

Evaluación Técnica y Económica de la Producción de Biocarbón mediante la
Descomposición Térmica de Residuos Sólidos Orgánicos Compostados

Autor: ING. Kevin Fernando García Gamboa

Trabajo de Grado para Optar el Título de Magister en Ingeniería Mecánica

Director

Juan Pablo Flórez Mera

Ph.D. en Ingeniería Mecánica

Codirector

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Ph.D. en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Maestría en Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo, como todos los triunfos importantes de mi vida, a la memoria de mi madre y de mi abuela, mujeres fundamentales en mi formación personal y humana. Ellas moldearon mi forma de ser, mi manera de ver el mundo y los principios con los que he aprendido a tomar decisiones en la vida.

Con su amor, sus valores, su crianza y su ejemplo, me enseñaron a ser una buena persona, a luchar por mis sueños y a enfrentar cada desafío con responsabilidad, humildad y perseverancia. En su momento, dieron todo su esfuerzo para que yo pudiera avanzar y construir mi propio camino; por eso, cada logro alcanzado lleva también una parte de ellas.

Su presencia sigue siendo aliento, guía y fuerza en mis acciones. Siempre daré lo mejor de mí para honrar su memoria y su buen nombre, porque todo lo que soy y todo lo que alcance estará profundamente marcado por el amor y las enseñanzas que me dejaron.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi familia por su apoyo, su aliento constante y por motivarme siempre a superarme, a buscar mi camino profesional y a continuar creciendo como persona. Su compañía ha sido fundamental en este proceso y en cada etapa de mi formación.

A todas las personas con las que compartí durante mis estudios de posgrado, les expreso mi gratitud por cada consejo, cada experiencia y cada momento que aportó a mi vida. Gracias a los buenos amigos que encontré en este camino, con quienes compartí el espíritu de investigar, resolver problemas, aprender y transmitir nuevos conocimientos.

Agradezco también a todos los profesores que hicieron parte de mi formación, por permitirme aprender nuevas cosas y por ser ejemplo de compromiso, vocación y amor por la ciencia. En muchos de ellos encontré el reflejo de buenas personas que ejercen su profesión con orgullo, responsabilidad y dedicación.

A todos los que, de una u otra manera, me acompañaron en este capítulo de mi vida, muchas gracias. Cada palabra de apoyo, cada enseñanza y cada experiencia compartida hicieron parte de este logro.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1 Objetivos	16
Objetivo General	16
1.1 Objetivos Específicos:	16
2. Contexto y estado del arte	17
2.1 Formulación Del Problema	17
2.2 Antecedentes	18
3. Metodología	20
3.1 Materiales y origen de la biomasa	20
3.2 Pretratamiento y caracterización de la biomasa	21
3.2.1 Actividades de Pretratamiento:	21
3.2.2 Selección de parámetros técnicos de la muestra	22
3.2.3 Diseño experimental de pirólisis a escala de laboratorio	23
3.2.4 Evaluación y caracterización del biocarbón	24
3.2.5 Evaluación de la energía disponible	24
3.2.6 Análisis elemental (CHNS).....	25
3.2.7 Análisis termogravimétrico (TGA).....	25
3.3 Determinación el consumo energético y la disponibilidad exergética.....	26
3.3. Información técnica de los equipos y parámetros operativos	27
3.3.2 Especificación y evaluación de equipos	28
3.3.3 Modelo matemático del sistema de producción de biocarbón	28

3.4 Viabilidad económica del sistema de producción de biocarbón	35
3.4.1 Distribución de planta y dimensionamiento de áreas	35
3.4.2 Evaluación de la inversión inicial CAPEX	36
3.4.3 Evaluación de los costos de operación OPEX	37
3.4.4 Análisis de viabilidad económica	38
3.5 Resumen de Actividades	40
4. Resultados	40
4.1 Resultados Pretratamiento y caracterización de la biomasa	41
4.1.1 Resultados de Actividades de Pretratamiento:	41
4.1.2 Resultados de la selección de parámetros técnicos de la muestra	43
4.1.3 Resultados del diseño experimental de pirólisis a escala de laboratorio	45
4.1.4 Resultados de la caracterización del biocarbón	47
4.1.5 Resultados de la evaluación de la energía disponible	49
4.1.6 Síntesis de resultados y selección de condiciones de tratamiento térmico	51
4.1.7 Resultados del análisis elemental (CHNS)	54
4.1.8 Resultados del análisis Termogravimétrico (TGA)	56
4.2 Resultados del análisis energético y exergético del sistema	61
4.2.1 Resultados Información técnica y parámetros operativos	62
4.2.2 Resultados Especificación y evaluación de equipos	66
4.2.3 Resultados Modelo matemático del sistema de producción de biocarbón	73
4.3 Resultados Evaluación económica del sistema de producción	85
4.3.1 Resultados Distribución de planta y dimensionamiento de áreas	85
4.3.2 Resultados de la evaluación del CAPEX	88

4.3.3 Resultados de la evaluación del OPEX.....	91
4.3.4 Resultados del Análisis de Viabilidad Económica	92
4.3.5 Discusión de los resultados del Estudio Económico.....	95
5. Conclusiones.....	102
6. Recomendaciones	103
Referencias Bibliográficas	104

Lista de Tablas

Tabla 1 Matriz experimental de los ensayos de pirólisis	24
Tabla 2 Matriz experimental de los ensayos termogravimétricos.....	26
Tabla 3 Porcentaje de pérdida de masa por secado solar.....	41
Tabla 4 Distribución del tamaño de partícula de la biomasa M15 pulverizada.....	43
Tabla 5 Caracterización de los residuos sólidos orgánicos compostados	44
Tabla 6 Resultados del diseño experimental de pirólisis	46
Tabla 7 Resumen de la caracterización de los productos.....	52
Tabla 8 Comparación de literatura para las propiedades del biocarbón	53
Tabla 9 Resultados del análisis elemental (CHNS)	54
Tabla 10 Comparación de relaciones atómicas, con la literatura.....	55
Tabla 11 Pérdida de masa por intervalos de temperatura	57
Tabla 12 Pérdida de masa etapa isotérmica	60
Tabla 13 Densidades aparentes de la Biomasa	62
Tabla 14 Especificaciones técnicas de los motores eléctricos	65
Tabla 15 Consumo eléctrico anual total del sistema actual	66
Tabla 16 Factor de crecimiento y distribución semanal de residuos	74
Tabla 17 Balance de masas acumulado del sistema.....	75
Tabla 18 Operación diaria del sistema en condición de máxima carga (año 15).....	76
Tabla 19 Horas de operación del cargador frontal.....	77
Tabla 20 Consumo eléctrico anual de los equipos de la planta	78
Tabla 21 Requerimiento térmico del horno a 250 °C y 30 min de retención	79
Tabla 22 Consolidado del consumo energético anual de la planta 15 años.....	80

Tabla 23 Resumen del modelo energético acumulado a 15 años	81
Tabla 24 Balance exergético global del horno de pirólisis	83
Tabla 25 Magnitudes exergéticas anuales del horno de pirólisis a 15 años.....	84
Tabla 26 Niveles de distribución de planta.....	86
Tabla 27 Rectángulos operativos y áreas por equipo.....	87
Tabla 28 Equipos principales del sistema de producción de biocarbón	89
Tabla 29 Resumen Bloque B: Infraestructura.....	90
Tabla 30 Resumen general CAPEX Infraestructura Nueva.....	91
Tabla 31 Resumen del OPEX anual del sistema de producción de biocarbón	92
Tabla 32 Flujo de caja anual del proyecto para el horizonte de 15 años	93
Tabla 33 Viabilidad Económica Infraestructura Nueva.....	94
Tabla 34 Resumen General CAPEX Infraestructura Existente	96
Tabla 35 Viabilidad Económica Infraestructura Existente	97
Tabla 36 Proyección de recepción diaria en sistemas de producción continuo.	99

Lista de Figuras

Figura 1 Esquema del sistema experimental de pirolisis.....	23
Figura 2 Flujograma de resumen de actividades.....	37
Figura 3 Perfil de pérdida de masa durante el secado solar.....	42
Figura 4 Resultados de la caracterización del biocarbón.....	48
Figura 5 Resultados Poder Calorífico Superior de las fracciones sólidas	50
Figura 6 Descomposición térmica de M15 TG/DTG (25–700 °C, 10 °C/min).....	56
Figura 7 Isotherma a 250 °C durante 60 min.....	61
Figura 8 Diagrama de Flujo del sistema actual.....	64
Figura 9 Diagrama de Flujo del nuevo ciclo de operación.	67
Figura 10 Layout esquemático de la distribución de planta	88

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Formulación Modelado Matemático del balance de masas, energía y exergía

Apéndice B: Fotografías sistema actual planta Aprovechamiento de RSO Oiba Santander

Apéndice C: Código Matlab Simulación De La Planta De Biocarbon

Acrónimos

ASH- Material inorgánico (cenizas)	M15B- Biocarbon de pirolisis a 250 °C /30 min
ASTM - American Society for Testing and Materials	Nm³ - Metro cúbico normalizado (0 °C y 1 atm)
AIU- Administración Imprevistos Utilidad	O/C - Relación atómica oxígeno/carbono
BC – Biocarbón	OPEX - Operational Expenditure (Costos de operación)
CAPEX - Capital Expenditure (Inversión de Capital)	ROPS- Roll-Over Protective Structure, (Estructura de protección contra vuelcos)
CF - Carbono fijo	RSO - Residuos sólidos orgánicos
CHNS - Análisis elemental de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre	RSOC - Residuos sólidos orgánicos Compostados
DNP- Departamento Nacional de Planeación	SMLV - Salario mínimo legal vigente
DTG - Derivada termogravimétrica	t - Tonelada métrica
HHV - Higher Heating Value (Poder calorífico superior)	TGA - Thermogravimetric Analysis (Análisis termogravimétrico)
H/C - Relación atómica hidrogeno/carbono	TIR - Tasa interna de retorno
LHV - Lower Heating Value (Poder calorífico inferior)	VPN - Valor presente neto
M15N- Biomasa natural 15 días de compostada	β - Factor adimensional de correlación exergética.

Resumen

Título: Evaluación Técnica Y Económica De La Producción De Biocarbón Mediante Pirólisis De Residuos Sólidos Orgánicos Compostados*

Autor: Kevin Fernando García Gamboa**

Palabras Clave: Pirólisis, Biocarbón, residuos orgánicos, análisis energético y exergético,

Descripción: La gestión de residuos sólidos orgánicos presenta limitaciones asociadas a su disposición en rellenos sanitarios y a los largos tiempos de tratamiento en sistemas convencionales de compostaje, lo que genera impactos ambientales y desaprovecha su potencial de valorización. La pirólisis, como proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno, surge como una alternativa para transformar estos residuos en biocarbón, un material con propiedades energéticas y agronómicas de interés. Este trabajo presenta el estudio experimental y computacional de un sistema de producción de biocarbón a partir de residuos sólidos orgánicos compostados. La biomasa fue caracterizada mediante análisis próximo y elemental, evaluando contenido de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo. Adicionalmente, se realizaron análisis termogravimétricos (TGA) para identificar las etapas de descomposición térmica y definir rangos de operación adecuados. Con base en estos resultados, se llevaron a cabo ensayos de pirólisis en un reactor tubular de lecho fijo, operando entre 175 y 350 °C y tiempos de retención de hasta 90 minutos, evaluando los rendimientos de las fracciones sólida, líquida y gaseosa, así como el poder calorífico del biocarbón obtenido. Los resultados experimentales permitieron seleccionar condiciones de operación con un equilibrio entre rendimiento sólido, estabilidad del material y consumo energético. A partir de los datos experimentales y de información levantada en una planta municipal de RSOC, se desarrolló en MATLAB un modelo matemático con resolución diaria, integrando balances de masa, energía y exergía, orientado a simular el comportamiento de un sistema de producción de biocarbón con capacidad de diseño de 8 toneladas semanales de residuos orgánicos. El modelo permitió cuantificar consumos energéticos, desempeño exergético del horno de pirólisis y escenarios de crecimiento operativo a largo plazo. Finalmente, se realizó una evaluación económica considerando el CAPEX, y el OPEX en análisis de viabilidad financiera. Los resultados indican que el sistema es técnica y económicamente viable, especialmente cuando se implementa como una mejora tecnológica sobre plantas de compostaje existentes. En conjunto, el estudio demuestra que la producción de biocarbón a partir de residuos orgánicos compostados constituye una estrategia viable de valorización de residuos, con mayor potencial en aplicaciones agrícolas y alineada con principios de economía circular.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Maestría en Ingeniería Mecánica. Director: Ph.D. Juan Pablo Flórez Mera Codirector: Ph.D. Yesid Javier Rueda Ordoñez.

Abstract

Title: Technical and Economic Evaluation of Biochar Production through Pyrolysis of Composted Organic Solid Waste *

Author: Kevin Fernando García Gamboa **

Key Words: Pyrolysis, Biochar, organic solid waste, energy and exergy analysis.

Description: The management of organic solid waste faces limitations associated with landfill disposal and long treatment times in conventional composting systems, leading to environmental impacts and the underutilization of its valorization potential. Pyrolysis, as a thermal decomposition process in the absence of oxygen, emerges as an alternative for converting these wastes into biochar, a material with relevant energy and agronomic properties. This work presents an experimental and computational study of a biochar production system based on composted organic solid waste. The biomass was characterized through proximate and ultimate analyses, evaluating moisture content, volatile matter, ash content, and fixed carbon. Additionally, thermogravimetric analyses (TGA) were performed to identify the stages of thermal decomposition and to define suitable operating ranges. Based on these results, pyrolysis experiments were conducted in a fixed-bed tubular reactor, operating between 175 and 350 °C with residence times of up to 90 minutes, assessing the yields of solid, liquid, and gaseous fractions, as well as the calorific value of the produced biochar. The experimental results allowed the selection of operating conditions that represent a compromise between solid yield, material stability, and energy consumption. Using the experimental data and information collected from a municipal composting plant handling organic solid waste, a mathematical model was developed in MATLAB with daily resolution, integrating mass, energy, and exergy balances to simulate the behavior of a biochar production system with a design capacity of 8 tons of organic waste per week. The model enabled the quantification of energy consumption, the exergy performance of the pyrolysis kiln, and long-term operational growth scenarios. Finally, an economic evaluation was conducted considering capital expenditure (CAPEX) and operating expenditure (OPEX) within a financial feasibility analysis. The results indicate that the proposed system is technically and economically viable, particularly when implemented as a technological upgrade to existing composting plants. Overall, the study demonstrates that biochar production from composted organic solid waste constitutes a viable waste valorization strategy, with greater potential in agricultural applications and aligned with circular economy principles.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Master's in Mechanical Engineering. Director: Ph.D. Juan Pablo Flórez Mera Codirector: Ph.D. Yesid Javier Rueda Ordoñez.

Introducción

La generación creciente de residuos sólidos orgánicos representa un desafío ambiental relevante, especialmente en zonas urbanas donde los rellenos sanitarios constituyen una solución limitada y de corto plazo. En este contexto, la pirólisis surge como una alternativa tecnológica para la valorización de estos residuos, al permitir su conversión en biocarbón mediante procesos de descomposición térmica en ausencia de oxígeno. El biocarbón obtenido presenta propiedades que lo hacen adecuado para aplicaciones energéticas y productivas, como su estabilidad térmica, bajo contenido de humedad y densidad energética favorable (Palma et al., 2023).

El aprovechamiento energético de residuos orgánicos ha despertado un creciente interés debido a su potencial para reducir impactos ambientales y generar valor a partir de materiales tradicionalmente considerados desechos. La conversión termoquímica de biomasa permite obtener productos sólidos con aplicaciones en sectores energéticos, industriales y agrícolas, donde el biocarbón destaca por sus propiedades físicas y químicas mejoradas (McHenry, 2009).

En este contexto, Colombia ha venido impulsando iniciativas orientadas a transformar el modelo tradicional de gestión de residuos sólidos, priorizando su tratamiento y aprovechamiento, el programa *Basura Cero*, en el marco del Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 “*Colombia Potencia Mundial de la Vida*”, el Gobierno Nacional promueve la reducción progresiva de la disposición final en rellenos sanitarios y la transición hacia esquemas de valorización material y energética de los residuos. Este programa prioriza el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos, el fortalecimiento del compostaje, y el desarrollo de parques tecnológicos orientados a sistemas de producción de subproductos con valor agregado y que cumplan políticas ambientales de economía circular (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2023).

Para que estas tecnologías puedan implementarse, se deben realizar estudios sobre los RSO que permitan diseñar sistemas de producción de valor agregado. La caracterización de la biomasa es un aspecto clave para comprender su comportamiento durante la descomposición térmica y el rendimiento del biocarbón obtenido. En particular, residuos orgánicos previamente compostados han mostrado un desempeño favorable en procesos termoquímicos, asociado a cambios en su estructura y composición que influyen en la eficiencia del proceso (Bridgwater, 2012). Estas propiedades inciden directamente en la calidad del biocarbón y en su potencial de uso posterior.

Adicionalmente, el consumo energético del sistema de producción de biocarbón constituye un factor determinante en su sostenibilidad técnica y económica. La aplicación de análisis energéticos y exergéticos, basados en la primera y segunda ley de la termodinámica, permite evaluar de manera integral el uso de la energía, identificar pérdidas y analizar el desempeño global del proceso (Hosseini & Wahid, 2015).

En este marco, la presente investigación desarrolla una evaluación técnica y económica de la producción de biocarbón a partir de residuos sólidos orgánicos compostados, con el objetivo de analizar su viabilidad como alternativa de valorización, contribuir a esquemas de economía circular y reducir el impacto ambiental asociado a la gestión de estos residuos.

1 Objetivos

Objetivo General

Evaluar los factores técnicos y económicos de la producción de biocarbón mediante la descomposición térmica de residuos sólidos orgánicos compostados.

1.1 Objetivos Específico 1:

Determinar las propiedades energéticas y térmicas de los residuos sólidos orgánicos compostados, para la producción de Biocarbon realizando experimentos de caracterización de biomasa.

1.2 Objetivos Específico 2

Determinar el consumo energético y disponibilidad exergética en un sistema de producción de Biocarbón por descomposición térmica de residuos sólidos orgánicos compostados mediante un análisis termodinámico de primera y segunda ley.

1.3 Objetivos Específico 3

Cuantificar los costos de implementación de un sistema de producción de Biocarbón a partir de residuos sólidos orgánicos compostados, considerando tanto el CAPEX (Capital Expenditure) como el OPEX (Operating Expenditure).

2. Contexto y Estado del Arte

2.1 Formulación Del Problema

La gestión de residuos sólidos orgánicos en Colombia representa un desafío relevante para la sostenibilidad ambiental. En 2022 se dispusieron aproximadamente 11 983 710 toneladas de residuos sólidos, de las cuales cerca del 96,7 % fueron gestionadas en rellenos sanitarios (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2022). Esta práctica contribuye a la saturación de los sitios de disposición final y a la generación de emisiones asociadas a la degradación de la materia orgánica, además de limitar el aprovechamiento de estos residuos. La problemática se acentúa en zonas rurales y semiurbanas, donde la infraestructura para un manejo integral resulta insuficiente, dificultando el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, en particular los ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) y ODS 13 (Acción por el Clima) (Naciones Unidas, 2015).

En este contexto, los sistemas de compostaje de residuos sólidos orgánicos constituyen una alternativa ampliamente implementada en el país; sin embargo, presentan limitaciones operativas asociadas a tiempos de retención prolongados en los patios de compostaje, lo que restringe su capacidad de procesamiento. Estudios previos indican que, aunque ciertos ajustes operativos pueden mejorar la calidad del compost obtenido, los tiempos requeridos para alcanzar la madurez adecuada continúan siendo elevados en sistemas tradicionales (Hernández-Gómez et al., 2020).

Ante estas limitaciones, la producción de biocarbón mediante descomposición térmica de residuos orgánicos se plantea como una estrategia complementaria para la gestión sostenible de estos materiales, al permitir la reducción del volumen de residuos destinados a disposición final y su transformación en un producto con valor agregado (Basu, 2010). El biocarbón obtenido presenta potencial para aplicaciones energéticas específicas y, para aplicaciones como insumo agrícola

mejorando las propiedades físicas y químicas del suelo (Syguła et al., 2025), en concordancia con enfoques de economía circular y aprovechamiento integral de los residuos. En este contexto, resulta pertinente analizar como integrar este proceso a los sistemas de gestión de residuos sólidos orgánicos en Colombia.

¿Cuáles son las condiciones técnicas y económicas para la producción de biocarbón mediante la descomposición térmica de residuos sólidos orgánicos en Colombia, de manera que se obtenga un producto con propiedades adecuadas para su aprovechamiento y valorización?

Hipótesis de Investigación: La producción de biocarbón a partir de residuos sólidos orgánicos en Colombia es viable desde el punto de vista técnico y económico bajo condiciones específicas de temperatura, tiempo de residencia y composición de los residuos, permitiendo la obtención de un material con propiedades favorables para su valorización en diferentes aplicaciones, dentro de una gestión sostenible de residuos orgánicos.

2.2 Antecedentes

Diversas investigaciones han evidenciado la viabilidad de la pirólisis como alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos y biomasa residual, tanto desde una perspectiva energética como de valorización de subproductos. En particular, estudios realizados en Colombia han explorado la producción de biocarbón a partir de residuos de poda, jardinería y biomasa residual, destacando mejoras en el contenido de carbono fijo y propiedades favorables para su aplicación como enmienda de suelos (Pardavé Livia & Suarez, 2021).

Otros trabajos han abordado la viabilidad técnico-económica de la pirólisis de biomasa residual agrícola, considerando residuos como el bagazo de caña y subproductos de palma de aceite. Estos estudios integran análisis de selección de biomasa, diseño preliminar de planta y evaluación económica, evidenciando que, bajo condiciones adecuadas de operación y escala, la

valorización termoquímica puede resultar competitiva frente a alternativas convencionales de gestión de residuos (Cárdenas García & Sánchez Carreño, 2015).

Adicionalmente, se ha evaluado el comportamiento energético de distintos tipos de biomasa mediante su caracterización térmica y cinética, así como su desempeño en sistemas de combustión y conversión energética de pequeña escala. Estas investigaciones confirman que biomasas no convencionales pueden presentar propiedades comparables a las de combustibles sólidos tradicionales, ampliando el espectro de residuos con potencial de aprovechamiento (García Sánchez, 2023).

Asimismo, la descomposición térmica a baja temperatura y la torrefacción han sido estudiadas como alternativas para el tratamiento de residuos orgánicos urbanos. Estos estudios incluyen la caracterización de los residuos y la evaluación de su poder calorífico tras el tratamiento térmico, junto con análisis económicos que sugieren su potencial como opción de valorización frente a la disposición en rellenos sanitarios (Ortiz Mier & Velandia Rojas, 2018).

En un contexto de sistema de producción industrial teórico, se evaluó el potencial energético promedio de los residuos orgánicos presentes en los residuos sólidos urbanos, así como su viabilidad técnica y económica mediante procesos de descomposición térmica, particularmente torrefacción. La investigación incluyó la caracterización de residuos orgánicos provenientes de entornos institucionales y su conversión en un material sólido con mayor densidad energética, además de un análisis económico preliminar que evidenció la posibilidad de aprovechamiento local de estos residuos. Los resultados obtenidos aportan bases técnicas para el desarrollo de soluciones de valorización de residuos orgánicos en Colombia y resaltan la importancia de integrar criterios energéticos y económicos en el diseño de sistemas de aprovechamiento (Ortiz Ochoa, 2023).

En conjunto, estos antecedentes, desarrollados principalmente en el contexto académico colombiano, evidencian el interés creciente por la valorización de residuos orgánicos mediante procesos de descomposición térmica. Sin embargo, resaltan la necesidad de estudios orientados a sistemas de aprovechamiento de residuos orgánicos que operen bajo condiciones reales y representativas del contexto colombiano.

