. A., Roy, A., Chakraborty, S., Vithanage, M., & Biswas, J. K. (2023). Multifaceted applications of biochar in environmental management: a

bibliometric profile. *Biochar*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/S42773-023-00207-Z>

La República. (2023). *CARBÓN - Indicadores*. Editorial La República.

<https://www.larepublica.co/indicadores-economicos/commodities/carbon>

Lange, J. P. (2007). Lignocellulose conversion: an introduction to chemistry, process and economics. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 1(1), 39–48.

<https://doi.org/10.1002/BBB.7>

Li, X., Wu, J., Zhu, X., & Liang, H. (2022). Agricultural waste-to-energy concerning a biofuel-fed molten carbonate fuel cell toward a novel trigeneration scheme; exergoeconomic/

sustainability study and multi-objective optimization. *Renewable Energy*, 199, 1189–1209.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.038>

Mamvura, T. A., & Danha, G. (2020). Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. In *Heliyon* (Vol. 6, Issue 3). Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03531>

- Mamvura, T. A., Pahla, G., & Muzenda, E. (2018). Torrefaction of waste biomass for application in energy production in South Africa. *South African Journal of Chemical Engineering*, 25, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.SAJCE.2017.11.003>
- Montes Cortés, C. (2018). *Estudio de los residuos sólidos en Colombia* (Universidad Externado de Colombia, Ed.; 1st ed.).
- Nami, H., Anvari-Moghaddam, A., & Arabkoohsar, A. (2020). Thermodynamic, Economic, and Environmental Analyses of a Waste-Fired Trigeneration Plant. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 2476, 13(10), 2476. <https://doi.org/10.3390/EN13102476>
- Nhuchhen, D. R., & Afzal, M. T. (2017). HHV Predicting Correlations for Torrefied Biomass Using Proximate and Ultimate Analyses. *Bioengineering*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/BIOENGINEERING4010007>
- Noguera, K. M., & Olivero, J. T. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(132), 347–356. http://www.accefyn.org.co/revista/vol_34.htm
- NU. CEPAL, DNP, & CEMPRE. (2021). *Encuesta a municipios sobre gestión de residuos sólidos domiciliarios 2019. Colombia*. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/46988>
- Páez Lugo, E. A., Jaramillo Zapata, M., & Mora Adán, P. A. (2021). *INFORME NACIONAL DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS 2020* (13th ed.). Superservicios. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_df_2020%20%281%29.pdf
- Peduzzi, E., Boissonnet, G., & Maréchal, F. (2016). Biomass modelling: Estimating thermodynamic properties from the elemental composition. *Fuel*, 181, 207–217. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2016.04.111>

- Pimchuai, A., Dutta, A., & Basu, P. (2010a). Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. *Energy and Fuels*, 24(9), 4638–4645.
<https://doi.org/10.1021/EF901168F>
- Pimchuai, A., Dutta, A., & Basu, P. (2010b). Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. *Energy and Fuels*, 24(9), 4638–4645.
https://doi.org/10.1021/EF901168F/ASSET/IMAGES/EF-2009-01168F_M003.GIF
- Ribeiro, J. M. C., Godina, R., Matias, J. C. de O., & Nunes, L. J. R. (2018). Future perspectives of biomass torrefaction: Review of the current state-of-the-art and research development. *Sustainability (Switzerland)*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/SU10072323>
- Rivera Delgado, D., Díaz López, F. J., & Carrillo González, G. (2021). Transición energética, innovación y usos directos de energía geotérmica en México: un análisis de modelado temático. *Problemas Del Desarrollo*, 52(206), 115–141.
<https://doi.org/10.22201/IEEC.20078951E.2021.206.69713>
- Rodríguez Escobar, & L. Ángela. (2002). Hacia la gestión ambiental de residuos sólidos en las metrópolis de América Latina. *Innovar*, 1(20), 111–120.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/innovar/article/view/24282>
- Rueda-Ordóñez, Y. J., Mariño-Bohórquez, M. A., & Rueda-Ordóñez, D. A. (2021). Thermal upgrading of sacha inchi shell: Kinetics and combustion characteristics. *Bioresource Technology Reports*, 15. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2021.100807>
- Sánchez y Gándara, A. (2011). *Conceptos básicos de gestión ambiental y desarrollo sustentable* (S Y G editores & INE-SEMARNAT, Eds.; 1st ed.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales .

- Shaikh, W. A., Kumar, A., Chakraborty, S., Islam, R. U., Bhattacharya, T., & Biswas, J. K. (2022). Biochar-based nanocomposite from waste tea leaf for toxic dye removal: From facile fabrication to functional fitness. *Chemosphere*, *291*, 132788. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132788>
- Soltanian, S., Kalogirou, S. A., Ranjbari, M., Amiri, H., Mahian, O., Khoshnevisan, B., Jafary, T., Nizami, A. S., Gupta, V. K., Aghaei, S., Peng, W., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2022). Exergetic sustainability analysis of municipal solid waste treatment systems: A systematic critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *156*, 111975. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111975>
- SPC Consulting Group. (2022, February 9). *Los costos de mantenimiento y sus implicaciones en la industria* | SPC Consulting Group. <https://spcgroup.com.mx/los-costos-de-mantenimiento-y-sus-implicaciones-en-la-industria/>
- Szargut, J., Morris, D. R., & Steward, F. R. (1987). *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes* (1st ed.). Hemisphere .
- Tenorio, C., Moya, R., Filho, M. T., & Valaert, J. (2015). Application of the X-ray densitometry in the evaluation of the quality and mechanical properties of biomass pellets. *Fuel Processing Technology*, *132*, 62–73. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2014.12.040>
- Thengane, S. K., Kung, K. S., Gomez-Barea, A., & Ghoniem, A. F. (2022). Advances in biomass torrefaction: Parameters, models, reactors, applications, deployment, and market. *Progress in Energy and Combustion Science*, *93*, 101040. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2022.101040>
- Thrän, D., Witt, J., Schaubach, K., Kiel, J., Carbo, M., Maier, J., Ndibe, C., Koppejan, J., Alakangas, E., Majer, S., & Schipfer, F. (2016). *Moving torrefaction towards market*

introduction e Technical improvements and economic-environmental assessment along the overall torrefaction supply chain through the SECTOR project.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.004>

Torres, F. R., & Ontiveros O., M. K. (2021). *San Andrés, Colombia: 10 años de un incinerador sin estrenar y una isla que se desborda en residuos - GAIA* (M. Donoso, C. Aguilera, & C. Allen, Eds.; 1st ed.). Alianza Global para Alternativas a la Incineración. <https://www.no-burn.org/resources/san-andres-colombia-10-anos-de-un-incinerador-sin-estrenar-y-una-isla-que-se-desborda-en-residuos/>

Trindade, A. B., Palacio, J. C. E., González, A. M., Rúa Orozco, D. J., Lora, E. E. S., Renó, M. L. G., & del Olmo, O. A. (2018). Advanced exergy analysis and environmental assesment of the steam cycle of an incineration system of municipal solid waste with energy recovery. *Energy Conversion and Management*, 157, 195–214.

<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.11.083>

Tumuluru, J. S., Ghiasi, B., Soelberg, N. R., & Sokhansanj, S. (2021). Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, and Moving Bed Reactor Design Concepts. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.728140>

UIS. (2021). *Sistema de Gestión Ambiental - SGA*. <https://uis.edu.co/uis-sistema-gestion-ambiental-es/>

Villalba Vidales, J. A., & Arzola de la Peña, N. (2015). Modelos matemáticos y experimentales sobre el secado de biomasa. *Ingeniería y Desarrollo*, 33(2), 301–330.

<https://doi.org/10.14482/inde.33.2.5674>

Ximena, L., Carvajal, N., Alexander, J., Valencia, R., & Lenin, J. (2016). Contaminación fisicoquímica de acuíferos por los lixiviados generados del relleno sanitario El Carrasco, de

Bucaramanga. *Producción + Limpia*, 11(1), 66–74.

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

[04552016000100007&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000100007&lng=en&nrm=iso&tlng=es)

Zhang, Y., Chen, F., Chen, D., Cen, K., Zhang, J., & Cao, X. (2022). Upgrading of biomass pellets by torrefaction and its influence on the hydrophobicity, mechanical property, and fuel quality. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(6), 2061–2070.

<https://doi.org/10.1007/S13399-020-00666-5>

Zugarramurdi, A., Parín, M., & Lupin, H. (1998). Ingeniería Económica Aplicada a la Industria Pesquera. *Ingeniería Económica Aplicada a La Industria Pesquera*, 34.

<http://www.fao.org/3/v8490s/v8490s00.htm#Contents>