3. Metodología

La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental y analítico, orientado a la evaluación técnica y económica de la producción de biocarbón mediante la descomposición térmica de residuos sólidos orgánicos compostados. La metodología se estructuró de forma secuencial por objetivos específicos, de modo que los resultados de cada etapa sirvieran como insumo para el desarrollo de las fases posteriores, asegurando coherencia y trazabilidad del proceso de investigación.

3.1 Materiales y origen de la biomasa

La biomasa utilizada correspondió a residuos sólidos orgánicos compostados provenientes de la planta de aprovechamiento del municipio de Oiba, Santander, donde los residuos orgánicos municipales son gestionados mediante separación manual, trituración y compostaje aeróbico para la producción de abono agrícola. Con el fin de evaluar la influencia del tiempo de compostaje sobre las propiedades de la biomasa, se recolectaron muestras en diferentes etapas del proceso, correspondientes a 0, 15, 30, 45 y 60 días. Las muestras fueron almacenadas en recipientes herméticos y transportadas al laboratorio para su pretratamiento, caracterización y análisis.

3.2 Pretratamiento y caracterización de la biomasa

Se compone actividades de pretratamiento y caracterización de la biomasa, experimentos de pirólisis a escala de laboratorio, análisis termogravimétrico y análisis elemental que corresponde a la metodología del Objetivo Específico 1. Las actividades experimentales se desarrollaron principalmente en el Laboratorio de Combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, así como en otros laboratorios especializados de la institución para la caracterización fisicoquímica de los materiales.

3.2.1 Actividades de Pretratamiento:

Secado solar de la biomasa: Las muestras de residuos sólidos orgánicos compostados, correspondientes a diferentes etapas del proceso de compostaje (0, 15, 30, 45 y 60 días), fueron dispuestas en bandejas y expuestas a condiciones ambientales en la terraza del edificio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. El peso de las muestras fue monitoreado durante un periodo de tres días consecutivos, durante 8 horas efectivas por día, entre jornadas las muestras se almacenaron para evitar ganancia o pérdida por condiciones ambientales de lluvia o vientos fuertes, considerándose finalizado el proceso cuando no se registraron variaciones significativas en la masa, adicionalmente se registraron variables ambientales como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar incidente, suministradas por una estación meteorológica instalada en el sitio.

Pulverización y tamizado. Una vez finalizado el secado, la biomasa fue pulverizada en un molino para reducir su tamaño de partícula y permitir su caracterización inicial. Posteriormente, se seleccionó una muestra representativa para el análisis de la distribución del tamaño de partícula mediante tamizado en seco, utilizando aproximadamente 400 g de muestra y tamices normalizados

No. 14 y No. 35, con aberturas de 1,4 mm y 500 μm , respectivamente. La fracción retenida en cada tamiz se determinó por diferencia de masa.

Determinación de la densidad del lecho. La densidad del lecho de la biomasa pulverizada seleccionada se determinó mediante ensayos de lecho fijo empleando dos recipientes de diferente geometría. En ambos casos se calculó la densidad de lecho como la relación entre la masa (m) y el volumen ocupado (V), según la ecuación (1). el valor final de densidad se obtuvo como el promedio de ambas mediciones.

$$\rho_{Lecho} = \frac{m}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1)$$

3.2.2 Selección de parámetros técnicos de la muestra

Con el fin de identificar el tiempo de compostaje más adecuado previo al proceso de descomposición térmica, se analizaron muestras de residuos sólidos orgánicos recolectadas a los 0, 15, 30, 45 y 60 días del proceso de compostaje. A cada muestra se le determinó el contenido de humedad en base húmeda conforme a la norma ASTM E1756-24, y en base seca se determinaron la materia volátil según ASTM E872-24, el material inorgánico de acuerdo con ASTM E1755-24, y el carbono fijo se calculó por diferencia.

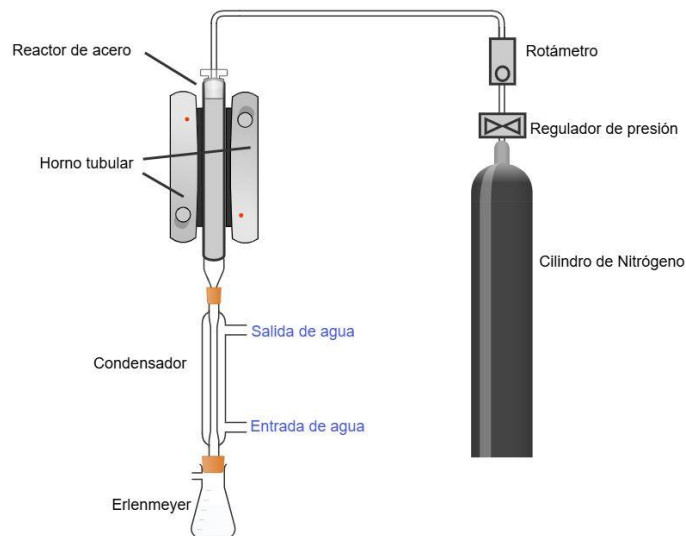
La selección de la muestra representativa se realizó mediante un criterio comparativo basado en tres parámetros: menor tiempo de retención en el compostaje, menor contenido de humedad y mayor porcentaje de carbono fijo, considerando su influencia directa en la eficiencia del proceso de descomposición térmica y en la calidad del biocarbón obtenido. Todos los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

3.2.3 Diseño experimental de pirólisis a escala de laboratorio

Los ensayos de pirólisis se realizaron en el Laboratorio de Combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, utilizando un horno tubular de configuración vertical que permite definir la tasa de calentamiento y la temperatura final del proceso. El sistema cuenta con un porta-muestra de acero inoxidable con sello hermético, conectado a una línea de suministro de nitrógeno para garantizar una atmósfera inerte durante la descomposición térmica; el flujo de nitrógeno se mantuvo constante en 150 ml/min. A la salida del reactor se instalaron condensadores para la recuperación de la fracción líquida, mientras que los gases no condensables fueron conducidos a una campana de extracción. El esquema del sistema experimental se presenta en la Figura 1.

Figura 1

Esquema del sistema experimental de pirólisis



Los ensayos se diseñaron con el objetivo de evaluar la conversión de la biomasa seleccionada. La fracción sólida fue determinada directamente a partir de la masa residual en el

porta-muestra, la fracción líquida mediante condensación y la fracción gaseosa se estimó por diferencia de masas.

Tabla 1

Matriz experimental de los ensayos de pirólisis

Nivel	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
-1	250	45
0	300	60
1	350	90

3.2.4 Evaluación y caracterización del biocarbón

A cada muestra obtenida de los experimentos de pirólisis se le determinó el contenido de humedad conforme a la norma ASTM E1756-24, la materia volátil según ASTM E872-24 y el material inorgánico de acuerdo con ASTM E1755-24. El porcentaje de carbono fijo se calculó por diferencia a partir de los resultados obtenidos. Todos los ensayos de caracterización se realizaron en el Laboratorio de Combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

3.2.5 Evaluación de la energía disponible

Para determinar las propiedades energéticas de las fracciones sólidas obtenidas en los experimentos de pirólisis, se midió el Poder Calorífico Superior (HHV) mediante una bomba calorimétrica de oxígeno. Los ensayos se realizaron sobre las muestras de biocarbón producidas en la actividad experimental previa. El Poder Calorífico Inferior (LHV) se calculó a partir del valor de HHV, corrigiendo el efecto del contenido de humedad presente en la muestra, conforme a la ecuación (2).

$$LHV = HHV - (m_{H_2O} * \Delta H_{vap}) \quad (2)$$

Donde m_{H2O} representa la masa de agua en la muestra, obtenida del análisis de humedad, y ΔH_{vap} es la entalpia de vaporización del agua (aproximadamente 2 257 kJ/kg). Las mediciones de poder calorífico superior se realizaron utilizando una bomba calorimétrica Parr 6200, en el laboratorio de caracterización fisicoquímica vinculado al grupo de investigación INTERFASE, ubicado en la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

3.2.6 Análisis elemental (CHNS)

Con el fin de evaluar la composición elemental de la biomasa y el efecto del tratamiento térmico seleccionado, se realizó un análisis elemental tanto a la biomasa en estado natural (M15N) como al biocarbón (M15B) obtenido bajo las condiciones definidas. El análisis se llevó a cabo mediante un analizador CHNS (Vario Elcubo, combustión total, detector TCD), que permite determinar la composición en masa de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) a partir de la combustión completa de la muestra.

El contenido de oxígeno (O) se estimó por diferencia a partir de los resultados del análisis elemental, como se expresa en la ecuación (3), considerando los valores de C, H, N, S y cenizas en la misma base. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio Instrumental de Análisis Químico de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

$$O(\%) = 100 - (C + H + N + S + Ash) \quad (3)$$

3.2.7 Análisis termogravimétrico (TGA)

Con el fin de evaluar el comportamiento térmico del biocarbón seleccionado (M15B) y compararlo con la biomasa en estado natural (M15N), se realizó un análisis termogravimétrico (TGA), permitiendo analizar la pérdida de masa del material en función de la temperatura bajo diferentes atmósferas de reacción.

Los ensayos se llevaron a cabo en el Centro Integrado de Laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, conforme a la norma ASTM E1131, empleando un equipo TA Instruments, modelo Discovery 5500, para muestras de aproximadamente 10 mg, con un flujo de gas de 50 ml/min. Se emplearon atmósferas de nitrógeno (N₂) y aire sintético.

En total, se realizaron siete ensayos termogravimétricos, considerando la combinación del tipo de muestra (biomasa al natural y biocarbón), la atmósfera de ensayo y el programa térmico aplicado. El detalle de las condiciones experimentales se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2

Matriz experimental de los ensayos termogravimétricos

Ensayo	Muestra	Atmósfera	Programa térmico
1	Biomasa al natural	Aire sintético	T _{amb} → 700 °C, 10 °C/min
2	Biocarbón	Aire sintético	T _{amb} → 700 °C, 10 °C/min
3	Biomasa al natural	Nitrógeno	T _{amb} → 700 °C, 10 °C/min
4	Biocarbón	Nitrógeno	T _{amb} → 700 °C, 10 °C/min
5	Biomasa al natural	Aire sintético	T _{amb} → 250 °C, 10 °C/min + 60 min isotérmico
6	Biomasa al natural	Nitrógeno	T _{amb} → 250 °C, 10 °C/min + 60 min isotérmico
7	Biocarbón	Nitrógeno	T _{amb} → 250 °C, 10 °C/min + 60 min isotérmico

Nota. T_{amb}: Temperatura ambiente, velocidad de calentamiento constante.

Para facilitar la comparación entre corridas, las curvas TG se expresaron como porcentaje relativo a la masa a 25 °C (W₂₅ = 100 %). La DTG se calculó como la derivada de la masa respecto a la temperatura (dW/dT).

3.3 Determinación el consumo energético y la disponibilidad exergética

Las siguientes actividades se orientaron a determinar el consumo energético y la disponibilidad exergética de un sistema de producción de biocarbón a partir de residuos sólidos orgánicos compostados, mediante la aplicación de un análisis termodinámico basado en la primera y segunda ley como metodología del Objetivo Específico 2. Para ello, se integraron datos

experimentales obtenidos en el Objetivo Específico 1, e información técnica de los equipos y parámetros operativos levantados en actividades complementarias directamente en la planta de aprovechamiento de residuos del municipio de Oiba, Santander.

La metodología se estructuró en dos actividades principales: (2.1) la especificación y evaluación de los equipos que conforman el sistema de producción de biocarbón, y (2.2) el desarrollo de un modelo matemático para la simulación del comportamiento másico, energético y exergético del sistema. Como resultado, se implementó un modelo computacional en MATLAB que integra los balances de masa, energía y exergía, permitiendo estimar de forma sistemática el desempeño del sistema bajo condiciones reales de operación. Las ecuaciones utilizadas para los balances de masa, energía y exergía se presentan en detalle en el Apéndice A.

3.3. Información técnica de los equipos y parámetros operativos

Con el fin de contar con información representativa del funcionamiento real del sistema, se realizaron visitas técnicas a la planta de aprovechamiento de residuos de Oiba, orientadas al levantamiento de parámetros físicos y operativos necesarios para el análisis energético. Estas actividades permitieron caracterizar el material procesado, identificar el flujo del proceso y recopilar información técnica de los equipos instalados como se ve en las fotografías del Apéndice B. Como parte de este levantamiento, se determinó experimentalmente la densidad de lecho del material triturado mediante un ensayo en planta durante una jornada regular de operación, registrando la variación de masa, el volumen de lixiviados y la altura efectiva del lecho. Adicionalmente, se identificaron los equipos del sistema y sus regímenes de operación, así como la información eléctrica de los motores asociados, a partir de los datos consignados en sus placas características. Esta información se utilizó para estimar el consumo eléctrico del sistema actual y servir de base para la especificación y evaluación de equipos.

3.3.2 Especificación y evaluación de equipos

La especificación técnica de los equipos del sistema de producción de biocarbón se realizó a partir del análisis del proceso actual, los resultados experimentales del Objetivo Específico 1 y los parámetros operativos levantados en planta para la creación de un nuevo ciclo operativo. La especificación incluyó dimensiones generales, potencia instalada, tipo de energía requerida y materiales constructivos, priorizando configuraciones comerciales adecuadas para operación en ambientes industriales. La evaluación de los equipos se efectuó desde un enfoque funcional y operativo, verificando la coherencia entre capacidades, tiempos de operación y flujo de material, de manera que la configuración propuesta sirviera como base técnica para el análisis energético y exergético y para la formulación del modelo matemático del sistema.

3.3.3 Modelo matemático del sistema de producción de biocarbón

El análisis se desarrolló mediante un modelo matemático con resolución diaria, implementado en MATLAB, cuyo objetivo fue representar el comportamiento operativo, energético y económico de una planta de producción de biocarbón. El modelo se estructuró de forma modular, con una función principal encargada del balance diario de masas y subfunciones complementarias para el cálculo energético, exergético y económico del sistema, la transcripción del código con sus anotaciones se encuentra en el Apéndice C.

Función principal_simulacion_planta.mlx: Ejecuta un balance secuencial de masas a lo largo de un horizonte de simulación de 15 años, considerando un escenario de crecimiento progresivo en la recepción de residuos y un patrón semanal de carga del sistema. La masa recibida en el día (d) depende del año, y el día de la semana, el código genera un balance de masas para cada equipo (i), siguiendo las etapas del proceso para calcular, flujos de material, y la producción

diaria de biocarbón, para un horizonte completo o por año, las magnitudes acumuladas se obtienen como sumas sobre el conjunto de días, como se expresa en la ecuación (4).

$$\sum m_{in,i}(d) = \sum m_{out,i}(d) - \sum m_{perdidas,i}(d) \quad (4)$$

Una vez definida la masa que ingresa a cada equipo, se utilizan las velocidades de procesamiento especificadas en el modelo para calcular las horas diarias de operación correspondientes a cada etapa del proceso, usando la ecuación (5).

$$h_i(d) = \frac{m_{in,i}(d)}{v_i} \quad (5)$$

$h_i(d)$ = horas de operación del equipo (i) en el día (d)

$m_{in,i}(d)$ = masa procesada por el equipo (i) en el día (d)

v_i = velocidad nominal del equipo (i) [kg/h]

Subfunción *modelo_energetico_planta.m*: Utiliza como entrada los resultados diarios de masa y horas de operación para calcular el consumo energético del sistema, la Energía total Anual es la suma las contribuciones sobre el conjunto de días del año, para cada año (a) de acuerdo con la ecuación (6).

$$E_{total,anual}(a) = E_{elec,anual}(a) + E_{diesel,anual}(a) + E_{GN,anual}(a) \quad (6)$$

La energía eléctrica anual es la sumatoria de la contribución de energía eléctrica diaria para cada equipo (i), ecuación (7).

$$E_{elec,anual}(a) = \sum_d E_{elec}(d) \quad \text{donde : } E_{elec}(t) = \sum_i E_i(d) \quad (7)$$

La energía eléctrica diaria consumida por cada equipo, ecuación (8), se obtiene a razón de la potencia nominal P_i , entre la eficiencia del motor n_i , multiplicado por las horas de operación diarias $h_i(d)$.

$$E_i(d) = \frac{P_i}{n_i} * h_i(d) \quad (8)$$

La energía química anual para el cargador frontal, ecuación (9), se asocia a su consumo de diésel, y es la suma de sus contribuciones diarias:

$$E_{diesel,anual}(a) = \sum_d E_{diesel}(d) \quad (9)$$

La energía química diaria del diésel se calcula a partir de su poder calorífico inferior (PCI), multiplicado por el volumen diario de diésel consumido que se estima con una tasa de consumo volumétrico constante y las horas de operación diarias del cargador conforme a la ecuación (10).

$$E_{diesel}(d) = PCI_{diesel} * [v_{diesel} * h_{carg}(d)] \quad (10)$$

Donde v_{diesel} corresponde a un consumo de diésel de 3 litros por hora de operación, las horas de trabajo del cargador: $h_{carg}(d)$, se aproximan según un factor de trabajo para días de máxima o mínima operación, la energía contenida en 1 litro de diésel: $PCI_{diesel} = 9,9$ kWh/L (Çengel & Boles, 2025, Tabla A-27)

La energía química anual asociada a la quema de gas natural para cada año (a) se calcula como la suma de la contribución diaria, en los días de operación:

$$E_{GN,anual}(a) = \sum_t E_{GN}(d) \quad (11)$$

La energía química diaria del gas natural corresponde al calor de combustión disponible $Q_{comb}(d)$, generado a partir de la combustión del volumen diario de gas natural referido

a condiciones normales $V_{GN}(d)$ [$\text{Nm}^3/\text{día}$], y se calcula mediante su poder calorífico inferior: $PCI_{GN} = 10 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$ (Çengel & Boles, 2025, Tabla A-27) como se indica en la ecuación (12).

$$E_{GN}(d) = Q_{comb}(d) = V_{GN}(d) * PCI_{GN} \quad (12)$$

El horno de pirólisis se modela como un sistema de volumen de control de tipo 0D, donde $Q_{comb}(d)$ representa calor total liberado por la combustión del gas natural, el cual se distribuye entre el calor útil requerido por el proceso $Q_{util}(d)$, las pérdidas térmicas del sistema $Q_{perd}(d)$, y la energía transportada por los gases de escape $Q_{fg}(d)$, según las ecuaciones (13) a (18).

$$Q_{comb}(d) = Q_{util}(d) + Q_{perd}(d) + Q_{fg}(d) \quad (13)$$

El calor útil requerido por el proceso corresponde a la energía efectivamente transferida a la biomasa y se expresa como la suma de las contribuciones térmicas necesarias para su tratamiento, donde cada término representa, respectivamente, el calentamiento de la biomasa seca $Q_{bio}(d)$, el calentamiento del agua líquida hasta ebullición $Q_{w,liq}(d)$, la evaporación de la humedad $Q_{evap}(d)$, el sobrecalentamiento del vapor hasta la temperatura de proceso $Q_{sup}(d)$, y el requerimiento energético adicional asociado a la torrefacción $Q_{torref}(d) = 350 \text{ kJ}/\text{kg}$ asumido según rangos referenciados de literatura (Yun et al., 2021).

$$Q_{util}(d) = Q_{bio}(d) + Q_{w,liq}(d) + Q_{evap}(d) + Q_{sup}(d) + Q_{torref}(d) \quad (14)$$

Las pérdidas térmicas del horno $Q_{perd}(d)$, se asumieron como una fracción fija del calor de combustión, representando las pérdidas globales hacia el ambiente por conducción, convección y radiación. En este estudio se adoptó un valor de 15 % del calor de combustión.

$$Q_{perd}(d) = f_{perd} * Q_{comb}(d) \quad con: f_{perd} = 0,15 \quad (15)$$

La energía asociada a los gases de escape $Q_{fg}(d)$, corresponde al calor sensible transportado por los gases de escape producto de la combustión, que son evacuados de forma controlada del horno a una temperatura de salida $T_{fg} = 350$ °C, a diferencia de las pérdidas térmicas, constituye un flujo energético definido y cuantificable.

$$Q_{fg}(d) = V_{GN}(d) * (m_{fg} * Cp_{fg} * (T_{fg} - T_{amb})) \quad (16)$$

Donde: m_{fg} corresponden a la masa específica y Cp_{fg} al calor específico másico promedio de los gases de combustión. Estos parámetros se determinaron a partir de una combustión estequiométrica del gas natural, asumido como metano (CH_4) con un exceso de aire del 30 % ($\lambda=1,3$).

Finalmente, el consumo diario de gas natural, expresado como volumen a condiciones normales, se obtiene despejando el volumen de gas natural a partir del balance de energía química diaria de la ecuación 12, en términos del calor útil y las variables conocidas:

$$V_{GN}(d) = \frac{Q_{util}(d)}{PCI_{GN}(1 - f_{perd}) - (m_{fg} * Cp_{fg} * (T_{fg} - T_{amb}))} \quad (17)$$

A partir del balance térmico diario, la eficiencia térmica del quemador se define como la fracción del calor de combustión disponible que es efectivamente transferida como calor útil al proceso:

$$n_{th} = \frac{Q_{util}(d)}{Q_{comb}(d)} \quad (18)$$

Subfunción *modelo_exergetico_planta.m*: Específica el análisis exergetico del horno de pirólisis, considerado el equipo principal del sistema y como volumen de control, siguiendo la metodología de análisis de exergía para sistemas termoenergéticos propuesta por Dincer y Rosen (2013). Esta subfunción permite cuantificar la exergía de entrada y salida asociada al proceso, estimar las pérdidas exergeticas y evaluar la eficiencia exergetica del horno bajo las condiciones de operación seleccionadas conforme a las ecuaciones (19) a (22). Se adoptó como estado muerto el ambiente de referencia, a temperatura ambiente $T_{amb} = 298 K$ (25 °C) y una presión de 1 atmosfera, condiciones bajo las cuales se asume equilibrio térmico.

La exergía total anual de entrada al horno: $Ex_{in,anual}$, se definió como la suma de las contribuciones exergeticas de las corrientes de entrada: exergía química del gas natural: $Ex_{ch,GN,anual}$, a la exergía química de la biomasa seca alimentada al horno: $Ex_{ch,bio,anual}$, y a la exergía asociada al consumo eléctrico auxiliar: $Ex_{elec,anual}$, considerada directamente como trabajo útil.

$$Ex_{in,anual} = Ex_{ch,GN,anual} + Ex_{ch,bio,anual} + Ex_{elec,anual} \quad (19)$$

La exergía total anual de salida se contabilizó como la suma de la exergía química contenida en los productos de pirólisis y la exergía física asociada a la temperatura de los productos de pirolisis y de los gases de combustión evacuados:

$$Ex_{out,anual} = Ex_{ch,BC,anual} + Ex_{ch,liq,anual} + Ex_{ch,gas,anual} + Ex_{ph,fg,anual} + Ex_{ph,prod,anual} \quad (20)$$

La exergía destruida, asociada a las irreversibilidades internas del horno, se estimó a partir del balance exergetico global como:

$$Ex_{D,anual} = Ex_{in,anual} - Ex_{out,anual} \quad (21)$$

La eficiencia exergética del horno se definió como la fracción de la exergía total de entrada que se conserva en forma de exergía química útil de los productos de pirólisis:

$$n_{ex} = \frac{Ex_{ch,BC,anual} + Ex_{ch,liq,anual} + Ex_{ch,gas,anual}}{Ex_{in,anual}} \quad (22)$$

la exergía química de combustibles y productos puede aproximarse a partir de su energía química mediante el uso del poder calorífico inferior (LHV/PCI) y un factor adimensional β el cual corrige la diferencia entre energía y exergía, (Dincer & Rosen, 2013) según las ecuaciones (23) y (24).

$$ex_{ch} = LHV * \beta \quad [MJ/kg] \quad (23)$$

Siguiendo el desarrollo presentado por Dincer y Rosen (2013), y asumiendo flujos a presión constante, calor específico constante y un estado muerto definido por el ambiente de referencia, la exergía física de los productos de pirolisis y los gases de combustión, se expresa mediante la aproximación calorimétrica:

$$ex_{ph} = Cp * \left[(T - T_{amb}) - T_{amb} \ln \left(\frac{T}{T_{amb}} \right) \right] \quad [MJ/kg] \quad (24)$$

Una vez obtenidas las exergías específicas, estas se escalaron a base anual multiplicando por las masas o volúmenes anuales correspondientes, obtenidas del balance másico del sistema:

$$Ex_{i,anual} = ex_i * m_{i,anual} \quad [MJ \text{ al año}] \quad (25)$$

Subfunción *modelo_economico_planta.m*: Emplea los resultados del balance de masas, del modelo energético para evaluar la viabilidad financiera del sistema, calculando ingresos, costos operativos energéticos y los principales indicadores económicos, los cuales son analizados en el desarrollo del Objetivo Específico 3.

3.4 Viabilidad económica del sistema de producción de biocarbón

La metodología del Objetivo Específico 3 se orientó a evaluar la viabilidad técnica–económica del sistema de producción de biocarbón propuesto, integrando los resultados del Objetivo Específico 2. El análisis se realizó a nivel de prefactibilidad, considerando condiciones de operación y un horizonte de evaluación de 15 años ($a=15$) y empleando criterios de ingeniería económica siguiendo los lineamientos de la Metodología General Ajustada (MGA) para proyectos de inversión pública en Colombia (DNP.2023). Todos los análisis económicos se desarrollaron en dólares estadounidenses (USD), empleando la tasa representativa de cambio promedio del 2025 de 1 USD = 4 000 COP, con el fin de facilitar la comparación con referencias técnicas y estudios similares.

3.4.1 Distribución de planta y dimensionamiento de áreas

La distribución de planta se definió a partir de la capacidad de diseño del sistema y de la secuencia operativa establecida en los objetivos técnicos previos. Inicialmente, se identificaron las zonas funcionales del proceso y los flujos de material y circulación interna. El lote fue modelado como un rectángulo y subdividido en franjas longitudinales correspondientes al acceso y control, el área operativa cubierta y el patio de secado. Se consideraron niveles escalonados para aprovechar la topografía del terreno y favorecer el flujo por gravedad del material, reduciendo la manipulación mecánica. Para cada equipo se definió un área operativa que incluyó la huella del equipo y los espacios mínimos requeridos para operación, mantenimiento y circulación.

Finalmente, se cuantificaron las áreas parciales y se determinó el área total requerida, incorporando franjas de seguridad y control perimetral.

3.4.2 Evaluación de la inversión inicial CAPEX

La evaluación del Capital Expenditure (CAPEX) se realizó con el objetivo de estimar la inversión inicial necesaria para la implementación del sistema de producción de biocarbón, considerando una capacidad de diseño de 8 toneladas semanales y escenarios de ampliación sin inversiones adicionales. Diferenciando los costos asociados a los equipos del proceso y aquellos relacionados con la infraestructura física de la planta establecidos por el gobierno nacional en el documento de proyecto tipo para la construcción de una estación de clasificación y aprovechamiento de residuos sólidos (DNP, 2021).

El CAPEX se estructuró en seis bloques principales (A–F):

Bloque A: Equipos principales del proceso.

Bloque B: Infraestructura y obras civiles.

Bloque C- Administración: Incluye los costos asociados a la gestión del proyecto, dirección técnica, administración contractual y apoyo administrativo requerido durante la ejecución. En este estudio se adoptó un valor del 22 %, aplicado sobre el CAPEX directo, en concordancia con rangos reportados para proyectos de infraestructura pública.

Bloque D- Imprevistos: Corresponde a una provisión destinada a cubrir variaciones menores en precios, ajustes constructivos y eventualidades propias de la etapa de ejecución. Se adoptó un valor conservador del 1 % sobre el CAPEX directo.

Bloque E- Utilidad: Representa la utilidad asociada a la ejecución de la obra civil, fijada en un 5 % del CAPEX directo, coherente con prácticas estándar en presupuestos de obra pública.

La suma de los bloques C, D y E conforma el Subtotal AIU, el cual, adicionado al CAPEX directo, da lugar al Costo total de Obra Civil.

Bloque F- Interventoría: Incluye los costos de supervisión técnica, administrativa y financiera del proyecto, requeridos para garantizar el cumplimiento de las especificaciones y la correcta ejecución contractual. Se adoptó un valor del 7 %, aplicado sobre el Costo total de Obra Civil.

3.4.3 Evaluación de los costos de operación OPEX

El Operational Expenditure (OPEX) corresponde a los costos recurrentes asociados a la operación del sistema, incluyendo el consumo de energía y combustibles, la mano de obra, el mantenimiento de equipos y otros costos operativos necesarios para garantizar la continuidad del proceso productivo. La estimación del OPEX se realizó mediante un enfoque incremental. En primer lugar, se definió un escenario base correspondiente al primer año de operación, a partir del cual se proyectaron los costos a lo largo del horizonte de evaluación mediante tasas de crecimiento anual para los principales componentes variables.

OPEX: El costo operativo anual se define como la suma de los costos de energía y los costos fijos de operación conforme a las ecuaciones (26) a (29).

$$OPEX_a = OPEX_{energía,a} + OPEX_{fijo,a} \quad (26)$$

Los Costos de energía: provienen directamente del modelo energético anual, multiplicado por el precio asociado (P) y considerando un factor de incremento anual (g).

$$OPEX_{energía,a} = E_{elec,a} P_{elec,a} + L_{diesel,a} P_{diesel,a} + V_{GN,a} P_{GN,a} \quad (27)$$

Precios de energía año 1 (2026):

$$P_{elec,1} = 0,2 \text{ USD}/kWh \ ; \ P_{diesel,1} = 0,7 \text{ USD}/L \ ; \ P_{GN,1} = 0,5 \text{ USD}/m^3;$$

$$g_{elec} = 0,05 \ ; \ g_{diesel} = 0,05 \ ; \ g_{GN} = 0,05$$

Costos fijos: se asume el costo de la mano de obra de 5 trabajadores (3 operarios + 1 administrativo + 1 jefe de planta) a base de 1 SMMLV a 2026 con recargo de prestaciones y aumento anual:

$$Sal_1 = 650 \text{ USD/mes} ; N_{trab} = 5 ; g_{sal} = 0,06$$

$$OPEX_{MO,a} = Sal_1 * N_{trab} * 12 \tag{28}$$

Mantenimiento y repuestos: 4% de valor equipos: $C_{mantto} = 5\,310 \text{ USD/año}$

Insumos y materiales: 1% del CAPEX: $f_{ins} = 0,01$

Otros gastos operativos: 1% del OPEX total $f_{otros} = 0,01$

$$OPEX_{fijo,n} = OPEX_{MO,n} + C_{mantto} + C_{ins} + C_{otros} \tag{29}$$

Ingresos anuales: ingresos por venta de biocarbón (0,625 kg), y los ahorros asociados a la disposición evitada de residuos orgánicos (30 USD por tonelada de residuos), considerando un factor de incremento anual(g). $g_{biocarbon} = 0,03 ; g_{ahorro} = 0,03$

Usando la ecuación (30), se obtiene la actualización de precios con crecimiento anual para cualquier precio (P) definido en el año 1:

$$P_a = P_1 (1 + g)^{(a-1)} \tag{30}$$

3.4.4 Análisis de viabilidad económica

La viabilidad económica del sistema se evaluó mediante un análisis de flujos de caja descontados, con el objetivo de determinar la capacidad del proyecto para recuperar la inversión inicial y generar valor económico durante su vida útil. El análisis se desarrolló para un horizonte de 15 años, considerando como flujo negativo inicial el CAPEX total y, para cada año de operación, los ingresos por venta de biocarbón valorados a 0,625 USD por kilogramo (25 USD/bulto de 40 kg), y los ahorros asociados a la disposición evitada de residuos orgánicos 30 USD/ tonelada de residuos (Núñez, A. 2023), menos los costos operativos anuales. Los flujos de caja se construyeron considerando criterios de crecimiento de la producción, y una tasa de

descuento del 9 % anual (DNP.2023). A partir de los flujos netos anuales se calcularon los principales indicadores financieros, incluyendo el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el periodo de recuperación simple y descontado, y el Costo Mínimo de Venta (CMV) (Baca Urbina, 2015) de acuerdo con las ecuaciones (31) a (36).

Flujo de caja: se define año a año para todo el horizonte del proyecto ($a=15$)

$$CF_a = Ingresos_a - OPEX_a \text{ para } a \geq 1; \text{ para } a = 0 \rightarrow CF_0 = -CAPEX \quad (31)$$

Valor Presente Neto (VPN): donde (r) es la tasa de descuento (9%).

$$VPN = \sum_{a=0}^{15} \frac{CF_a}{(1+r)^a} \quad (32)$$

Tasa Interna de Retorno (TIR): Corresponde a la tasa (r) que satisface:

$$\sum_{a=0}^{15} \frac{CF_a}{(1+r)^a} = 0 \quad (33)$$

Payback simple: Se define como el primer año en el que el acumulado no es negativo

$$\sum_{a=0}^{15} CF_a \geq 0 \quad (34)$$

Payback descontado: Se define como el primer año en el que el acumulado no es negativo sobre el acumulado descontado

$$\sum_{a=0}^{15} CF_{a,desc} \geq 0 \quad ; \quad CF_{a,desc} = \frac{CF_a}{(1+r)^a} \quad (35)$$

Precio mínimo de venta: precio mínimo para cubrir OPEX en valor presente:

$$PV_{min,bulto} = \frac{PV_{OPEX} - PV_{ahorro}}{PV_{bultos}} \quad (36)$$

$$PV_{OPEX} = \sum_{a=1}^{15} \frac{OPEX_a}{(1+r)^a} \quad ; \quad PV_{ahorro} = \sum_{a=1}^{15} \frac{I_{ahorro,a}}{(1+r)^a} \quad ; \quad PV_{bultos} = \sum_{a=1}^{15} \frac{N_{bultos,a}}{(1+r)^a}$$

El proyecto es económicamente viable cuando el VPN es positivo, la TIR supera la tasa de descuento establecida y el payback se ubica dentro del horizonte de evaluación. Estos indicadores

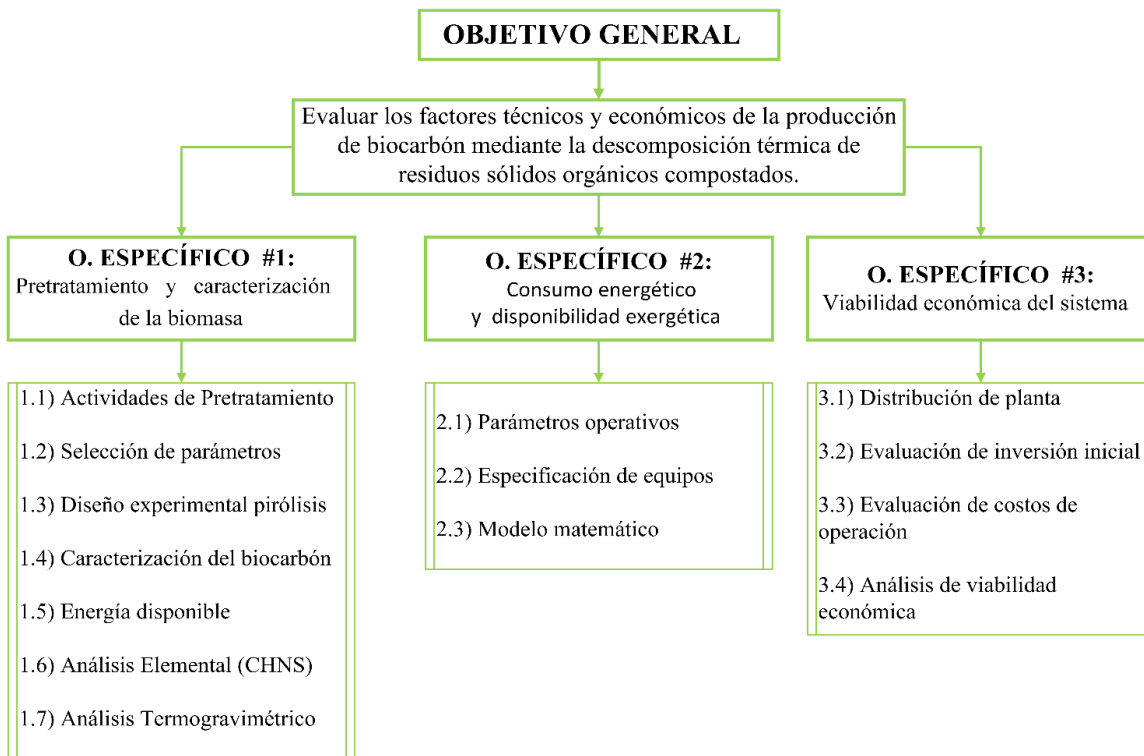
se integran en una subfunción *modelo_economico_planta.m* desarrollada en MATLAB, lo que permite analizar de forma sistemática diferentes escenarios de operación, evaluar cambios de escala y realizar comparaciones económicas consistentes bajo un mismo marco de cálculo.

3.5 Resumen de Actividades

En la Figura 2 se resume el flujo de actividades diseñado para alcanzar cada uno de los objetivos propuestos. El siguiente capítulo, se exponen los resultados derivados de esta ruta metodológica, los cuales sustentan el cumplimiento del objetivo general de la investigación.

Figura 2

Flujograma de resumen de actividades.



4. Resultados.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la ejecución de las actividades asociadas a cada uno de los objetivos específicos de la investigación. Los resultados

se organizan de forma secuencial, siguiendo la estructura metodológica definida previamente, con el fin de mantener la trazabilidad entre las actividades desarrolladas y los resultados obtenidos.

4.1 Resultados Pretratamiento y caracterización de la biomasa

Se presentan los resultados correspondientes al Objetivo Específico 1, que incluyen los pretratamientos aplicados a la biomasa, las actividades de caracterización orientadas a identificar las condiciones más favorables para la producción de biocarbón y la caracterización del biocarbón obtenido mediante análisis de laboratorio, permitiendo evaluar su comportamiento físico, químico y energético.

4.1.1 Resultados de Actividades de Pretratamiento:

Secado solar de la biomasa: Se evaluó la pérdida de masa durante el secado solar con el fin de reducir la humedad superficial del material y analizar su comportamiento bajo condiciones ambientales. La Tabla 3 presenta los porcentajes de pérdida de masa registrados para cada muestra.

Tabla 3

Porcentaje de pérdida de masa por secado solar

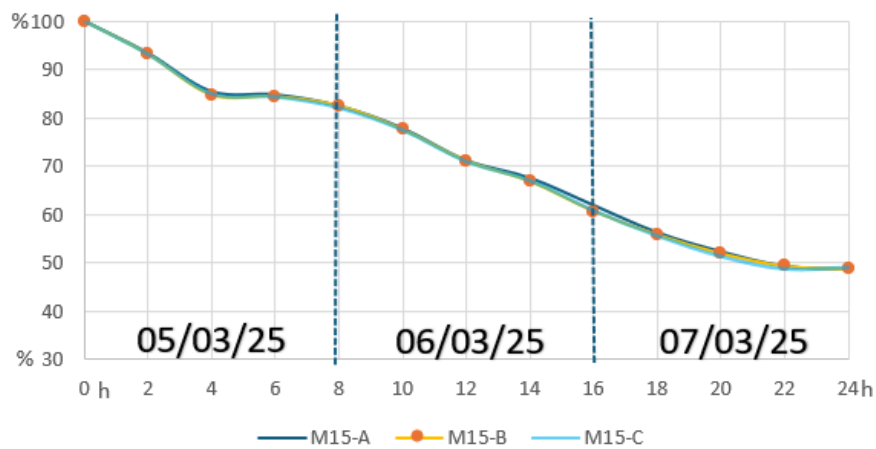
Muestra	% Día 1	% Día 2	% Día 3	%Total
M 0	19,20	21,98	12,21	53,39
M 15	17,67	21,15	12,33	51,15
M 30	19,92	15,27	6,64	41,83
M 45	19,48	13,83	8,07	41,39
M 60	27,17	17,05	10,44	48,66

Por su parte, la Figura 3 muestra el perfil de pérdida de masa durante 3 días de secado solar de la muestra correspondiente a 15 días de compostaje (M15), evaluada mediante tres réplicas experimentales (A, B y C), las réplicas evidencian una respuesta homogénea del material frente al proceso de secado. En las últimas horas del ensayo, la pérdida de masa fue inferior al 3 %, indicando que el sistema alcanza un estado cercano al estacionario, Según la revisión de Tun y

Juchelková (2019), el secado solar aplicado a residuos sólidos municipales reporta, en promedio, una reducción de humedad de $85 \pm 10 \%$, que representa una reducción de masa de $35 \pm 6 \%$, comportamiento consistente con los resultados promedio en este trabajo con una pérdida de masa de $47 \pm 6 \%$ y reducción de humedad de $88 \pm 6 \%$ (Tabla 5), el mayor rendimiento podría atribuirse al pretratamiento del molino triturador que transforma los residuos orgánicos en una biomasa de textura más homogénea y facilita estos procesos de pérdida de peso.

Figura 3

Perfil de pérdida de masa durante el secado solar



Nota. El eje x representa las horas efectivas de secado por jornada (8 h/día), correspondientes a tres días consecutivos de experimento (24 h acumuladas).

En conjunto, los resultados del secado solar evidencian que, tras aproximadamente tres días de exposición a condiciones ambientales, la biomasa reduce de manera efectiva su humedad superficial y que con un ciclo completo de pretratamiento (secado, trituración y tamizado) se obtiene un material con características físicas adecuadas para su posterior tratamiento térmico, definiendo un proceso previo eficiente para los ensayos de caracterización y pirólisis.

El tamaño de partícula: Los resultados del tamizado de la biomasa pulverizada se presentan en la Tabla 4 con un 62 % de la muestra correspondiente a tamaños de partícula mayores

a 1,4 mm, valor adoptado como diámetro de partícula promedio representativo. En un escenario de operación real, el material de mayor tamaño podría reincorporarse al proceso de pulverización.

Tabla 4

Distribución del tamaño de partícula de la biomasa M15 pulverizada

Tamaño de partícula	Porcentaje de muestra (%)
$P > 1,4 \text{ mm}$	62
$1,4 \text{ mm} \geq P \geq 500 \text{ }\mu\text{m}$	30
$P < 500 \text{ }\mu\text{m}$	8

Densidad del lecho: Se le realizaron dos ensayos experimentales de lecho fijo a la biomasa pulverizada, utilizando recipientes de geometría diferente. En el primer ensayo, la biomasa se dispuso sin compactación en un vaso precipitado de laboratorio, llenado hasta un volumen de 20 mL (20 cm^3), se obtuvo una densidad de lecho de $0,456 \text{ g/cm}^3$. En el segundo ensayo, se utilizó una caja Petri, el volumen útil del recipiente corresponde a $27,49 \text{ cm}^3$, y se obtuvo densidad de lecho de $0,433 \text{ g/cm}^3$. La densidad del lecho se estimó como el promedio de ambas mediciones, obteniéndose un valor de: $\rho = 0,445 \text{ g/cm}^3$

Este valor es representativo de una biomasa orgánica compostada secada y pulverizada, siendo un parámetro usado para el análisis de manejo de sólidos, y estimaciones volumétricas en etapas posteriores del estudio. valor consistente con rangos reportados para compost orgánico ($0,420 - 0,655 \text{ g/cm}^3$) medidos mediante ensayos volumétricos (Khater, 2011).

4.1.2 Resultados de la selección de parámetros técnicos de la muestra

La Tabla 5 presenta los resultados de la caracterización físico-química de las muestras de residuos sólidos orgánicos compostados correspondientes a 0, 15, 30, 45 y 60 días de proceso, expresados en base seca, además se agrega los resultados de otros trabajos con RSO para la

comparación y validación de los porcentajes de humedad, materia volátil, material inorgánico (cenizas) y carbono fijo.

Tabla 5

Caracterización de los residuos sólidos orgánicos compostados

Referencia	MUESTRA	%H	Base seca		
			%ASH	%Volátil	CF
Este trabajo	M0	21,4	20,5	72,7	6,8
	M15	10,3	29,3	64,6	6,0
	M30	9,3	34,6	61,0	4,4
	M45	9,2	35,3	60,3	4,4
	M60	9,1	38,9	57,1	4,0
Ortiz Ochoa, 2023	RSU	68,9	19,5	77,4	3,1
Ortiz M, y Velandia R 2018	RSA	74,2	2,3	80,1	16,9

Nota. RSU: Residuos Sólidos Urbanos ; RSA: Residuos Sólidos de Alimentos.

Las biomasas analizadas en este trabajo presentan un alto contenido de materia volátil, característico de materiales de residuos orgánico, compatibles a resultados presentados en otros trabajos. Los valores de volátiles se encuentran en un rango aproximado entre 72 % y 57 %, observándose una disminución progresiva a medida que aumenta el tiempo de compostaje, asociada a la degradación gradual de los compuestos orgánicos más fácilmente biodegradables. De forma complementaria, el contenido de material inorgánico muestra una tendencia creciente, con valores de cenizas que aumentan aproximadamente entre 20 % y 40 %, debido a la concentración de componentes minerales no reactivos durante el proceso de compostaje, observado también en los RSU. El contenido de carbono fijo presenta valores relativamente bajos respecto a los RSA, con porcentajes comprendidos aproximadamente entre 4 % y 7 %, más cercanos a los valores de RSU. En cuanto al contenido de humedad, la muestra correspondiente a 0 días de compostaje (M0) presenta un valor mayor, cercano al 21 %, mientras que las muestras con 15, 30, 45 y 60 días muestran valores estabilizados en un rango entre 9 % y 10 %, asociado a

los procesos de volteo realizados durante el compostaje. Estos valores están por debajo de los resultados de literatura para RSA y RSU, debido a la incorporación de los pretratamientos en este estudio, esta reducción de humedad resulta favorable al disminuir la energía requerida en los procesos térmicos. Siguiendo los criterios establecidos se seleccionó la muestra correspondiente a 15 días de compostaje (M15) como la más adecuada para el tratamiento térmico posterior, al combinar un tiempo de compostaje reducido con un contenido de humedad estabilizado y fracciones representativas de materia orgánica y cenizas, constituyendo un equilibrio entre madurez del material y viabilidad operativa.

4.1.3 Resultados del diseño experimental de pirólisis a escala de laboratorio

Los resultados del diseño experimental de pirólisis se presentan en la Tabla 6, que incluye los ensayos correspondientes a la primera y segunda ronda experimental, reportando los porcentajes de las fracciones sólida, líquida y gaseosa obtenidas para cada condición de operación.

Los resultados evidencian una disminución progresiva de la fracción sólida con el aumento de la temperatura de operación y el tiempo de retención, con valores que oscilan aproximadamente entre el 88 % y el 40 % de masa remanente. Este comportamiento se asocia a una mayor descomposición térmica de la biomasa y de sus principales constituyentes (hemicelulosa y, en menor medida, celulosa y, lignina), lo que favorece la formación de productos volátiles y condensables a medida que aumenta la severidad térmica del proceso (Basu, 2010). De forma complementaria, la fracción líquida presenta una tendencia creciente con la temperatura, alcanzando valores cercanos al 43 % a temperaturas elevadas, mientras que a temperaturas más bajas se registran valores del orden del 11 %. La fracción gaseosa, estimada por diferencia de masas, con valores aproximados entre 1 % y 19 %, muestra una tendencia general al aumento con la temperatura, aunque con mayor incertidumbre asociada a su medición indirecta.

Comportamientos similares han sido reportados en estudios de torrefacción de residuos agroindustriales, donde el incremento de la temperatura de tratamiento desde 220 hasta 300 °C conduce a una reducción del rendimiento sólido desde valores del orden de 80-40 %, acompañada de un aumento de la fracción líquida desde rangos cercanos al 3-35 %, y de la fracción gaseosa 16-23 % (Duranay & Çaycı, 2019).

Tabla 6

Resultados del diseño experimental de pirólisis

Diseño Experimental de Pirolisis 1				
Temp °C	tiempo (min)	%Sólido	%Líquido	%Gases
250	30	61,45	30,02	8,53
250	60	59,72	28,85	11,44
250	90	57,67	30,42	11,91
300	30	54,59	35,48	9,93
300	60	52,48	35,75	11,77
300	90	51,49	31,21	17,29
350	30	42,72	41,64	15,64
350	60	40,66	41,19	18,16
350	90	40,42	43,22	16,36
Diseño Experimental de Pirolisis 2				
Temp °C	tiempo (min)	%Sólido	%Líquido	%Gases
175	30	87,56	11,40	1,05
200	30	77,48	15,73	6,80
225	30	70,35	16,60	13,05
275	30	55,83	32,19	11,98

El análisis de los ensayos realizados a diferentes tiempos de retención indica que la variación en la fracción sólida es inferior al 5 % al comparar tiempos entre 30 y 90 minutos, esta diferencia representa una reducción del rendimiento sólido limitada en relación con el incremento del consumo energético y del tiempo de ocupación del horno requerido para mantener la biomasa durante el doble o el triple del tiempo de tratamiento. Este comportamiento es consistente con estudios de torrefacción de biomasa lignocelulósica y residuos sólidos municipales, donde se

reporta que incrementos del tiempo de residencia más allá de 30 minutos generan reducciones mínimas del rendimiento sólido y mejoras limitadas en las propiedades energéticas del material, evidenciando rendimientos energético decrecientes con el aumento del tiempo de retención (Ivanovski et al., 2023).

Con base en estos resultados, se priorizaron tiempos de retención cortos, inferiores a 30 minutos, con el fin de reducir el consumo energético del proceso sin afectar la conversión del material. Este criterio fundamentó el planteamiento de la segunda ronda experimental, enfocada principalmente en el análisis del efecto de la temperatura, en coherencia con los requerimientos de eficiencia energética y velocidad de procesamiento para una eventual implementación del sistema a escala real.

4.1.4 Resultados de la caracterización del biocarbón

La Figura 4 presenta los resultados de la caracterización fisicoquímica del biocarbón obtenido bajo las diferentes condiciones de temperatura y tiempo de retención evaluadas. En la figura se muestra, mediante gráficos de barras, la composición en base seca correspondiente a materia volátil, material inorgánico (cenizas) y carbono fijo, mientras que el contenido de humedad de cada muestra se representa como una línea de tendencia con marcadores individuales.

Contenido de humedad: Se estabiliza en un rango entre 3,8 % y 2,4 %, observándose una ligera disminución con el incremento de la temperatura de tratamiento. Este comportamiento se asocia a la reducción de la higroscopicidad del material como resultado del proceso de descomposición térmica disminuyendo su capacidad de retención de humedad. (Basu, 2010).

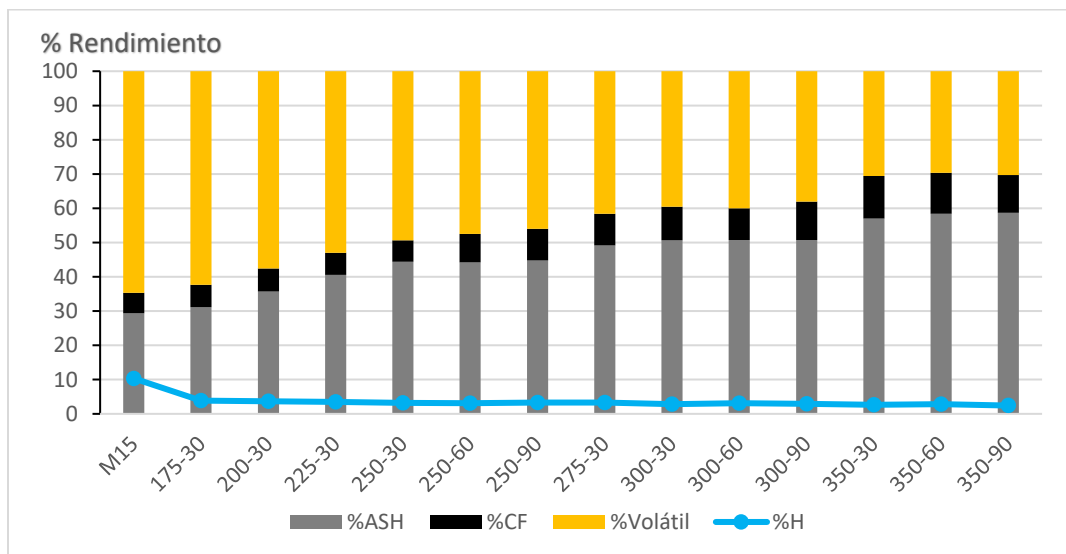
Contenido de material inorgánico (cenizas): presenta un incremento progresivo con la temperatura, pasando de valores cercanos al 30 % hasta aproximadamente 60 % reflejando la concentración relativa de la fracción mineral a medida que la materia orgánica se degrada.

Contenido de materia volátil muestra una tendencia opuesta, disminuyendo de valores cercanos al 63 % hasta aproximadamente 30 % con el aumento de la temperatura. Esta reducción es consistente con la ruptura térmica de compuestos orgánicos y la liberación de productos gaseosos y condensables durante la pirólisis.

Contenido de carbono fijo presenta valores comprendidos entre 6 % y 12 %, mostrando un aumento gradual con la temperatura de tratamiento, indica una mayor concentración de estructuras carbonosas estables en el sólido residual, característica deseable para la producción de biocarbón con mayor estabilidad térmica y potencial de aplicación energética o agrícola. (Lehmann & Joseph, 2015).

Figura 4

Resultados de la caracterización del biocarbón



Al comparar estos resultados con la caracterización del material en estado natural (M15), se observa una reducción promedio del contenido de humedad cercana al 70 %, una disminución promedio de la materia volátil del 32 % y un incremento promedio del contenido de cenizas del 60 % y de carbono fijo del 50 % tras el tratamiento térmico. Este comportamiento también es

descrito por Ortiz Ochoa (2023), donde torrefacto RSO generados en un campus universitario a temperaturas entre 240-300 °C y tiempos de 40-60 minutos evidencian cambios promedio similares respecto a la biomasa en estado natural, con una reducción del contenido de humedad del 90 %, una disminución de la materia volátil 30 %, y un incremento del contenido de cenizas del orden del 30 %, y del carbono fijo superior al 400 %.

Estos resultados confirman que la torrefacción es un tratamiento térmico adecuado para esta investigación, ya que mejora la estabilidad del material orgánico mediante la reducción de la humedad y la materia volátil, y la concentración de fracciones minerales y carbonosas.

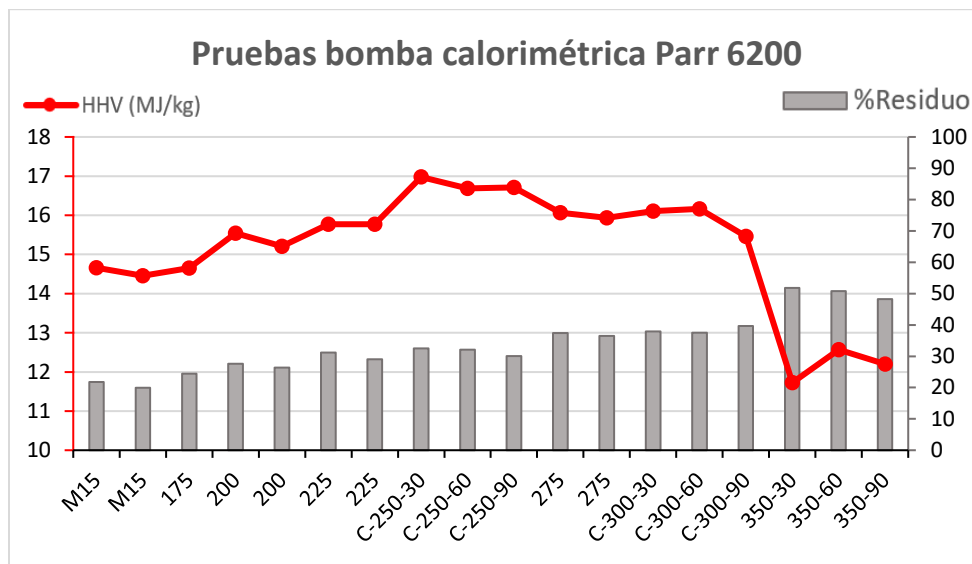
4.1.5 Resultados de la evaluación de la energía disponible

Los resultados de la evaluación de la energía disponible de las fracciones sólidas obtenidas en los experimentos de pirólisis se muestran en la Figura 5, donde se muestra en color rojo el comportamiento del poder calorífico superior en función de la temperatura, y en un gráfico de barras el porcentaje de residuos asociados a cada condición experimental.

Los valores de HHV obtenidos se encuentran en un rango aproximado entre 11,7 MJ/kg y 17 MJ/kg. En cuanto a los residuos se encuentran en un rango aproximado entre 21 % y 52 % en masa, aumentando con la temperatura de tratamiento térmico. Se asume que esta fracción corresponde a cenizas no reactivas, y pueden influir negativamente en los valores de HHV medidos. En estudios de torrefacción de residuos municipales entre 250-350 °C (Ivanovski et al., 2023). reportaron valores mayores de HHV en promedio 24,8 MJ/kg, para materiales con contenidos de cenizas del 7,5 %. La comparación directa evidencia que los menores valores de HHV obtenidos en este trabajo están asociados a un contenido inorgánico más elevado, lo que diluye el contenido energético específico del sólido, aun cuando se aplique un tratamiento térmico similar.

Figura 5

Resultados Poder Calorífico Superior de las fracciones sólidas



Los resultados muestran que el HHV del sólido tiene una alta sensibilidad a la temperatura de tratamiento y una dependencia secundaria del tiempo de retención. En el presente estudio, el incremento de la temperatura desde 175 hasta 250 °C conduce a un aumento acumulado del orden del 14 %, este comportamiento es consistente con la etapa de torrefacción, donde la desvolatilización parcial y la eliminación de compuestos oxigenados favorecen la concentración de energía en la fracción sólida (Basu 2010). El material alcanza su punto máximo en 250 °C con HHV=17 MJ/kg, luego presenta una estabilización y posterior disminución, con una reducción acumulada cercana al 27 % al incrementar la temperatura hasta 350 °C, esta caída coincide con un aumento del porcentaje de residuos, que llega al 50 % en masa, reflejando la concentración progresiva de la fracción mineral en el sólido. De acuerdo con Basu (2010), en procesos de torrefacción existe un límite óptimo de temperatura, a partir de la cual la concentración progresiva de la fracción mineral en el sólido reduce la fracción energéticamente aprovechable y limita el incremento del poder calorífico.

El análisis de muestras obtenidas a diferentes tiempos de retención muestra que, a 250 °C, el aumento del tiempo de residencia de 30 a 90 minutos produce variaciones inferiores al 2 % en el HHV, Este comportamiento es consistente con lo reportado por Ivanovski et al. (2023), donde el aumento del tiempo de torrefacción mejora la carbonización y el valor calorífico, pero la mejora en el HHV es menor en comparación con la pérdida de rendimiento energético, especialmente a temperaturas más altas.

Estos resultados son favorables para los objetivos de la investigación ya que confirman que operar temperaturas intermedias de 250 °C permiten maximizar el contenido energético del biocarbón, mientras que tratamientos térmicos más severos conducen a una degradación del potencial energético debido a la concentración de material inorgánico, y se establece que la temperatura es el parámetro dominante en la torrefacción y condiciona el rendimiento másico, la densidad energética y el poder calorífico del sólido (Ivanovski et al., 2023).

4.1.6 Síntesis de resultados y selección de condiciones de tratamiento térmico

Con base en los resultados experimentales obtenidos, se elaboró una tabla resumen de caracterización de productos (Tabla 7), en la cual se integran los principales parámetros fisicoquímicos del biocarbón, los rendimientos del proceso de pirólisis y las propiedades energéticas asociadas a cada condición de tratamiento térmico evaluada. El análisis conjunto de estos resultados indica que la condición de 250 °C presenta el balance más favorable entre rendimiento sólido, propiedades del biocarbón y energía disponible. A esta temperatura, se obtiene un rendimiento sólido de 59,6 %, líquido de 29,8 % y una fracción gaseosa estimada del 10,6 %. el biocarbón resultante presenta un contenido de humedad de 3,2 %, un 44,43 % de cenizas, 47,62 % de materia volátil y 7,96 % de carbono fijo, Los valores de poder calorífico alcanzan 16,79

MJ/kg (HHV) y 16,72 MJ/kg (LHV), siendo los más elevados dentro del rango de temperaturas evaluadas.

Tabla 7

Resumen de la caracterización de los productos

MUESTRA	Base seca				Rendimientos de Pirolisis			Energía		
	%H	%ASH	%Volátil	CF	solido	liquido	gases	HHV (MJ/kg)	LHV (MJ/kg)	Energía disponible MJ
M15	10,3	29,3	64,6	6,0	100,0	0,0	0,0	14,6	14,3	14,3
175	3,8	31,1	62,3	6,5	87,6	11,4	1,0	14,7	14,6	12,8
200	3,7	35,7	57,6	6,7	77,5	15,7	6,8	15,4	15,3	11,8
225	3,5	40,6	53,0	6,4	70,3	16,6	13,1	15,8	15,7	11,0
250	3,2	44,4	47,6	8,0	59,6	29,8	10,6	16,8	16,7	10,0
275	3,3	49,2	41,6	9,2	55,8	32,2	12,0	16,0	15,9	8,9
300	2,9	50,7	39,2	10,1	52,9	34,1	13,0	15,9	15,8	8,4
350	2,6	58,0	30,2	11,8	41,3	42,0	16,7	12,2	12,1	5,0

Nota. Los valores reportados para cada temperatura corresponden al promedio aritmético de las réplicas experimentales y de los diferentes tiempos de retención evaluados bajo esa misma condición térmica.

De manera complementaria, se estimó la energía útil disponible por kilogramo de biomasa en estado natural, considerando el rendimiento sólido del proceso y el LHV del biocarbón. Para la condición seleccionada, este valor fue de aproximadamente 10 MJ, evidenciando que una fracción significativa de la energía inicial del material se pierde durante la pirólisis en forma de productos volátiles y gaseosos.

En la Tabla 8 se comparan las propiedades del biocarbón obtenido en este estudio con valores reportados para biocarbones producidos a partir de residuos agroindustriales y municipales a 250 °C por 30 minutos, utilizando el carbón bituminoso como referencia de combustibles sólidos. Los resultados muestran que el biocarbón generado a partir de residuos orgánicos compostados

presenta un menor contenido de carbono fijo y se ubica fuera de los rangos típicos del carbón bituminoso, debido principalmente al alto contenido de cenizas, y la fracción residual de volátiles.

Tabla 8

Comparación de literatura para las propiedades del biocarbón

Resultado de caracterización por literatura		%H	%Volátil	%ASH	%CF	%Sólido	LHV (MJ/kg)	Energía disponible MJ
Este trabajo	RSO	10,3	64,6	29,3	6	100	14,3	14,3
	Biocarbon	3,2	47,6	44,6	8	60	16,7	10,0
Ivanovski 2023	RSM	12,1	78,1	3,1	6,9	100	21,1	21,1
	Biocarbon	9,0	76,0	6,8	7,8	80	22,2	17,8
Elhenawy 2024	Aserrín	6,7	73,4	5,2	14,7	100	16,7	16,7
	Biocarbon	1,1	21,6	12,6	64,2	60	21,8	13,1
ASTM Manual Series, MNL 57	Carbón	2-15	15-45	4-15	50-70	100	26-32	26-32

En este contexto, el biocarbón obtenido presenta el menor contenido de energía disponible por kilogramos de biomasa natural, por lo que no puede considerarse competitivo como combustible sólido de alta densidad energética; sin embargo, sus características lo posicionan de manera favorable para aplicaciones no energéticas, particularmente como mejorador de suelos, donde su contenido mineral resulta un atributo más relevantes que su poder calorífico. Lehmann y Joseph (2015) concluyen que biocarbones con alto contenido de cenizas presentan pH elevado, mayor alcalinidad, y un mayor aporte de bases intercambiables, asociado directamente con mejoras en la fertilidad del suelo, especialmente en suelos ácidos o degradados, donde la fracción mineral del biocarbón actúa como una fuente lenta de nutrientes (Ca, K, Mg y P), reforzando su funcionalidad como enmienda agrícola.

4.1.7 Resultados del análisis elemental (CHNS)

Se realizó el análisis elemental para dos muestras: biomasa natural (M15N) y biocarbón (M15B) a condiciones de tratamiento térmico seleccionadas (250 °C y tiempo de retención \leq 30 min). Los resultados promedio con desviación absoluta se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Resultados del análisis elemental (CHNS)

Muestra	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	Ash (%)
M15N (natural)	37,12 \pm 0,45	4,86 \pm 0,09	2,18* \pm 0,11	0,24* \pm 0,02	26,3	29,3
M15B (biocarbón)	37,45 \pm 1,00	3,34 \pm 0,08	2,24* \pm 0,08	0,24* \pm 0,03	12,33	44,4

Con el tratamiento térmico, el contenido de carbono se mantiene prácticamente constante entre ambas muestras, con un incremento cercano al 1 %, comportamiento que se atribuye al aumento del 52 % en el contenido de material inorgánico (cenizas), el cual diluye la fracción carbonosa expresada en base seca y limita incrementos significativos del %C, condición desfavorable para aplicaciones energéticas, ya que la fracción mineral no contribuye al poder calorífico del sólido. En contraste, el biocarbón presenta reducciones del 31 % en el contenido de hidrógeno y del 53 % en el contenido de oxígeno, asociadas a reacciones de deshidratación y desoxigenación, en las cuales ambos elementos se eliminan principalmente en forma de H₂O y CO₂, estos componentes no aportan energía útil al combustible, en particular el oxígeno, que diluye el contenido energético del sólido, por lo que favorece una mayor densidad energética del biocarbón, característica propia de procesos de torrefacción (Basu, 2010).

Para evaluar del grado de transformación termoquímica y la clasificación como combustibles de los productos obtenidos en procesos térmicos, se emplean indicadores como las

relaciones atómicas H/C y O/C. En la Tabla 10 se presenta las relaciones atómicas obtenidas en este trabajo con valores reportados en la literatura, como continuación del análisis comparativo previamente desarrollado en la Tabla 8

Tabla 10

Comparación de relaciones atómicas, con la literatura.

Autor	Material	% Carbón	O/C	H/C
Este trabajo	RSO	37,12	0,53	1,57
	Biocarbon	37,45	0,25	1,07
Ivanovski 2023	RSM	43,20	0,83	2,25
	Biocarbon	48,11	0,68	1,80
Elhenawy 2024	Aserrín	40,3	0,99	1,60
	Biocarbon	64,4	0,37	0,56
ASTM Manual Series, MNL 57	Carbón bituminoso	65-80	0,04-0,12	0,7-1,1

La comparación de las relaciones atómicas O/C muestra que, en este trabajo, la torrefacción conduce a una disminución del 53 % de dicha relación respecto a la biomasa original, valor comparable con las reducciones reportadas por Ivanovski et al. (2023) (≈ 18 %) y Elhenawy et al. (2024) (≈ 63 %) para residuos sometidos a tratamientos térmicos similares. Esta reducción resulta favorable desde el punto de vista energético, dado que un O/C más bajo se asocia a mayores valores de poder calorífico. De manera análoga, la relación H/C en este estudio presenta una reducción del 32 %, coherente con el comportamiento observado en la literatura (≈ 20 % y ≈ 65 %, respectivamente), reflejando una disminución del contenido de compuestos volátiles y líquidos característicos de biomasa torrefactada. No obstante, los valores de O/C del biocarbón obtenido permanecen por encima del límite superior del carbón bituminoso (0,12) en más de un 100 %, lo que indica que, pese a la mejora inducida por la torrefacción, no se alcanza un nivel de carbonización que lo haga competitivo como combustible sólido de alta densidad energética. En

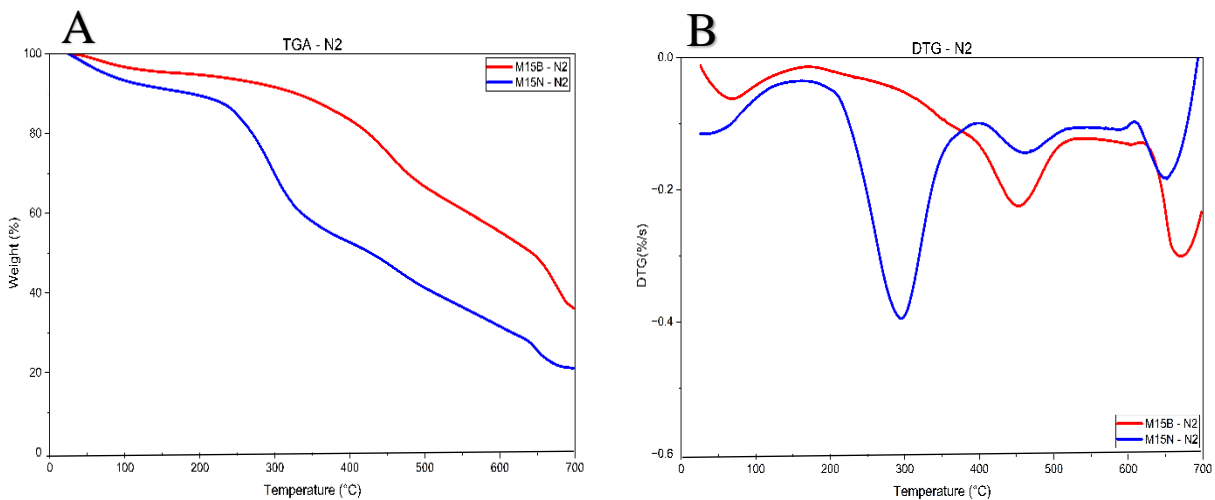
contraste para usos agrícolas la disminución de las relaciones H/C y O/C, se asocia con un material más estable en el suelo, con menor degradación biológica y mayor permanencia de sus efectos en el tiempo, además de favorecer propiedades como la capacidad de intercambio catiónico y el efecto encalante (Rueda et al., 2026).

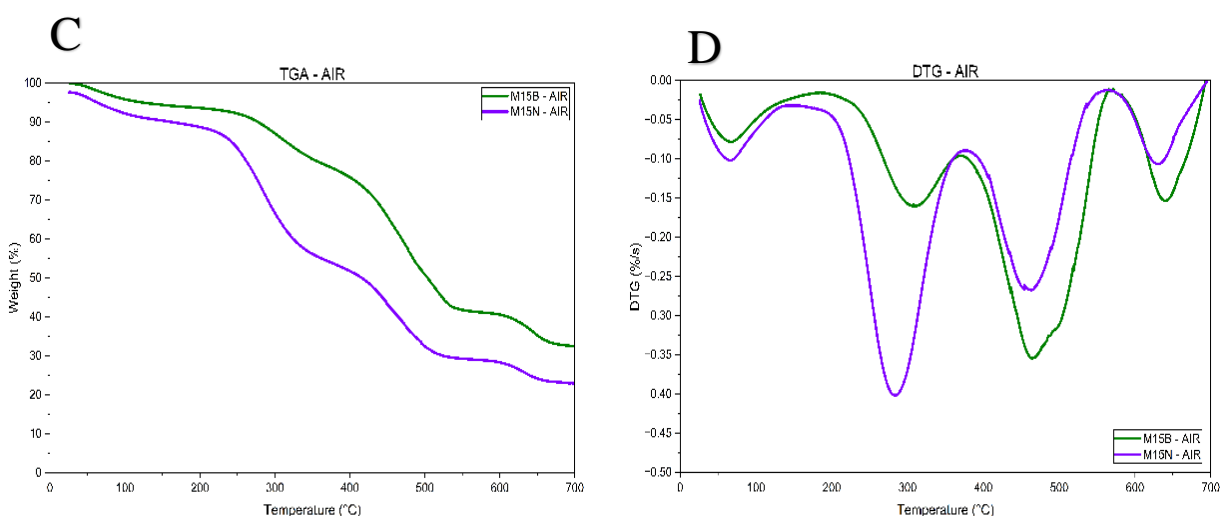
4.1.8 Resultados del análisis Termogravimétrico (TGA)

Curvas TG/DTG 25–700 °C: La Figura 6 muestra la representación gráfica de la descomposición térmica (TG/DTG) de la biomasa natural (M15N) y biocarbón (M15B: 250 °C y tiempo de retención ≤ 30 min), y en la Tabla 11 se resume la pérdida de masa por intervalos de temperatura y el residuo final a 700 °C.

Figura 6

Descomposición térmica de M15 TG/DTG (25–700 °C, 10 °C/min)





Nota. Curvas TG (izquierda) y DTG (derecha) a 10 °C/min: (A) TG: M15N y M15B en N₂, (B) DTG: M15N y M15B en N₂, (C) TG: M15N y M15B en aire, (D) DTG: M15N y M15B en aire.

Para facilitar la discusión se agruparon los cambios de masa en tres intervalos: 25–150 °C (humedad y compuestos de baja masa molecular), 150–400 °C (desvolatilización/descomposición principal de la fracción orgánica) y 400–700 °C (transformaciones de alta temperatura). El punto Tp1 corresponde a la temperatura del primer pico principal de la DTG (máxima tasa de pérdida de masa asociada a la desvolatilización), mientras que el punto Tp2 corresponde a la temperatura del segundo pico de la DTG a mayor temperatura (asociado a la degradación/oxidación de la fracción más estable, dependiendo de si la atmósfera es N₂ o Aire).

Tabla 11

Pérdida de masa por intervalos de temperatura

Muestra	Atmósfera	ΔW 25–150 (%)	ΔW 150–400 (%)	ΔW 400–700 (%)	W 700 (%)	Tp1 (°C)	Tp2 (°C)
M15N	Aire	7,28	38,64	28,81	23,00	285	461
M15B	Aire	5,54	18,58	43,38	32,51	309	466
M15N	N ₂	8,88	38,56	31,57	21,14	294	473
M15B	N ₂	4,56	11,97	47,25	36,21	No definido	452

Nota. ΔW corresponde a la pérdida de masa (en puntos porcentuales) dentro de cada intervalo de temperatura. W_{700} es el residuo a 700 °C. Tp_1 corresponde al pico principal de la DTG en 150–400 °C (si existe un máximo definido) y Tp_2 al pico dominante en 400–550 °C.

En el rango de 25–150 °C se observa una pérdida de masa moderada, pendiente inicial en TG (Fig. 6A y 6C) y el pequeño evento en DTG a bajas temperaturas (Fig. 6B y 6D), asociada principalmente a evaporación de agua libre y parte del agua ligada. Además, pueden liberarse compuestos volátiles de baja masa molecular (“compuestos ligeros”). En residuos orgánicos en etapas tempranas de compostaje, estos pueden incluir extractivos y metabolitos de baja estabilidad como ácidos orgánicos (ácidos grasos volátiles), alcoholes y otros compuestos fácilmente volatilizables o descomponibles a baja temperatura (Díaz et al., 2021).

La etapa principal (150–400 °C) concentra la mayor pérdida de masa en M15N en ambas atmósferas (≈ 38 –39 %, Tabla 11) evidenciado por el descenso más pronunciado en TG (Fig. 6A y 6C) y por un pico DTG definido (Tp_1 , Fig. 6B y 6D) y se asocia a la descomposición de la fracción orgánica. En biomasa lignocelulósica, este rango suele cubrir (i) hemicelulosa (200–315 °C) y (ii) celulosa (315–400 °C), mientras que la lignina aporta una degradación más amplia y solapada. En materiales compostados, también contribuyen fracciones húmicas, que tienden a degradarse de forma gradual en un rango amplio (Yang et al., 2007; Blanco & Almendros, 1994; El Ouaqoudi et al., 2014). En el DTG, Tp_1 para M15N aparece alrededor de 285–294 °C (Tabla 11, Fig. 6B), en línea con la zona de máxima desvolatilización asociada a hemicelulosa/celulosa y otros orgánicos termolábiles.

En M15B (aire, Fig. 6D) Tp_1 se desplaza hacia 309 °C y el pico es menos intenso, lo que sugiere un material más estabilizado por el tratamiento a 250 °C (menor fracción termolábil) (Yang et al., 2007; Chen et al., 2013). En N_2 , M15B no muestra un Tp_1 claramente definido dentro de

150–400 °C (Tabla 11, Fig. 6B), lo cual es consistente con su menor contenido de volátiles y con una desvolatilización más gradual (pico ancho o hombro) (Chen et al., 2013; Wang et al., 2013).

En 400–700 °C, la interpretación depende de la atmósfera. En N₂, esta zona refleja carbonización secundaria y degradación lenta de componentes más resistentes (lignina/sustancias húmicas), por lo que aparece un segundo evento (Tp2) entre 452–473 °C (Tabla 11, Fig. 6B). En aire, además de esas transformaciones, ocurre oxidación del material carbonoso, lo que intensifica la pérdida de masa a temperaturas medias-altas; esto explica la mayor ΔW 400–700 °C de M15B en aire (Tabla 11, Fig. 6C y 6D) (Yang et al., 2007; Díaz et al., 2021). El “tercer evento” o incremento de tasa a temperaturas altas en M15N (más visible como hombro) puede asociarse a la heterogeneidad del residuo compostado: solapamiento de degradación de lignina/sustancias húmicas y oxidación gradual del material carbonoso. En M15B, al haberse removido parte de la fracción más reactiva durante el tratamiento a 250 °C, algunos eventos de baja-intermedia temperatura se atenúan y la DTG se simplifica (Barneto et al., 2010; El Ouqaoudi et al., 2014).

En coherencia con análisis próximo, las tendencias son consistentes. M15B tiene más cenizas y menos volátiles (Tabla 7), por lo que (i) pierde menos masa en 150–400 °C y (ii) deja mayor residuo final (W700) que M15N. No obstante, W700 no debe interpretarse como “cenizas” directamente, porque en la base de reporte y la atmósfera influyen en cuánto carbono fijo permanece u oxida, y porque algunas fases inorgánicas pueden descomponerse o volatilizarse parcialmente durante el calentamiento (ASTM International, 2020; Díaz et al., 2021).

Curvas Isotermas a 250 °C (60 min): Durante la isoterma, En M15N, la pérdida de masa continúa de forma apreciable a lo largo de los 60 minutos, siendo más pronunciada en aire que en N₂. En aire, la masa disminuye un 17,21 %, mientras que en atmósfera inerte la pérdida se reduce a 12,12 % (Tabla 12). En la Figura 6, esta diferencia se refleja en una pendiente más pronunciada

de la curva en aire, lo que es consistente con un régimen de torrefacción oxidativa, donde la presencia de oxígeno a temperaturas del orden de 200–300 °C favorece reacciones de descomposición acelerada y oxidación parcial del material orgánico, incrementando la liberación de volátiles y la pérdida de masa respecto a condiciones estrictamente inertes (Chen et al., 2013; Wang et al., 2013; Soria-Verdugo et al., 2022).

En contraste, M15B en N₂ presenta una pérdida de masa significativamente menor (2,12 %; Tabla 12), y una curva prácticamente estable en la Figura 7. Este comportamiento confirma que el tratamiento térmico previo a 250 °C eliminó gran parte de los compuestos volátiles responsables de la pérdida de masa en este rango de temperatura, dando lugar a un sólido más estabilizado frente a exposiciones isotérmicas prolongadas (Chen et al., 2013).

Tabla 12

Pérdida de masa etapa isotérmica

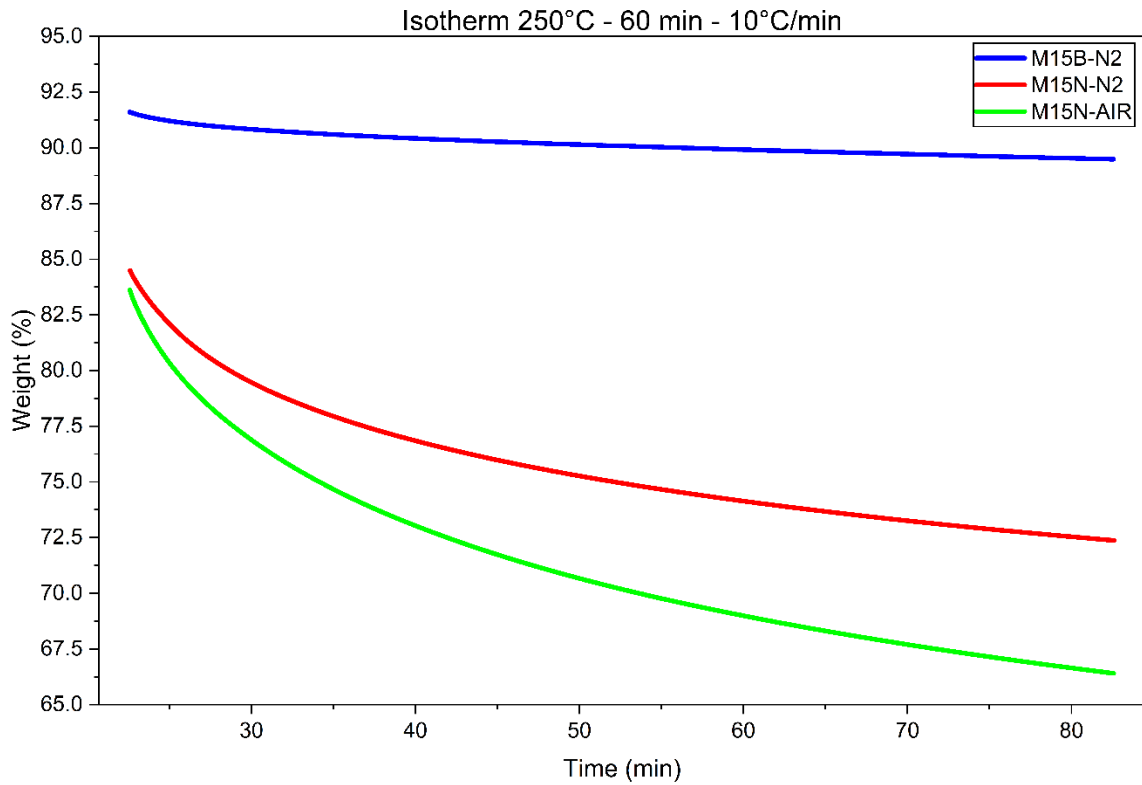
Muestra	Atmósfera	W inicio (%)	W final (%)	ΔW (%)
M15N	Aire	83,61	66,41	17,21
M15N	N ₂	84,49	72,37	12,12
M15B	N ₂	91,61	89,49	2,12

Nota. W inicio y W final corresponden al porcentaje de masa registrado al comienzo y al final de la etapa isotérmica.

Estos resultados son favorables para la investigación, ya que no solo respaldan la selección de 250 °C como condición operativa, sino que además caracterizan el biocarbón como un material térmicamente más estable, información clave para anticipar su desempeño en etapas posteriores de manejo, almacenamiento o integración en otros procesos térmicos y no energéticos

Figura 7

Isoterma a 250 °C durante 60 minutos



Nota. comparación de la pérdida de masa en M15N (aire y N₂) y M15B (N₂).

4.2 Resultados del análisis energético y exergético del sistema.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo del Objetivo Específico 2, los cuales incluyen las actividades complementarias para la obtención de parámetros operativos reales del sistema, la especificación y evaluación de los equipos que conforman el proceso de producción de biocarbón, y los resultados del análisis energético y exergético del sistema. Estos resultados permiten cuantificar el consumo energético y evaluar el desempeño termodinámico del proceso bajo las condiciones de operación seleccionadas anteriormente.

4.2.1 Resultados Información técnica y parámetros operativos

Densidad del material recién triturado: En una canastilla que simula la operación de las cabas de compostaje se recolecto material orgánico recién triturado bajo condiciones representativas de operación, realizando un seguimiento durante 15 días, monitoreando la variación de masa, la generación de lixiviados y la reducción volumétrica del lecho. Durante los primeros cuatro días, la masa del material disminuyó de 14,96 kg a 12,63 kg, con una generación acumulada de 150 ml de lixiviado. Al día 15, la masa final registrada fue de 6,75 kg, sin presencia visible de lixiviados y con una altura efectiva del lecho de 0,13 m. En conjunto, estos resultados corresponden a una pérdida de masa cercana al 55 % y una reducción de volumen aproximada del 20 %. A partir de estas mediciones se determinaron las densidades de lecho como se muestra en la Tabla 13. El proceso de trituración genera un incremento notable en la densidad de lecho inicial, alcanzando un valor cercano a 940 kg/m³, prácticamente el doble del valor típico de residuos orgánicos sin procesar de 500 kg/m³ (González Pérez, 2024). Esta condición refleja una mejora significativa en la eficiencia de almacenamiento y manejo del material, reduciendo el volumen específico de aproximadamente 2,0 m³/t a 1,06 m³/t.

Tabla 13

Densidades aparentes de la Biomasa

Estado del material	Densidad (kg/m³)	Volumen específico (m³/t)	Observaciones
RSO (sin triturar)	500	2,00	Estado inicial fresco antes de ingresar al molino. (González Pérez, 2024)
Biomasa triturada (día 0)	940	1,06	Material recién triturado, húmedo y compacto.
Biomasa triturada (día 15)	450	2,22	Material suelto parcialmente seco.

Con el avance del proceso y la pérdida progresiva de humedad, la masa disminuye a una mayor tasa que el volumen, lo que conduce a una estabilización de la densidad de lecho de 450

kg/m³. Este rango es coherente con valores reportados para compost orgánico entre 420– 660 kg/m³ (Khater, 2011) y se adopta como referencia para el diseño del sistema de compostaje y secado. En esta etapa, el volumen específico aumenta nuevamente hasta valores cercanos a 2,2 m³/t, reflejando un material más suelto y menos compacto, condición favorable para la aireación y el secado posterior.

Resultados Identificación operativa y eléctrica del sistema actual: El proceso actual de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos sigue el diagrama de flujo que se ve en la Figura 8 las etapas del actual proceso se pueden ver en las fotografías del Apéndice B.

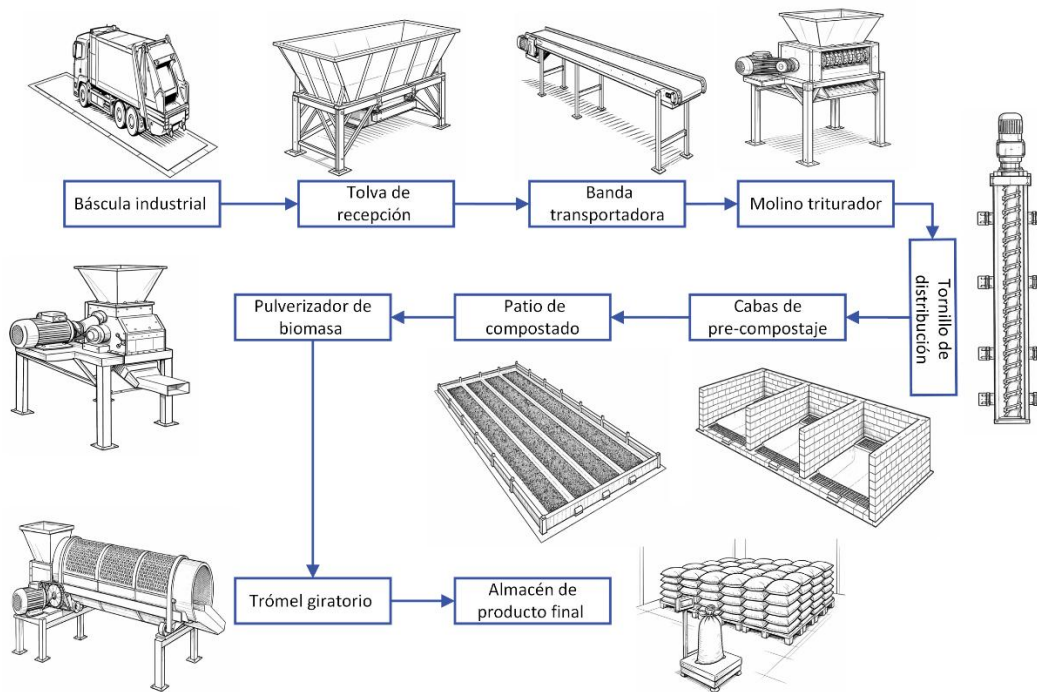
Inicia con la llegada del material en camión compactador, el cual es pesado en una báscula de piso y descargado en una tolva cerrada que permite el almacenamiento temporal y el escurrimiento inicial de lixiviados. Desde la tolva, los residuos son alimentados a una banda transportadora para su selección manual y posteriormente ingresan al molino triturador, donde se reduce el tamaño de partícula mediante un sistema de cuchillas accionado por un motor eléctrico. El material triturado es transportado por un tornillo sin fin hacia las cabas de precompostaje, completándose estas etapas el mismo día de la recepción.

Durante las visitas técnicas se registró una capacidad de procesamiento de aproximadamente 4 toneladas de residuos orgánicos por día, con un tiempo efectivo de operación cercano a 3 horas, periodo en el cual los equipos de recepción, selección, trituración y transporte operan de manera simultánea. La recepción de residuos se realiza de forma regular dos veces por semana, típicamente los días lunes y viernes. En las cabas de precompostaje, el material permanece alrededor de dos meses, favoreciendo el drenaje de lixiviados. Posteriormente, es trasladado al patio de compostaje cerrado, donde permanece entre dos y tres meses adicionales, etapa en la cual

se realizan labores periódicas de volteo e inoculación con microorganismos eficientes para promover la descomposición biológica y la reducción progresiva de la humedad.

Figura 8

Diagrama de Flujo del sistema actual



Una vez alcanzado el grado de maduración requerido, el material compostado es enviado al pulverizador, donde se obtiene un producto de granulometría fina. Este pasa por un sistema de tamizado que separa la fracción fina de la fracción gruesa, la cual es reincorporada al pulverizador. El material fino es finalmente empacado en sacos de aproximadamente 40 kg para su almacenamiento y comercialización. A esta etapa llegan cerca de 2 toneladas de residuo compostado por jornada, con un tiempo de operación cercano a 4 horas, alcanzando un rendimiento aproximado de 500 kg/h. Esta operación se realiza de forma intermitente, aproximadamente cada 15 días, debido a la necesidad de acumulación previa de material.

En conjunto, el tiempo total del proceso, desde la recepción del residuo hasta el empaque del producto final, se estima entre cuatro y seis meses. El sistema opera con una alimentación eléctrica trifásica a 220 V, suministrando energía a los motores eléctricos asociados a las distintas etapas del proceso. A partir del levantamiento de información realizado en planta, se identificaron los motores que accionan los equipos principales, cuyas especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14

Especificaciones técnicas de los motores eléctricos

Motor	Equipo	Potencia (kW)	Potencia (HP)	Corriente (A)	Velocidad (rpm)	Eficiencia (%)
M1	Banda transportadora	2,2	3	8,3	1 720	87,5
M2	Molino triturador	15	20	50,8	3 522	88,2
M3	Tornillo distribuidor	2,2	3	8,4	1 730	87,5
M4	Pulverizador	4	5,5	19,6	1 740	90
M5	Tamiz giratorio	2,2	3	8,3	1 720	87,5

Nota. Datos tomados de las placas características de los motores eléctricos instalados en la planta de aprovechamiento de residuos orgánicos del municipio de Oiba (Santander).

A partir de la información levantada y de los tiempos de operación registrados, se estimó un consumo eléctrico anual total del sistema actual cercano a 6 656 kWh/año. Los resultados evidencian que la etapa de recepción, transporte y trituración concentra la mayor parte del consumo energético, principalmente debido a la potencia instalada del molino triturador, el cual domina el balance eléctrico del proceso como se observa en la Tabla 15.

Al relacionar el consumo eléctrico anual con la cantidad de residuos orgánicos procesados en la etapa de recepción, estimada en 416 t/año, se obtiene un consumo específico aproximado de

16,0 kWh/t de residuo recibido. Este indicador proporciona una referencia energética del sistema actual y constituye una base para contrastar el desempeño del proceso existente con la propuesta de especificación y evaluación de equipos desarrollada en la actividad principal del Objetivo Específico 2.

Tabla 15

Consumo eléctrico anual total del sistema actual

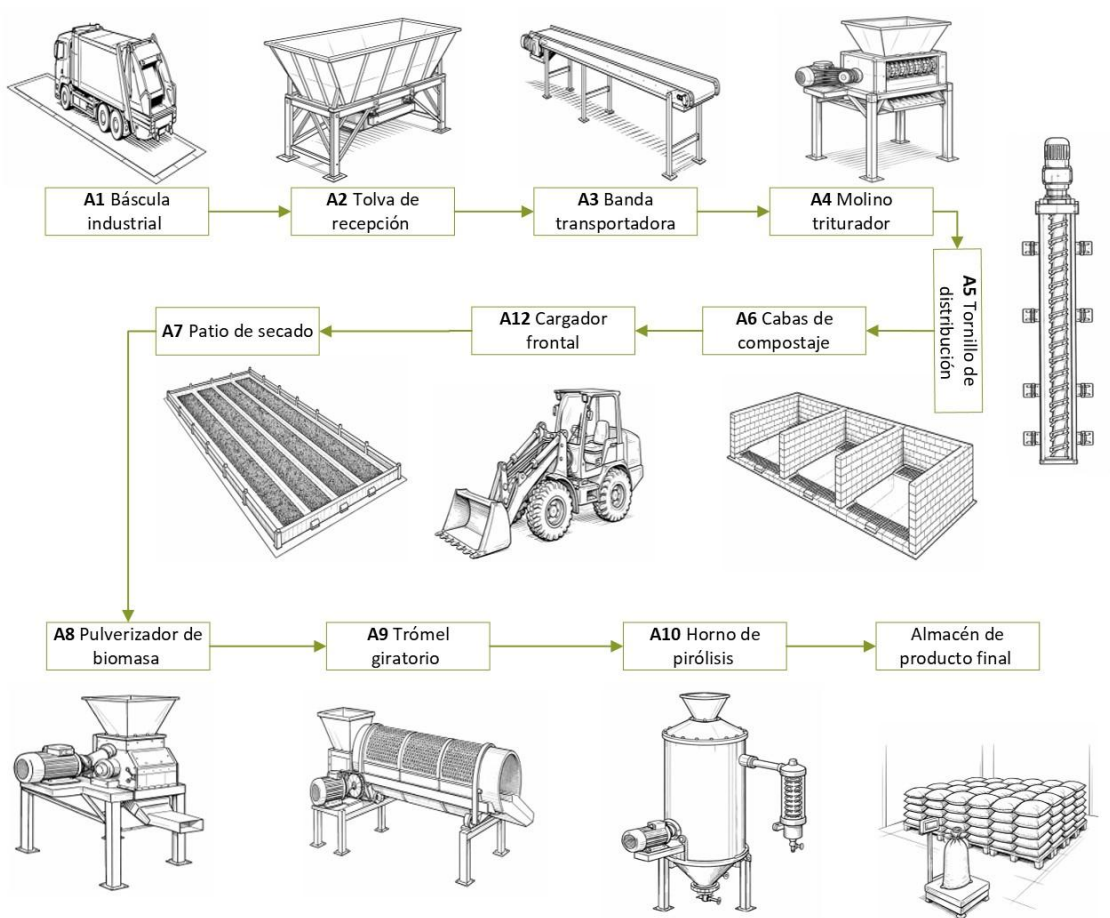
Equipo	Potencia (kW)	Rendimiento (kg/h)	Horas/año	Consumo (kWh/año)
Banda transportadora	2,2	1 333	312	686,4
Molino triturador	15	1 333	312	4 680
Tornillo distribuidor	2,2	1 333	312	686,4
Pulverizador	4	500	97,3	389,3
Tamiz giratorio	2,2	500	97,3	214,1
Total				6 656,3

4.2.2 Resultados Especificación y evaluación de equipos

Con base en los resultados obtenidos en el Objetivo Específico 1 y en el levantamiento de información del sistema actual, se definió un nuevo ciclo de operación para el sistema de producción de biocarbón, orientado a procesar 4 toneladas diarias de residuos sólidos orgánicos, para dos días de recepción a la semana. El sistema de producción propuesto mantiene las etapas iniciales de recepción, selección, trituración, distribución, y almacenamiento del sistema actual, pero se incorporan mejoras para las cabas de compostaje con sistema de drenaje donde el tiempo de retención se reduce a 3 días y luego los residuos pasan a un patio de secado solar con sistema retráctil de lona impermeable donde permanecen entre 3 y 4 días, hasta estar lista para pasar al pulverizado, tamizado previo a la alimentación del horno de pirólisis tipo Downdraft. Finalmente, se incorpora el cargador frontal agrícola para funciones de transporte y volteo de material. Los equipos propuestos se describen a continuación de forma general y se representan en la Figura 9:

Figura 9

Diagrama de Flujo del nuevo ciclo de operación.



Báscula industrial para pesaje de vehículos: Equipo de pesaje tipo camionera con plataforma metálica de huella lineal, diseñada para instalarse empotrada al nivel del suelo. Su función es registrar la masa total de los vehículos compactadores que ingresan con residuos orgánicos y los que salen con material procesado (biocarbón o compost), permitiendo un control preciso de la cantidad de residuos tratados y mejorando la trazabilidad del proceso productivo. Cuenta con celdas de carga de acero inoxidable, indicador digital de alta precisión, consola electrónica programable y sistema de pesaje con compensación automática. La estructura principal

está fabricada en acero estructural reforzado, con superficie antideslizante, resistente a la corrosión y adecuada para operación continua en ambientes industriales, incluye obra civil.

Tolva de recepción de residuos orgánicos: Tolva metálica de recepción con capacidad de 12 m³, equivalente a aproximadamente 5 toneladas de residuos orgánicos por descarga. Diseñada para recibir directamente el material proveniente del camión compactador, permitiendo su paso controlado hacia la banda transportadora. Fabricada en lámina HR de 3 mm, con estructura metálica reforzada en perfiles comerciales, garantiza resistencia al impacto y durabilidad en ambientes húmedos. Incorpora una compuerta tipo guillotina para apertura y cierre del flujo, así como una malla de drenaje que permite el desagüe previo antes del transporte del material.

Banda transportadora de selección manual: Sistema de transporte continuo de 10 m de longitud y 0,6 m de ancho, que permite la clasificación y separación manual de los residuos antes de la trituración, Desechando elementos no orgánicos bolsas, y elementos fibrosos largos que se puedan enredar en el molino triturador. Construida con estructura metálica reforzada en perfil cuadrado comercial y banda sintética de alta resistencia, cuenta con rodillos de acero galvanizado y accionamiento mediante motor eléctrico de 3 HP con reductor de velocidad.

Molino triturador de orgánicos: Equipo destinado a la reducción del tamaño de los residuos orgánicos húmedos, mediante un sistema de cuchillas móviles y fijas alojadas en una cámara de trituración con salida inferior regulable. Permite homogeneizar la textura del material antes del compostaje, favoreciendo un secado más uniforme y eficiente del residuo orgánico. Fabricado en lámina de acero estructural ASTM A36 de ¼ pulgada, con recubrimiento anticorrosivo industrial, cuenta con un motor eléctrico trifásico de 20 HP, 220 V, que transmite potencia al eje principal mediante un sistema de correas en V de tres canales. El conjunto utiliza una polea pequeña en el motor y una polea mayor en el eje de las cuchillas, logrando una reducción

aproximada de velocidad de 1:3, por lo que el rotor de corte opera alrededor de 1200 rpm, velocidad adecuada para trituración de biomasa húmeda. Posee una capacidad de procesamiento de aproximadamente 1 tonelada por hora, acorde al volumen diario de residuos tratados en la planta.

Tornillo sinfín distribuidor: Transportador helicoidal de 9 metros de longitud, encargado de distribuir el material triturado hacia las composteras. Accionado por un motor eléctrico trifásico de 3 HP, 220 V, a 1800 rpm, con reductor de velocidad que permite una rotación del tornillo de 60 rpm, ajustable para mantener la capacidad de 1 tonelada por hora del molino triturador. El sinfín de 8 pulgadas (200 mm) de diámetro, fabricado en acero galvanizado, cuenta con camisa en lámina HR que garantiza el confinamiento del material y un flujo uniforme. Incluye estructura metálica de anclaje, soporte con rodamientos sellados y sistema de distribución de 6 salidas con compuertas que permiten alimentar simultáneamente dos composteras según las aberturas de descarga.

Cabas de compostaje: Estructuras en mampostería de ladrillo H15, con acabado interior en cemento (frisado), diseñadas para el escurrimiento de lixiviados de la biomasa triturada durante su estabilización inicial. Dimensiones útiles: 2,3 m (ancho) \times 2,7 m (largo) \times 1,0 m (pared), para un volumen útil por caba de 3,1 m³ y un total de 6 cabas simétricas. Cada unidad cuenta con una malla metálica galvanizada que separa la biomasa del sistema de drenaje inferior, evitando taponamientos y acumulación de líquido. El drenaje se realiza por gravedad, mediante un piso con pendiente del 2% al punto de drenaje en tubería colectora de PVC de 3 pulgadas, conectada a un pozo de lixiviados.

Patio de secado solar: Está diseñado para operar con un sistema de secado rápido mediante capas delgadas de biomasa (\approx 0,15 m), priorizando la evaporación superficial y la rotación del material. El caso crítico considera una carga simultánea de 9,6 tonelada por lote, correspondiente

a dos jornadas semanales con un factor de ampliación del 20%. Para una densidad de 500 kg/m³, el volumen a secar alcanza 19,2 m³, lo que requiere un área útil de 128 m² para mantener la altura de diseño. Con unas dimensiones de 16 m × 8 m destinado a la exposición del material, se asegura una operación continua y eficiente, compatible con el manejo mediante minicargador frontal y con el objetivo de reducir los tiempos de secado tras el escurrimiento en cabas.

Sistema retráctil de lona impermeable (patio de secado): Sistema de cubrimiento retráctil, accionada por winch o manivela acoplada al tubo enrollador que gira y desenrolla una lona de PVC-poliéster impermeable. El borde delantero, unido a un marco tubular con forma de techo a dos aguas (Λ), se desplaza sobre ruedas guiadas por rieles laterales embebidos en el piso y un riel central (0,5-1 m) que mantiene la alineación y estabilidad del movimiento, este es guiado por un operario. A medida que avanza, la lona se tensa entre el eje enrollador y el marco frontal, generando una superficie inclinada que permite que el agua escurra hacia las cunetas laterales. Durante la recogida, el winch enrolla nuevamente la lona, arrastrando el marco de regreso a la zona de resguardo, quedando lista para el siguiente ciclo de operación. Diseñado para permitir la exposición a condiciones natural del material en secado y la operación libre del minicargador.

Pulverizador de biomasa: Equipo destinado a la trituración fina de biomasa previamente secada, con el fin de obtener una granulometría uniforme antes del tamizado o la carbonización. El proceso reduce la biomasa hasta un tamaño promedio inferior a 3 mm, utiliza un sistema de cuchillas móviles y fijas alojadas en una cámara de trituración cerrada, impulsadas por un motor eléctrico de 5,5 HP. Equipo compacto de operación continua, fabricado en acero al carbono con recubrimiento anticorrosivo, diseñado para trabajo en seco y bajo mantenimiento. Posee una tolva de alimentación superior y una salida inferior regulable, que permite controlar el flujo de material, el cual está conectado directamente a la tolva de entrada del trómel giratorio.

Trómel o Tamiz giratorio: Equipo rotativo utilizado para la clasificación y separación granulométrica del material pulverizado o compostado. Consiste en un cilindro perforado de acero al carbono, recubierto con malla metálica intercambiable (2–3 mm) que permite separar las partículas finas del material grueso o no descompuesto. El tambor, de 0,8 m de diámetro y 2,0 m de longitud útil, se monta sobre rodillos de apoyo y gira mediante un motor eléctrico de 3 HP, con transmisión por cadena y sistema tensor ajustable. Incluye una tolva de alimentación superior de 1,0 m de largo, un canal de descarga inferior, y salida lateral para desechos o partículas grandes, garantizando flujo continuo del material. El equipo completo alcanza una longitud total de 3,0 m y se apoya sobre una estructura metálica tubular reforzada, que proporciona estabilidad y reduce vibraciones durante la operación. El diseño cerrado disminuye la emisión de polvo y facilita el mantenimiento preventivo.

Horno de pirólisis (reactor de biocarbón tipo Downdraft): Equipo térmico principal del proceso, diseñado para la descomposición térmica controlada de biomasa seca bajo atmósfera limitada en oxígeno, mediante un sistema de calentamiento indirecto, con un rango operativo entre 150–600 °C, manejando tiempos de residencia alrededor de 30 minutos. El reactor propuesto es de tipo Downdraft, conformado por una cámara interna de acero inoxidable con base cónica truncada calefactada, donde la energía proviene de un quemador de gas natural ubicado en la parte inferior central. La llama caliente directamente la superficie metálica del cono, sin contacto con la biomasa, transmitiendo el calor por conducción. El conjunto incluye un tubo de escape axial que atraviesa la tolva y permite evacuar los gases del quemador y el aire del soplador, manteniendo la combustión estable y evitando la acumulación de gases inertes.

La tolva superior, también de forma cónica, guía el material hacia el centro del reactor, asegurando una distribución uniforme sobre la superficie caliente. Durante la operación, la

biomasa se desliza por gravedad desde el centro hacia la periferia del cono, donde un sistema giratorio de paletas realiza la descarga continua del biocarbón hacia la zona de salida inferior.

La cámara de combustión en su diámetro exterior este compuesto por un cilindro en lámina de acero inoxidable, luego una capa intermedia de aislante refractario y una camisa metálica exterior estructural, que proporcionan rigidez, retención térmica y seguridad operativa

El equipo presenta una altura total aproximada de 2,5 m (incluyendo tolva), diámetro exterior de 2,0 m, y una cámara interna útil de 1,2 m de altura. Se soporta sobre una estructura metálica, que facilita la estabilidad, el aislamiento del suelo y las operaciones de mantenimiento. Cuenta además con salidas laterales para gases y condensables, que se conducen hacia un sistema de condensación y filtrado para la recuperación de fracciones líquidas y la depuración del gas residual.

Cargador frontal agrícola: Equipo compacto de tracción 4x4, utilizado para el transporte interno de biomasa, el volteo del material en cabas y el traslado del biocarbón hacia el área de almacenamiento. Cuenta con motor diésel de 35-40 HP con tanque de 27 L y un consumo promedio 3-4 L/h en operación continua, sistema hidráulico de elevación con doble cilindro y transmisión mecánica de alta tracción. La pala frontal tiene una capacidad aproximada de 0,5 m³ y una longitud útil inferior a 2,7 m, adecuada para realizar operaciones dentro de las cabas sin colisionar con sus paredes laterales. El sistema de carga incluye articulación central, brazo basculante y cucharón de acero reforzado con borde cortante templado, apto para manipular biomasa húmeda o seca. El equipo posee estructura metálica reforzada en acero estructural, cabina semicerrada de protección ROPS y neumáticos de labranza profunda para mayor estabilidad y tracción en superficies irregulares.

Herramientas y utensilios de operación: Conjunto de equipos menores y utensilios destinados a las operaciones diarias de manipulación, control y empaque dentro de la planta. Incluye palas, rastrillos, carretillas, machetas, termómetros, bandejas de secado, bolsas y sacos de empaque, así como elementos de protección personal básicos para el personal operativo. Se incorpora además una báscula de piso digital con plataforma metálica de $1,0 \times 1,0$ m y capacidad de hasta 1 tonelada, utilizada para el pesaje de bultos, sacos o material empacado, complementando la trazabilidad del proceso y el control de producción.

4.2.3 Resultados Modelo matemático del sistema de producción de biocarbón

Balance de Masas: El modelo parte de una capacidad inicial de 8 t/semana (416 t/año), distribuida en dos días de recepción (lunes y viernes), que corresponden a la recolección de RSO municipal para una población aproximada de 11 600 habitantes (Maldonado Cárdenas, 2021). Durante los primeros nueve años se considera un crecimiento del 10% anual, que permite duplicar aproximadamente la capacidad inicial, entre los años 10 y 15 se asume un crecimiento moderado del 1% anual, asociado al aumento natural de la generación de residuos. Este factor de crecimiento permite evaluar la viabilidad del sistema a largo plazo, manteniendo la operación sin saturación y sin requerir ampliaciones o nuevas inversiones de CAPEX. se incorpora mediante un día flexible (miércoles), hasta igualar la carga entre los tres días de recepción, como se muestra en la Tabla 16. El enfoque resulta pertinente para plantas municipales como la de Oiba Santander, donde el crecimiento considerado se basa en la recepción de residuos provenientes de municipios cercanos, práctica que ya ocurre y que permite incrementar la utilización y la rentabilidad del sistema.

En total para los 15 años se reciben 11 190 toneladas de residuos orgánicos, que se procesan según el escenario de crecimiento planteado, recibiendo 18,3 toneladas de RSO en tres

días de recolección semanal para el año 15 de operación, lo que es equivalente a la generación de residuos orgánicos de una población de 26 308 habitantes aproximadamente.

Tabla 16

Factor de crecimiento y distribución semanal de residuos

Año	Factor	Lunes t/día	Miércoles t/día	Viernes t/día	Toneladas semanales	Toneladas anuales
1	1,00	4,0	0,0	4,0	8,0	416
2	1,10	4,0	0,8	4,0	8,8	458
3	1,21	4,0	1,7	4,0	9,7	503
4	1,33	4,0	2,6	4,0	10,6	554
5	1,46	4,0	3,7	4,0	11,7	609
6	1,61	4,3	4,3	4,3	12,9	670
7	1,77	4,7	4,7	4,7	14,2	737
8	1,95	5,2	5,2	5,2	15,6	811
9	2,14	5,7	5,7	5,7	17,1	892
10	2,17	5,8	5,8	5,8	17,3	901
11	2,19	5,8	5,8	5,8	17,5	910
12	2,21	5,9	5,9	5,9	17,7	919
13	2,23	5,9	5,9	5,9	17,8	928
14	2,25	6,0	6,0	6,0	18,0	937
15	2,28	6,1	6,1	6,1	18,3	947

En la Tolva de recepción se aplica un factor de escurrimiento del 2 %, asociado a la pérdida de humedad libre que se transforma en lixiviado, en la banda transportadora se aplica un factor de rechazo del 1 % en peso. Luego los residuos pasan al molino triturador donde solo cambian de forma y son distribuidos por el tornillo sin fin en las cabas de compostaje, ahí se generan 11,1 litros de lixiviados por tonelada húmeda, y tiene una reducción de peso de 15,6 % en los 3 días de retención, luego la biomasa pasa al patio de secado donde tiene una reducción del 35,6 % de la masa total de entra al patio, atribuida a la evaporación de la humedad superficial, mientras que la humedad interna del material se mantiene (10,3%), en este punto esta lista para pulverizar y tamizar donde no hay pérdida de masa, y entrar al horno de pirolisis donde a una temperatura de operación de 250 °C, presenta unos rendimientos de 59,6 % de sólidos, 29,8 % de líquidos y 10,6%

de gas , para luego ser empacado en bultos de 40 kg y depositados en el almacén para su venta final. La Tabla 17 presenta el balance de masas acumulado del sistema para los 15 años simulados.

Tabla 17

Balance de masas acumulado del sistema

Balance de masas total en 15 años	
Etapas del sistema de producción	Total
Total, recepción sumando días (toneladas)	11 190
Lixiviado total en tolva (A2) (Litros)	223 798
Rechazo total en banda (A3) (toneladas)	110
Masa total a la salida del tornillo (A5) (toneladas)	10 856
Masa total que sale de cabas (A6) (toneladas)	9 166
Lixiviado total en cabas (A6) (Litros)	120 806
Masa total que sale del patio (A7) (toneladas)	5 898
Masa total de Biocarbon (A10) (toneladas)	3 516
Número total de sacos de 40 kg	87 887
Líquidos de pirolisis (A10) (Litros)	1 757 749

Desde una perspectiva global, el sistema transforma cerca del 32% de la masa total de residuos recibidos en biocarbón, donde aproximadamente el 52% de la reducción de masa se genera en el pretratamiento por pérdida de humedad (asumiendo una densidad del lixiviado y de los líquidos de pirolisis cercana a la del agua 1 000 kg/m³).

El modelo permite visualizar la operación diaria del sistema en todo el horizonte de simulación; para evaluar la máxima carga se analizan los últimos días del año 15 que corresponde a los días: 5461-5475. La Tabla 18 muestra simultáneamente el comportamiento de las etapas críticas reportando la masa acumulada por pares de cabas de compostaje, la ocupación del patio, la biomasa que entra al horno por día, la producción diaria y tiempo de operación del horno.

Las cabas operan de forma alternada y alcanzan alrededor del 100% que corresponde al uso completo de la capacidad de diseño por cada par, manteniendo holgura operativa al no llenarse simultáneamente. El patio de secado, modelado con una altura de lote de 15 cm, presenta

ocupaciones del 43–86 %, confirmando que no es un cuello de botella y que, de ser necesario, podría aumentar la capacidad elevando la altura del material, el sistema permite más recepción o mayores días de retención de ser necesario en las cabas y el patio. El horno de pirólisis opera día por medio con jornadas de:6,4 h, en condiciones conservadoras, alejadas de una operación forzada y con capacidad disponible para mayores cargas.

Tabla 18

Operación diaria del sistema en condición de máxima carga (año 15)

Dia Global	Cabas de compostaje			Patio de Secado		Horno de Pirolisis		
	Caba 1-2 kg	Caba 3-4 kg	Caba 5-6 kg	Patio kg	Patio %	Biomasa Entrada kg	Biocarbon kg	Horas de trabajo
5 461	0	0	5 887	9 940	86	0	0	0
5 462	0	0	5 887	4 970	43	3 202	1 908	6,4
5 463	5 887	0	5 887	4 970	43	0	0	0
5 464	5 887	0	0	4 970	43	3 202	1 908	6,4
5 465	5 887	5 887	0	4 970	43	0	0	0
5 466	0	5 887	0	9 940	86	0	0	0
5 467	0	5 887	0	4 970	43	3 202	1 908	6,4
5 468	0	0	5 887	9 940	86	0	0	0
5 469	0	0	5 887	4 970	43	3 202	1 908	6,4
5 470	5 887	0	5 887	4 970	43	0	0	0
5 471	5 887	0	0	4 970	43	3 202	1 908	6,4
5 472	5 887	5 887	0	4 970	43	0	0	0
5 473	0	5 887	0	9 940	86	0	0	0
5 474	0	5 887	0	4 970	43	3 202	1 908	6,4
5 475	0	0	0	9 940	86	0	0	0

En conjunto, los resultados evidencian que ninguno de los sistemas críticos presenta saturación, incluso bajo el escenario de máxima producción del año 15 y que fácilmente podría empezar su operación en el caso de máxima carga (18 toneladas semanales) y seguir creciendo con el tiempo. La planta alcanza una producción aproximada de 1 908 Kg de Biocarbon por día de operación (47,7 bultos/día), comprobando que se mantiene un esquema operativo coherente, técnicamente viable y con potencial de crecimiento adicional sin requerir inversiones inmediatas en infraestructura.

Para las etapas de pretratamiento y manejo de materiales se incorporó un cargador frontal como equipo de apoyo, justificado por la necesidad de realizar movimientos recurrentes en escenarios de máxima producción. El modelo estima su utilización mediante un factor que combina jornadas de alta demanda (3 h/día) con periodos de operación reducida (1 h/día para apoyo y volteo). Esta aproximación cuantifica su pertinencia en la escala del sistema, evidenciando que el cargador reduce procesos manuales, mejora la seguridad operativa y aumenta la eficiencia a lo largo del período simulado. La Tabla 19 muestra los resultados de las horas de operación del cargador frontal.

Tabla 19

Horas de operación del cargador frontal

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Horas Cargador Semana	15	15	16	17	18	20	21	23	24	24	24	25	25	25	25
Horas Cargador Año	791	801	811	882	959	1043	1107	1176	1253	1262	1271	1279	1288	1297	1306

Balance de energía: La Tabla 20 presenta el consumo eléctrico anual de los equipos de la planta a lo largo del horizonte de 15 años. Este consumo se calcula a partir de las horas de operación de cada equipo y la potencia eléctrica efectiva, considerando las eficiencias de los motores. El incremento progresivo del consumo eléctrico responde directamente al crecimiento en la recepción y procesamiento de residuos, manteniendo una estructura proporcional entre equipos.

Un análisis porcentual del consumo eléctrico muestra que la mayor participación corresponde al motor del molino triturador (M2), con aproximadamente 52 % del consumo total, lo que confirma que la reducción de tamaño es la etapa más intensiva en energía eléctrica del

sistema. Le sigue el sistema de pulverización (M4), con cerca de 20 %. El equipo de tamizado (M5) representa alrededor de 11 %.

Los motores auxiliares M1 y M3 aportan conjuntamente cerca de 15 % del consumo, con participaciones individuales del orden de 7–8 %, vinculadas a operaciones de transporte y manejo del material. Finalmente, el consumo eléctrico del horno de pirólisis y sus equipos auxiliares es reducido, del orden de 2–3 %. En conjunto los resultados, muestran un aumento del 33 % en el consumo anual de energía eléctrica total del nuevo ciclo de operación con respecto del ciclo actual, debido al aumento de la frecuencia de uso del pulverizador y tamizado.

Tabla 20

Consumo eléctrico anual de los equipos de la planta

Año	Pretratamiento de secado				Pretratamiento Horno			Horno	
	Motor 1 kWh	Motor 2 kWh	Motor 3 kWh	Horas	Motor 4 kWh	Motor 5 kWh	Horas	Auxiliares kWh	Horas
1	769	5 148	761	303	1 933	1 093	435	242	435
2	846	5 663	837	333	2 143	1 212	482	268	482
3	930	6 229	921	366	2 357	1 333	530	295	530
4	1 023	6 852	1 013	403	2 593	1 467	583	324	583
5	1 126	7 537	1 114	443	2 852	1 613	642	357	642
6	1 238	8 291	1 226	488	3 139	1 776	706	392	706
7	1 362	9 120	1 348	536	3 453	1 953	777	432	777
8	1 498	10 032	1 483	590	3 798	2 149	855	475	855
9	1 648	11 035	1 632	649	4 178	2 364	940	522	940
10	1 664	11 146	1 648	655	4 224	2 390	950	528	950
11	1 681	11 257	1 664	662	4 266	2 414	960	533	960
12	1 698	11 370	1 681	669	4 309	2 438	970	539	970
13	1 715	11 484	1 698	675	4 352	2 462	979	544	979
14	1 732	11 598	1 715	682	4 396	2 487	989	549	989
15	1 749	11 714	1 732	689	4 440	2 512	999	555	999

El 83 % del consumo eléctrico de la planta está concentrado en las etapas de pretratamiento mecánico, mientras que el aporte eléctrico del horno es bajo. Esto resalta que las oportunidades de

mejora en eficiencia eléctrica deben enfocarse principalmente en el molino triturador y en las etapas de pulverización y clasificación.

La Tabla 21 presenta el requerimiento térmico del horno a 250 °C y 30 min de retención para el tratamiento de la biomasa anual que entra al reactor, la energía química liberada por la combustión del gas natural tiene un rendimiento de 367 kWh por tonelada de biomasa, de los cuales 248 kWh por tonelada son la energía útil que requiere el proceso de descomposición térmica la diferencia corresponden a dos contribuciones, una es la energía asociada al calor latente contenida en la salida de los gases de escape alrededor de 64 kWh por tonelada que podrían ser aprovechados y por otro lado a las pérdidas térmicas del horno 55 kWh por tonelada, que es calor que se disipa en el ambiente y las paredes del horno y son perdidas no aprovechables.

Tabla 21

Requerimiento térmico del horno a 250 °C y 30 min de retención

Año	Biomasa Entrada Horno (t)	Energía química GN (kWh/Anual)	Energía Útil (kWh/Anual)	Energía Gases escape (kWh/Anual)	Pérdidas térmicas (kWh/Anual)
1	217,41	79 861	53 933	13 949	11 979
2	241,05	88 545	59 798	15 466	13 282
3	265,16	97 400	65 778	17 012	14 610
4	291,67	107 140	72 355	18 714	16 071
5	320,84	117 850	79 591	20 585	17 678
6	353,08	129 700	87 589	22 653	19 454
7	388,44	142 690	96 361	24 922	21 403
8	427,29	156 960	106 000	27 415	23 543
9	470,02	172 650	116 600	30 156	25 898
10	475,21	174 560	117 890	30 489	26 184
11	479,96	176 300	119 060	30 794	26 446
12	484,76	178 070	120 250	31 102	26 710
13	489,61	179 850	121 460	31 413	26 977
14	494,51	181 650	122 670	31 727	27 247
15	499,45	183 460	123 900	32 045	27 519

Los resultados son coherentes a una eficiencia global del horno: 67,5 %, comparables pero inferiores con los trabajos experimentales de Rathod,2023, y Elhenawy,2024, con eficiencias

energéticas de 84% y 82% respectivamente. Tanto el calor útil y la energía química crecen proporcionalmente con la masa procesada, manteniendo constantes los indicadores específicos, lo que confirma un régimen térmico estable y una escala lineal del consumo energético.

La Tabla 22 consolida la producción anual de Biocarbon, y el consumo energético anual de la planta en sus 15 años de operación, diferenciando en electricidad, consumo de gas natural y consumo de diésel como bases para el cálculo del OPEX energético.

Tabla 22

Consolidado del consumo energético anual de la planta 15 años

Año	Producción Biocarbon (t)	Energía eléctrica (kWh)	Consumo Gas Natural (m³)	Consumo Diesel (Litros)	Consumo Energético Total (kWh)
1	129,6	9 945	7 986	2 372	113 290
2	143,7	10 968	8 854	2 402	121 720
3	158,0	12 065	9 740	2 433	133 550
4	173,8	13 272	10 714	2 645	146 600
5	191,2	14 599	11 785	2 878	160 950
6	210,4	16 061	12 970	3 130	176 740
7	231,5	17 668	14 269	3 320	193 220
8	254,7	19 435	15 696	3 529	211 330
9	280,1	21 379	17 265	3 759	231 240
10	283,2	21 600	17 456	3 786	233 640
11	286,1	21 816	17 630	3 812	235 860
12	288,9	22 034	17 807	3 838	238 100
13	291,8	22 254	17 985	3 864	240 360
14	294,7	22 477	18 165	3 890	242 640
15	297,7	22 702	18 346	3 917	244 940

La electricidad (kWh) representa el uso de equipos mecánicos y auxiliares. El gas natural (m³) corresponde al requerimiento térmico del horno, calculado a partir de la energía química del combustible dividido por un PCI de: 10 kWh/m³. El diésel (L) se asocia al cargador frontal, estimado con un consumo promedio de 3 L por hora de operación y un PCI de 9,9 kWh/L. El consumo energético total se expresa kWh por año y es la suma de las contribuciones energéticas individuales, para la cantidad de gas natural y diésel consumido, se multiplican por su PCI. En

conjunto, el comportamiento es coherente y escalable, lo que facilita su posterior integración al análisis económico y de desempeño del sistema.

La Tabla 23 resumen del modelo energético acumulado a 15 años permite identificar con claridad la estructura del consumo energético del sistema y su relación directa con la producción de biocarbón, bajo una temperatura de operación del horno de 250 °C y los rendimientos experimentales asociados a esta condición. En términos globales, la mayor participación corresponde al gas natural utilizado en el horno de pirólisis, que representa en promedio el 74 % de la energía total del sistema, coherente con la naturaleza térmica del proceso y con el rol dominante de la etapa de pirólisis. La energía eléctrica aporta cerca del 9 %, asociada principalmente a los equipos de pretratamiento mecánico (trituration, pulverización y tamizado), mientras que la energía química del diésel empleada por el cargador frontal representa alrededor del 17 % del consumo total.

Tabla 23

Resumen del modelo energético acumulado a 15 años

Modelo Energético Planta total en 15 años		Rendimiento por tonelada recibida	Rendimiento por kg de Biocarbon
Energía eléctrica total (kWh)	268 276	24,0 kWh / t	0,076 kWh / kg
Consumo total de Diesel (litros)	49 576	4,4 Litros / t	0,014 Litros / kg
Energía química total del Diesel (kWh)	489 224	43,7 kWh / t	0,139 kWh / kg
Consumo de Gas Natural total (m ³)	216 668	19,4 m ³ / t	0,062 m ³ / kg
Energía química total Gas Natural (kWh)	2 166 686	193,6 kWh / t	0,616 kWh / kg
Energía total (kWh)	2 924 186	261,3 kWh / t	0,832 kWh / kg

Al normalizar el requerimiento energético para aprovechar una tonelada de RSO recibidos, se requieren aproximadamente 261 kWh/t, de los cuales cerca de 194 kWh/t corresponden al consumo de gas natural, 44 kWh/t a la energía química asociada al diésel, y 24 kWh/t a energía eléctrica. Cuando los consumos se expresan por kilogramo de biocarbón producido, el requerimiento energético total es del orden de 0,83 kWh/kg, manteniendo la misma proporción

relativa entre las fuentes energéticas, esto permite identificar que cualquier mejora en eficiencia térmica del horno o en recuperación de calor tendría un impacto directo y significativo sobre el desempeño energético global del sistema y que está fuertemente condicionado por la eficiencia térmica del horno. El balance energético confirma que el sistema opera dentro de rangos técnicamente razonables y estables, con consumos que crecen de forma proporcional al incremento de la capacidad productiva con un factor de incremento total de 2,29 desde el comienzo al final de los 15 años de análisis, el valor específico de energía por tonelada de biocarbón constituye un indicador de desempeño, útil para comparar escenarios operativos, evaluar cambios de temperatura de operación. Los resultados validan la coherencia interna del modelo matemático y proporciona una base cuantitativa sólida para los análisis económicos.

Balance de exergía: La Tabla 24 presenta el balance exergético global del horno de pirólisis, normalizado por kilogramo de biomasa seca que entra al equipo (MJ/kg). Los porcentajes de participación exergética se calculan respecto a la exergía total de entrada, lo que permite evaluar de forma directa la contribución relativa de cada flujo.

La exergía total de entrada al horno es de 17,55 MJ/kg, dominada por la exergía química de la biomasa (91,24 %), mientras que el gas natural aporta 8,74 % y la electricidad una contribución marginal (0,03 %). En términos de salida, el biocarbón concentra el 68,30 % de la exergía de entrada, seguido por los líquidos de pirólisis (14,58 %) y el gas de pirólisis (3,43 %). La exergía física asociada a productos y gases de escape es reducida (<1 %), mientras que la exergía destruida alcanza el 12,68 %, reflejando las irreversibilidades propias del suministro de calor y de la transformación termoquímica.

Tabla 24

Balance exergético global del horno de pirólisis

Resultados balance Exegético horno	Exergía (MJ/kg)	%Participación Exergética
Exergía total de entrada	17,55	100,00
Exergía biomasa	16,02	91,24
Exergía gas natural	1,53	8,74
Exergía eléctrica	0,004	0,03
Exergía total de salida	15,33	87,32
Exergía química del Biocarbon	11,99	68,30
Exergía química de líquidos pirolisis	2,56	14,58
Exergía química gas de pirolisis	0,60	3,43
Exergía física productos de pirolisis	0,09	0,53
Exergía física gases de escape	0,08	0,48
Exergía Destruida	2,23	12,68

La eficiencia exergética global del horno alcanza un valor de 86,3 %, lo que confirma que la mayor parte de la exergía disponible se conserva en los productos del proceso. Estos resultados son comparables con eficiencias reportadas para reactores térmicos de biomasa a pequeña escala empleados en trabajos experimentales como los de Rathod,2023, y Elhenawy,2024, con eficiencias exergéticas de 79% y 72% respectivamente y refuerza el papel del horno como el equipo central del sistema de valorización.

La Tabla 25 presenta las magnitudes exergéticas anuales asociadas a la operación del horno de pirólisis para el horizonte completo de 15 años, expresadas en términos absolutos (GJ/año) permitiendo dimensionar el potencial exergético real del proceso a escala de planta. La exergía de entrada crece de forma progresiva con el aumento de biomasa procesada, manteniendo proporciones similares entre biomasa, gas natural y electricidad, coherentes con el análisis específico. A lo largo del período, el biocarbón representa la principal fracción de exergía útil anual, confirmando su rol central no solo como producto final, sino como principal portador de calidad energética del sistema. Los productos líquidos y gaseosos, aunque secundarios, muestran

un potencial exergético anual creciente que podría ser aprovechado para mejorar la eficiencia o la rentabilidad del proceso, dependiendo de la temperatura de operación y de la estrategia de valorización como productos secundarios, o integrarse en el sistema por combustión directa para generación de calor, en procesos de secado. Asimismo, la exergía física de los gases de escape, actualmente liberada al ambiente, presenta magnitudes que justifican su consideración particularmente en aplicaciones de secado de biomasa, con el fin de reducir consumos energéticos externos.

Tabla 25

Magnitudes exergéticas anuales del horno de pirólisis a 15 años

Año	Exergía entrada (GJ/Año)	Exergía biomasa (GJ/Año)	Exergía Gas_N (GJ/Año)	Exergía salida (GJ/Año)	Exergía_ch Biocarbon (GJ/Año)	Exergía_ch líquidos_piro (GJ/Año)	Exergía_ch Gas_piro (GJ/Año)	Exergía_ph Gas_escape (GJ/Año)	Exergía Destruída (GJ/Año)
1	3421,9	3122,0	299,0	2988,0	2337,1	498,9	117,5	16,3	433,9
2	3794,0	3461,5	331,5	3312,9	2591,2	553,1	130,3	18,0	481,1
3	4173,4	3807,7	364,7	3644,2	2850,3	608,4	143,3	19,8	529,2
4	4590,7	4188,4	401,1	4008,6	3135,3	669,3	157,7	21,8	582,1
5	5049,8	4607,3	441,3	4409,4	3448,9	736,2	173,5	24,0	640,4
6	5557,2	5070,2	485,6	4852,5	3795,4	810,2	190,9	26,4	704,7
7	6113,8	5578,0	534,2	5338,5	4175,6	891,3	210,0	29,0	775,3
8	6725,2	6135,9	587,6	5872,4	4593,1	980,5	231,0	31,9	852,8
9	7397,7	6749,4	646,4	6459,6	5052,4	1078,5	254,1	35,1	938,1
10	7479,5	6824,0	653,6	6531,0	5108,3	1090,4	256,9	35,5	948,5
11	7554,3	6892,3	660,1	6596,3	5159,4	1101,3	259,5	35,9	957,9
12	7629,8	6961,2	666,7	6662,3	5210,9	1112,3	262,1	36,2	967,5
13	7706,1	7030,8	673,4	6728,9	5263,1	1123,5	264,7	36,6	977,2
14	7783,2	7101,1	680,1	6796,2	5315,7	1134,7	267,3	37,0	987,0
15	7861,0	7172,1	686,9	6864,2	5368,8	1146,0	270,0	37,3	996,8

El análisis exergético demuestra que el horno de pirólisis opera de manera estable y eficiente, dominado por la exergía química de la biomasa y con una fracción mayoritaria conservada en el biocarbón. A escala específica y anual, el balance evidencia irreversibilidades moderadas y un potencial claro de mejora mediante la valorización de coproductos y la recuperación de calor de gases de escape. En conjunto, los resultados se encuentran dentro de los rangos reportados para procesos de pirólisis lenta de biomasa, consolidando al horno como el

equipo central del desempeño exergético del sistema y como un punto clave para futuras estrategias de mejora.

4.3 Resultados Evaluación económica del sistema de producción

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación económica del sistema de producción de biocarbón, incluyendo el análisis del CAPEX, el OPEX y la viabilidad económica del proyecto bajo un escenario conservador y coherente con una planta municipal de pequeña escala.

4.3.1 Resultados Distribución de planta y dimensionamiento de áreas

Este bloque dimensiona la infraestructura física requerida para operar la línea de producción de biocarbón con una capacidad de 8 toneladas por semana de residuos sólidos orgánicos (RSO). Se define la distribución general de la planta y la cuantificación de áreas por zonas funcionales: recepción y pesaje, pretratamiento, compostaje en cabas, patio de secado solar, pulverización y tamizado, pirólisis, empaque y almacenamiento, servicios (oficinas y baños), circulación vial interna, cerramiento perimetral y manejo de lixiviados. El desplazamiento interno del material se realiza mediante un tractor agrícola con cargador frontal, lo que condiciona el diseño de rampas, pasillos y áreas de maniobra. En consecuencia, el diseño incorpora rampas de comunicación entre niveles, pasillos amplios para la circulación del equipo móvil y escaleras peatonales para el personal técnico, conectando los niveles que se muestran en la Tabla 26.

El flujo del proceso se desarrolla de manera descendente por gravedad desde la tolva hasta el área de pirólisis: Camión (nivel 4 +5,5 m) → Tolva de recepción (A2+3,5 m) → Banda transportadora y selección (A3, +3,5 m) → Molino (A4, +2,5 m) → Cabas y compostaje (A6, +1,5 m) → Patio solar (franja 3 +1,5 m) → Pulverizador, zaranda y horno (nivel 0 m) → Almacenamiento final y áreas administrativas.

El lote municipal se modela como un rectángulo de dimensiones $L \times A$ (largo \times ancho), subdividido en tres franjas longitudinales claramente diferenciadas:

Tabla 26

Niveles de distribución de planta

Nivel	Cota (m)	Elementos principales	Diferencia
Subterráneo	-1,0 m	Tanques de lixiviados y aguas negras	1m
Nivel 0 (referencia)	0,0 m	Oficinas, comedor, baños, almacén, pulverizador, zaranda, horno	—
Nivel 1	+1,5 m	Cabas, pasillo en U, patio de secado	1,5m
Nivel 2	+2,5 m	Molino triturador y cuarto de herramientas	1m
Nivel 3	+3,5 m	Tolva de recepción y Banda transportadora y selección	1m
Nivel 4	+5,5 m	Descarga del camión	2m

Franja 1 Acceso y control de ingreso: Ubicada al frente del lote, constituye la zona de acceso principal a la planta. Incluye un portón vehicular para camiones y un acceso peatonal para el personal. En esta franja se dispone la báscula empotrada (9 \times 3 m) para el pesaje de los vehículos, así como el inicio de la vía interna que asciende con una pendiente moderada (4–5 %) hasta la cota más alta del terreno (+5,5 m), donde se realiza la descarga del camión en la tolva de recepción.

Franja 2 Área cubierta operativa y administrativa: Corresponde al núcleo del proceso productivo y del control operativo. Integra los equipos mecánicos principales (A2–A10) junto con las áreas administrativas y de servicio. Los equipos se disponen de forma lineal y descendente, esta configuración aprovecha la gravedad como mecanismo de transporte.

Franja 3 Patio de secado solar y sistemas subterráneos: Ubicada en la parte posterior del lote, alberga el patio de secado solar, y los tanques subterráneos de lixiviados y aguas negras, localizados a una cota de -1,0 m. El sistema de drenaje conecta estas estructuras con el manejo de efluentes y la red de alcantarillado.

Dimensionamiento de Área: Se realizó a partir de rectángulos operativos funcionales, considerando la huella de los equipos, los espacios mínimos de operación, la circulación segura del personal, la maniobra del cargador frontal y los accesos para mantenimiento Tabla 27. Como resultado, se obtuvo un lote total de 936 m², que garantiza la operación continua de la planta a la capacidad de diseño, una adecuada separación entre zonas operativas y administrativas, y un margen físico razonable para futuras ampliaciones sin alterar la lógica del proceso.

Tabla 27

Rectángulos operativos y áreas por equipo

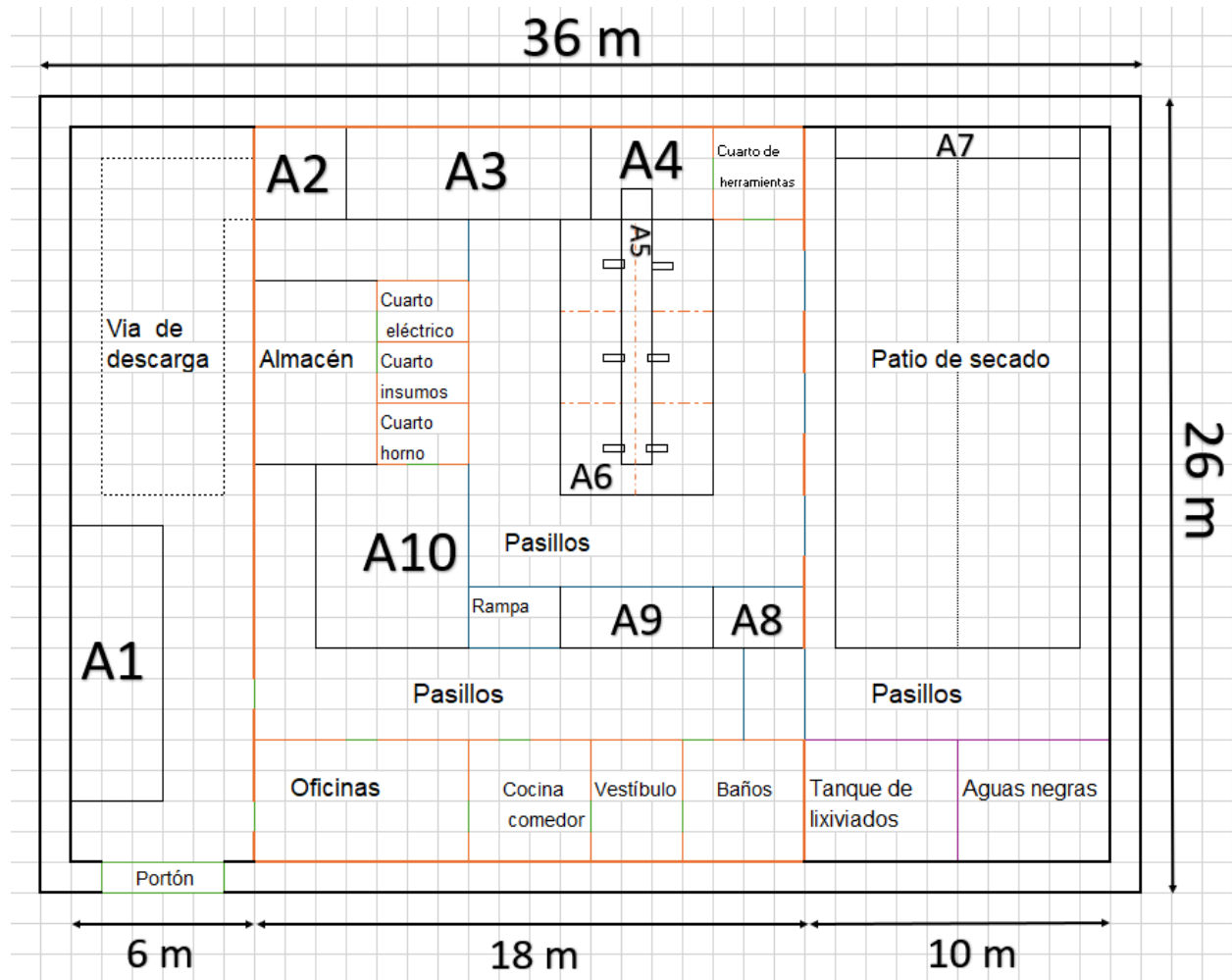
Ítem	Área (m ²)	L x A (m)
Franja 1: Área total	144	6 x 24
A1. Báscula para vehículos	27	9 x 3
Franja 2: Área total cubierta	432	18 x 24
A2. Tolva de recepción	9	3 x 3
A3. Banda de selección	24	8 x 3
A4. Molino triturador	12	3 x 4
Cuarto de herramientas	9	3 x 3
A6. Cabas/Composteras	132	11 x 12
A8. Pulverizador	6	3 x 2
A9. Zaranda / Trómel	10	5 x 2
A10. Horno de pirólisis	30	6 x 5
Almacén y cuartos técnicos	42	6 x 7
Bloque de servicios	72	18 x 4
Pasillos y accesos	86	—
Franja 3: Área total	240	10 x 24
A7. Sistema de cubierta retráctil	8	8 x 1
Patio de secado solar	128	8 x 16
Tanque de lixiviados	20	5 x 4
Tanque de aguas negras:	20	5 x 4
Pasillos y accesos	64	—
Área total del terreno	936	36 x 26

El layout esquemático de la Figura 10 se elaboró sobre una hoja cuadrículada a escala, donde cada cuadro representa 1 m x 1 m, permitiendo visualizar de manera clara las dimensiones y proporciones del conjunto. En el esquema se representan los rectángulos operativos de cada

equipo dispuestos según el orden del proceso y las franjas definidas. El color naranja identifica las áreas cubiertas y de mampostería, el color verde señala puertas y accesos, el color azul corresponde a rampas, pasillos y circulaciones internas.

Figura 10

Layout esquemático de la distribución de planta



4.3.2 Resultados de la evaluación del CAPEX

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación del capital de inversión (CAPEX) requerido para la implementación de un sistema de producción de biocarbón a partir de RSOC.

Bloque A- Equipos principales: La Tabla 28 Agrupa los equipos necesarios para el sistema de producción de biocarbón. Los costos de los equipos nuevos como el horno de pirólisis son un estimado de referencias comerciales vía web y aproximados a costos de fabricación local, (GM Pyrolysis Machine), y referencia de precios de un tractor con cargador frontal (Diesel Kubota Colombia,). Los costos de equipos existentes fueron seleccionados con base en la información técnica encontrada en la formulación del proyecto de construcción de la estación de clasificación y aprovechamiento de residuos sólidos en el municipio de Guadalupe Santander (Departamento de Santander & CAS;2023).

Tabla 28

Equipos principales del sistema de producción de biocarbón

Código	Equipo	Valor \$ (US)
A1	Báscula industrial para pesaje de vehículos	\$ 19 081
A2	Tolva de recepción de residuos orgánicos	\$ 9 225
A3	Banda transportadora de selección manual	\$ 6 150
A4	Molino triturador de orgánicos	\$ 18 066
A5	Tornillo sinfín distribuidor	\$ 8 572
A6	Cabas con sistema de drenaje	\$ 8 750
A7	Sistema retráctil de lona impermeable	\$ 5 000
A8	Pulverizador de biomasa	\$ 6 150
A9	Zaranda o trómel giratorio	\$ 9 263
A10	Horno de pirólisis tipo Downdraft	\$ 21 250
A11	Cargador frontal agrícola	\$ 16 250
A12	Herramientas y utensilios de operación	\$ 5 000
Total, Bloque A		\$ 132 756

Bloque B- Infraestructura: la Tabla 29 Comprende el diseño y presupuesto constructivo de la infraestructura física de la planta de producción de biocarbón por descomposición térmica de residuos sólidos orgánicos. Su objetivo es establecer las cantidades de obra y componentes estructurales necesarios para la construcción del edificio principal y las áreas complementarias. El desarrollo del bloque se fundamenta en la distribución arquitectónica y operativa definida

previamente. El bloque B se divide en diez secciones constructivas (B1–B10) que agrupan las actividades según su naturaleza técnica y orden constructivo, siguiendo criterios de obra civil de un proyecto tipo (DNP, 2021):

Tabla 29

Resumen Bloque B: Infraestructura

Ítem	Descripción	Valor (US)	Incidencia (%)
B1	Preliminares (replanteo, mediciones, etc.)	\$ 12 546	3,24%
B2	Excavaciones, rellenos, compactación	\$ 8 976	2,32%
B3	Cimentación (placa de piso, muros de contención)	\$ 19 226	4,97%
B4	Aceros y estructura metálica (refuerzo, pórticos, malla y cubierta metálica)	\$ 127 679	32,99%
B5	Techo / Cubierta (tejas, canales y bajantes)	\$ 53 850	13,91%
B6	Mampostería fachada puertas y ventanas	\$ 16 220	4,19%
B7	Instalación de equipos y acabados	\$ 11 948	3,09%
B8	Red eléctrica	\$ 68 716	17,75%
B9	Red hidrosanitaria y aguas lluvias (cunetas, tuberías, cajas, tanques)	\$ 67 711	17,49%
B10	Complementos	\$ 198	0,05%
Total, Bloque B – Infraestructura		\$ 387 071	100%

El CAPEX total se presenta en la Tabla 30, construida a partir del CAPEX directo (CD), conformado por los equipos principales (Bloque A) y la infraestructura y obras civiles (Bloque B).

Sobre este costo directo se aplica el esquema AIU (Administración, Imprevistos y Utilidad), el cual, adicionado al CAPEX directo, da lugar al Costo total de Obra Civil, sobre este costo se incorporan los costos de interventoría. Finalmente, el CAPEX total del sistema de producción de biocarbón (C_1) se obtiene como la suma del Costo total de Obra Civil y los costos de Interventoría (DNP, 2021).

Tabla 30

Resumen general CAPEX Infraestructura Nueva

CAPEX Infraestructura Nueva Sistema de Producción de Biocarbón					
Bloque	Descripción	% Aplicado	Valor (USD)		Observaciones
A	Equipos principales	—	\$	132 756	Tabla 30
B	Infraestructura	—	\$	387 071	Tabla 31
CD	CAPEX directo (CD)		\$	519 827	CD = A+B
E	Administración	22%	\$	114 362	$E = CD*(0,22)$
F	Imprevistos	1%	\$	5 198	$F = CD*(0,01)$
G	Utilidad	5%	\$	25 991	$G = CD*(0,05)$
AIU	Subtotal AIU		\$	145 552	AIU = E+ F + G
H	Costo total Obra Civil		\$	665 379	H = CD + AIU
I	Interventoría	7%	\$	46 577	I = H *(0,07)
	CAPEX total (C_t)		\$	711 955	C_t =H + I

4.3.3 Resultados de la evaluación del OPEX

La Tabla 32 presenta el resumen del OPEX anual estimado para el año 1 de funcionamiento del sistema de producción de biocarbón a partir de RSOC. El costo operativo total del primer año estimado asciende a 59 669 USD/año, el cual integra como costos variables los precios de energía eléctrica, consumo de combustibles, y mano de obra, considerando un precio base para una proyección de crecimiento anualizada, además como costos fijos anuales se considera el mantenimiento y repuestos como el 4% del valor de los equipos del bloque A, insumos operativos 1% del CAPEX total y otros gastos asociados a la operación continua del sistema como el 1% del OPEX anual. El análisis evidencia que el componente dominante del OPEX es la mano de obra, lo que representa aproximadamente el 65,4 % del costo operativo total. Este resultado es consistente con sistemas de aprovechamiento de residuos de pequeña escala, caracterizados por una alta dependencia de actividades manuales.

Tabla 31*Resumen del OPEX anual del sistema de producción de biocarbón*

Componente	Base de cálculo	Valor anual (USD)
1. Energía y combustibles	Cálculo real (equipos + gas + diésel + servicios)	7 642
2. Mano de obra	5 SMLV × 12 meses × cargas sociales	39 000
3. Mantenimiento y repuestos	Bloque A × 4 %	5 310
4. Insumos y materiales	CAPEX total × 1 %	7 119
5. Otros gastos operativos	OPEX subtotal × 1 %	598
TOTAL, OPEX ANUAL	$\Sigma (1-5)$	59 669 USD/año

El sistema propuesto es intensivo en mano de obra y poco dependiente de la energía, característica que resulta favorable en contextos municipales donde el objetivo no es maximizar la eficiencia energética, sino generar valor agregado al residuo, empleo local y reducción de impactos ambientales. En conjunto, los resultados del OPEX confirman que el sistema de producción de biocarbón es operativamente viable a pequeña escala, con una estructura de costos coherente con su nivel tecnológico y con los objetivos de valorización de residuos orgánicos municipales.

4.3.4 Resultados del Análisis de Viabilidad Económica

La Tabla 32 presenta el flujo de caja anual del proyecto para el horizonte de 15 años, incluyendo los residuos tratados, la producción de biocarbón, los ingresos, el OPEX, el flujo neto anual y el flujo acumulado. Durante el año 0, el proyecto registra un flujo negativo equivalente al CAPEX total (-711 960 USD). A partir del año 1, el sistema genera flujos netos positivos, los cuales aumentan progresivamente como resultado del incremento en la cantidad de residuos tratados y de la producción de biocarbón. Este comportamiento confirma que el proyecto es operativamente autosostenible, incluso antes de recuperar la inversión inicial.

El flujo acumulado permanece negativo durante los primeros años de operación y cruza a valores positivos entre el año 9, indicando el momento en el cual se recupera la inversión inicial. A partir de este momento, el proyecto genera beneficios económicos acumulativos crecientes, alcanzando un flujo acumulado positivo cercano a 1 120 000 USD al final del periodo de evaluación. Este resultado confirma que, aunque la recuperación de la inversión es gradual, el sistema consolida su rentabilidad en el largo plazo.

Tabla 32

Flujo de caja anual del proyecto para el horizonte de 15 años

Año	Residuos tratados (t)	Bultos Biocarbón (40 kg)	Ingresos (USD)	OPEX (USD)	Flujo neto (USD)	Flujo acumulado (USD)
0	—	—	—	—	-711 960	-711 960
1	416	3 239	\$ 93 466	\$ 59 669	\$ 33 797	\$ -678 160
2	458	3 592	\$ 106 630	\$ 63 000	\$ 43 626	\$ -634 530
3	504	3 951	\$ 120 810	\$ 66 825	\$ 53 982	\$ -580 550
4	555	4 346	\$ 136 870	\$ 71 007	\$ 65 868	\$ -514 680
5	610	4 781	\$ 155 080	\$ 75 583	\$ 79 496	\$ -435 190
6	671	5 261	\$ 175 770	\$ 80 599	\$ 95 173	\$ -340 010
7	738	5 788	\$ 199 170	\$ 86 023	\$ 113 150	\$ -226 860
8	812	6 367	\$ 225 660	\$ 91 979	\$ 133 680	\$ -93 178
9	893	7 003	\$ 255 680	\$ 98 534	\$ 157 140	\$ 63 965
10	902	7 081	\$ 266 220	\$ 103 710	\$ 162 510	\$ 226 480
11	911	7 152	\$ 276 950	\$ 109 180	\$ 167 770	\$ 394 250
12	920	7 223	\$ 288 110	\$ 114 970	\$ 173 140	\$ 567 390
13	929	7 295	\$ 299 720	\$ 121 120	\$ 178 610	\$ 745 990
14	938	7 368	\$ 311 800	\$ 127 630	\$ 184 170	\$ 930 160
15	947	7 442	\$ 324 370	\$ 134 530	\$ 189 840	\$ 1 120 000

La evolución de los flujos evidencia un comportamiento estable y coherente con una planta municipal de pequeña escala, donde el crecimiento gradual de la producción permite absorber los costos operativos y consolidar la rentabilidad del sistema. La Tabla 33 resume los principales indicadores financieros obtenidos.

El VPN positivo y la TIR superior a la tasa de descuento confirman que el proyecto es económicamente rentable bajo los supuestos adoptados. La diferencia entre el payback simple y el payback descontado evidencia la importancia de considerar el valor del dinero en el tiempo en proyectos de infraestructura ambiental, donde los retornos se consolidan en horizontes de mediano y largo plazo.

Tabla 33

Viabilidad Económica Infraestructura Nueva

Viabilidad Económica Infraestructura Nueva (CAPEX 711 955 USD)		
Indicador	Valor	Interpretación
Valor Presente Neto (VPN)	+114 580 USD	Valor actualizado de los beneficios netos proyecto rentable
Tasa Interna de Retorno (TIR)	10,94 %	Rentabilidad real del proyecto > tasa mínima del 9 %
Payback simple	8,6 años	Recupera la inversión inicial.
Payback descontado (9%)	12,87 años	Recupera inversión considerando valor del dinero en el tiempo
Costo mínimo de venta (CMV)	0,308 USD/kg	Precio mínimo que cubre costos operativos
Precio de venta actual	0,625 USD/kg	Margen operativo ≈ 50,6 %
Ganancia neta acumulada (15 años)	1 120 000 USD	Beneficio total pagando el CAPEX

El costo mínimo de venta obtenido es significativamente inferior al precio de venta considerado, lo que otorga un margen operativo suficiente para absorber variaciones moderadas en los costos de operación o en los precios de mercado, fortaleciendo la robustez económica del sistema. El CMV esta por debajo de rangos reportados en literatura a nivel local entre 1,30 USD/kg (Ortiz Ochoa 2023) y 1,6 USD/kg (Alonso-Gómez et al. 2024), además en una revisión de precios internacionales de biocarbón orientado a agricultura suele ubicarse en promedio por 0,4-1,2 USD/kg cuando no está certificado para energía.

En conjunto, los resultados confirman que el sistema de producción de biocarbón es económicamente viable, con una rentabilidad moderada pero estable, coherente con su enfoque ambiental, social y de gestión integral de residuos a escala municipal.

4.3.5 Discusión de los resultados del Estudio Económico

Los resultados obtenidos evidencian una reducción sustancial del tiempo total de procesamiento de los residuos orgánicos frente al escenario convencional de compostaje municipal que presentan tiempos de retención del orden de 4 a 5 meses, el sistema propuesto reduce este periodo a un tiempo aproximado de 8 días, mediante la integración de mejoras tecnológicas centradas en la incorporación del horno de pirólisis.

La selección de las tecnologías incorporadas en este estudio no respondió únicamente a criterios de desempeño técnico, sino principalmente a un criterio de viabilidad económica y de adaptación a infraestructura existente. En Colombia, hay municipios que ya cuentan con plantas de compostaje operativas, como se describió en las actividades complementarias del Objetivo Específico 2. Bajo este enfoque, la implementación del sistema de producción de biocarbón propuesto no requiere la construcción de una infraestructura completamente nueva, sino la incorporación de mejoras tecnológicas puntuales, concentradas en los equipos críticos del proceso.

En particular, el CAPEX puede reducirse significativamente al considerar únicamente la adquisición de nuevos equipos como el horno de pirólisis, el cargador frontal agrícola y el sistema de cubierta retráctil, junto con adecuaciones menores sobre la infraestructura existente, tales como la mejora del sistema de drenaje en las cabas y la adaptación del patio de compostaje a un patio de secado solar. La Tabla 34 presenta este escenario alternativo implica un CAPEX (120 000 USD) para una infraestructura existente con costos directos los equipos nuevos y las adecuaciones

necesarias en infraestructura para el sistema de producción de Biocarbon planteado, a este costo directo se aplica el esquema AIU, y su correspondiente interventoría. (DNP, 2021).

Tabla 34

Resumen General CAPEX Infraestructura Existente

CAPEX Infraestructura Existente del Sistema de producción de biocarbón				
Bloque	Descripción	% Aplicado	Valor (USD)	Observaciones
A	Equipos principales	—	\$ 47 617	Equipos nuevos
B	Infraestructura	—	\$ 40 000	Adecuaciones necesarias
CD	CAPEX directo (CD)		\$ 87 617	CD = A+B
E	Administración	22%	\$ 19 276	$E = CD*(0,22)$
F	Imprevistos	1%	\$ 876	$F = CD*(0,01)$
G	Utilidad	5%	\$ 4 381	$G = CD*(0,05)$
AIU	Subtotal AIU		\$ 24 500	AIU = E + F + G
H	Costo total Obra Civil		\$ 112 150	H = CD + AIU
I	Interventoría	7%	\$ 7 850	$I = H*(0,07)$
	CAPEX total (C_t)		\$ 120 000	C_t =H + I

La Tabla 35 presenta la evaluación de viabilidad económica correspondiente a este escenario de adaptación de infraestructura existente (CAPEX 120 000 USD) considerablemente menor respecto al diseño completo de una planta nueva (711 955 USD), lo que se traduce directamente en mejores indicadores financieros, menores tiempos de recuperación de la inversión y una mayor robustez del modelo frente a la escala municipal, el cual refleja el potencial del sistema propuesto como una solución técnicamente eficiente y económicamente atractiva para municipios que ya disponen de plantas de compostaje en operación. Los costos anuales del OPEX se mantienen en las mismas condiciones que el análisis anterior pues la operación es independiente de la inversión inicial.

La evaluación económica del escenario que aprovecha infraestructura existente, evidencia una mejora en la rentabilidad del sistema frente al diseño de una planta nueva lo que confirma que la viabilidad económica está fuertemente condicionada por el nivel de inversión inicial, un menor

requerimiento de capital reduce la carga financiera del proyecto y acelera la generación de beneficios netos, adicionalmente, el costo mínimo de venta del kilogramos de biocarbón se reduce a 0,284 USD, generando un margen operativo cercano al 55 % respecto al precio de venta considerado, lo que le permite una mejor estabilidad en el precio del producto final en el tiempo sin incrementos bruscos causados por factores como la inflación de combustibles y mano de obra.

Tabla 35

Viabilidad Económica Infraestructura Existente

Viabilidad Económica Infraestructura Existente (CAPEX 120 000 USD)		
Indicador	Valor	Interpretación
Valor Presente Neto (VPN)	+ 705 880 USD	Valor actualizado de los beneficios netos proyecto rentable
Tasa Interna de Retorno (TIR)	48,1 %	Rentabilidad real del proyecto > tasa mínima del 9 %
Payback simple	2,79 años	Recupera la inversión inicial antes de la mitad de la vida útil
Payback descontado (9%)	3,23 años	Recupera inversión considerando valor del dinero en el tiempo
Costo mínimo de venta (CMV)	0,284USD/kg	Precio mínimo que cubre costos operativos
Precio de venta actual	0,625 USD/kg	Margen operativo 55 %
Ganancia neta acumulada (15 años)	1 710 700 USD	Beneficio total pagando el CAPEX

Los resultados del análisis económico muestran que el sistema de producción de biocarbón es económicamente viable en ambos escenarios evaluados: tanto cuando se considera la construcción de una planta completa con nueva infraestructura, como cuando se aprovecha infraestructura existente y se limita el CAPEX a mejoras tecnológicas. En el primer caso, el proyecto presenta rendimientos económicos positivos, pero con tiempos de recuperación más largos, lo que condiciona la incorporación temprana de tecnologías adicionales y exige una gestión más conservadora del riesgo financiero. En contraste, el escenario con CAPEX reducido (120 mil

USD) permite una recuperación de la inversión significativamente más rápida, generando excedentes en etapas tempranas de operación que pueden destinarse a nuevas mejoras tecnológicas sin comprometer la estabilidad económica del sistema y manteniendo su competitividad en el mercado.

Bajo este enfoque incremental, el ahorro asociado a no construir infraestructura nueva puede orientarse a la incorporación progresiva de soluciones tecnológicas complementarias, como sistemas de secado mecánico de baja complejidad integrados al esquema de secado solar, o mejoras directas sobre el horno de pirólisis. No obstante, los días de retención en el esquema operativo planteado, introduce una limitación estructural al crecimiento del sistema, al requerir mayores áreas físicas, esta condición resulta manejable a escala municipal, pero se convierte en un factor restrictivo al considerar escenarios de mayor densidad poblacional como los asociados a centros urbanos de mayor tamaño.

La adopción de esquemas de flujo continuo emerge como una alternativa con potencial para mejorar la eficiencia operativa, al reducir retención del material quitando las cabas de compostaje y el patio de secado, y eliminando equipos móviles como el cargador frontal y su consumo de diésel, remplazando todo por secadores industriales de alta capacidad (1-2 toneladas de RSO /hora) que garanticen volteo de material y remoción de la humedad superficial (51%). Para fines prácticos se hicieron proyecciones de viabilidad económica teniendo en cuenta recepción diaria de lunes a viernes, asumiendo el mismo CAPEX de infraestructura nueva instalando un secador industrial y que sus costos asociados a su implementación son iguales a los equipos que reemplaza (30 000 USD), se proyecta un crecimiento de recepción anual orgánico del 1 %, y se amplía la nómina a diez (10) trabajadores, manteniéndose constantes los demás parámetros técnicos y económicos del modelo. La proyección empieza con 25 toneladas semanales

escenario donde las cabas de compostaje trabajan a máxima capacidad (98 %), y terminan en 50 toneladas semanales, donde el horno de pirolisis trabaja turnos de 12 horas requiriendo mejoras tecnológicas turnos ampliados, o incorporación de segundas líneas de producción y modificaciones de CAPEX y OPEX. La Tabla 36 muestra escenarios de recepción diaria de RSO, la población asociada a dicha generación con un factor de 0,69 kg /habitante, por semana (Maldonado Cárdenas, 2021), la producción promedio anual estimada en toneladas de Biocarbon, el flujo neto de caja promedio anual, y los principales indicadores de viabilidad económica.

Tabla 36

Proyección de recepción diaria en sistemas de producción continuo.

Población	Recepción Semanal	Producción Biocarbon t/Anual	Promedio flujo Neto Anual	VPN USD	%TIR	Payback Descontado	CMV USD/kg
36 250	25	438,1	\$169 649	\$682 490	23,8%	5,1	0,260
43 500	30	525,7	\$231 110	\$1 165 500	32,5%	3,7	0,211
50 750	35	613,3	\$292 603	\$1 165 500	32,5%	3,7	0,176
58 000	40	700,9	\$354 301	\$2 133 400	48,7%	2,4	0,150
65 250	45	788,5	\$416 067	\$2 618 500	56,6%	2,0	0,129
72 500	50	876,2	\$477 975	\$3 104 700	64,5%	1,8	0,112

Los resultados presentados evidencian una relación directa entre la escala de operación del sistema y su desempeño económico, los ingresos del sistema crecen a un ritmo superior al de los costos operativos, ventajas de las mejoras tecnológicas de la operación continua, lo cual sugiere que el capital invertido se recupera de forma significativamente más rápida en escenarios de mayor recepción de residuos, reforzando la competitividad económica del producto a medida que se incrementa la escala del sistema.

Estos análisis permiten identificar el rango poblacional para garantizar esa recepción de RSO y los volúmenes de biocarbón producido, con el fin de anticipar los retos operativos y

comerciales asociados a escenarios de alta producción. En particular, producciones elevadas hacen necesaria la implementación de sistemas de empaquetado automático, así como el fortalecimiento del componente de mano de obra dedicada a ventas y logística de distribución, con el fin de asegurar la venta continua del producto. De manera complementaria, la reducción del precio de venta puede constituir una estrategia para absorber mayores volúmenes de producción, aunque ello implique sacrificar parcialmente los indicadores económicos, priorizando la continuidad comercial y operativa del sistema.

Proyección tecnológica: Los problemas asociados a la alta generación de residuos sólidos orgánicos en contextos de crecimiento poblacional, requieren soluciones que permitan reducir tiempos de procesamiento y superficies de operación, especialmente cuando se busca ampliar la producción de productos con valor agregado. En este contexto, los procesos de descomposición térmica se consolidan como una alternativa viable, al incorporar energía al sistema para acelerar la transformación de la biomasa y superar las limitaciones espaciales de los esquemas convencionales. Sin embargo, estrategias de mayor complejidad, como procesos completamente continuos o secadores industriales de alta capacidad, implican incrementos significativos de CAPEX y requerimientos energéticos que solo se justifican cuando la recepción de residuos y la demanda del biocarbón están plenamente aseguradas. En muchos casos, estos equipos pueden alcanzar costos comparables o superiores al del propio horno, lo que refuerza la conveniencia de priorizar la inversión sobre el horno de pirólisis como núcleo del sistema. Desde esta perspectiva, el horno representa el principal salto tecnológico del proyecto, al concentrar la generación de valor y habilitar el procesamiento de una amplia gama de residuos orgánicos municipales, al tiempo que constituye una plataforma para futuras líneas de investigación y mejoras tecnológicas progresivas para evolucionar el sistema en el largo plazo.

Validación municipal: Desde el punto de vista económico e institucional, el sistema propuesto resulta especialmente adecuado para contextos municipales, donde las entidades públicas suelen disponer de los terrenos necesarios y cuentan con esquemas consolidados de recaudo a través del servicio público de aseo, lo que permite cubrir los costos de recolección, transporte y personal operativo de recolección y aseo. Este marco facilita que el proyecto se enfoque en el sistema de aprovechamiento de los RSO, el cual generalmente se integra dentro de iniciativas de mayor alcance que incluyen también el manejo de materiales reciclables, compartiendo infraestructura y gastos operativos. En conjunto, los resultados obtenidos confirman que el enfoque planteado no solo es técnica y económicamente viable, sino que ofrece una ruta de implementación y evolución tecnológica realista, coherente con las capacidades financieras, operativas e institucionales del ámbito municipal y alineada con las políticas de gestión integral de residuos sólidos. El sistema de producción de biocarbón por descomposición térmica se consolida como una alternativa concreta para el aprovechamiento de RSO, con potencial de escalamiento a estrategias más amplias de sostenibilidad y economía circular.

5. Conclusiones

- La comercialización de biocarbón, a un costo mínimo de venta cercano a 0,31 USD/kg, se consolida como una alternativa técnicamente viable para la valorización de residuos sólidos orgánicos compostados mediante procesos de descomposición térmica a 250 °C y tiempos de retención ≤ 30 minutos, representando un equilibrio técnico adecuado entre rendimiento de sólido, estabilidad de Biocarbon y energía disponible.

- El biocarbón producido tiene un poder calorífico de 16,7 MJ/kg, y un alto contenido de cenizas (44 %), lo cual limita su competitividad como combustible sólido de alta densidad energética y orienta su potencial hacia aplicaciones no energéticas, particularmente en el ámbito agrícola y de mejoramiento de suelos.

- El desempeño global del sistema depende en gran medida de la eficiencia térmica del horno (67,5 %), la demanda energética fue de 0,832 kWh por kilogramo de biocarbón producido, y está dominada por el consumo térmico del gas natural (74 %), seguida por el diésel (17 %) y la energía eléctrica (9 %). El análisis de segunda ley mostró una eficiencia exergética del horno de 86,3%, con una conservación de la disponibilidad exergética en los productos del proceso, principalmente en el biocarbón (68,3 %), y una exergía destruida del 12 % asociada al proceso térmico.

- El sistema resulta económicamente viable bajo las condiciones de operación municipal propuestas. Asumiendo un precio de venta de 0,625 USD/kg, los indicadores económicos son positivos, aunque fuertemente condicionados por la inversión de capital inicial, un escenario con infraestructura nueva requiere una gestión más conservadora del riesgo financiero, mientras que el aprovechamiento de infraestructura existente permite una recuperación más rápida de la inversión, generando excedentes en etapas tempranas que pueden destinarse a mejoras

tecnológicas. En ambos casos, el proyecto genera ingresos positivos desde el primer año, y cubre los costos de operación (59 669 USD/año) dentro del horizonte de evaluación de 15 años.

6. Recomendaciones

- Se recomienda avanzar hacia la evaluación agronómica integral de los productos y subproductos del proceso, en particular el biocarbón y los lixiviados generados, mediante su caracterización y validación como enmienda sólida y biofertilizantes líquidos, respectivamente. Esta línea permitiría incrementar el valor agregado del sistema y fortalecer su enfoque de economía circular, especialmente en aplicaciones agrícolas locales.

- Evaluar estrategias de recuperación energética de los gases y del calor residual del proceso de pirólisis, ya sea mediante combustión directa o aprovechamiento térmico para procesos auxiliares como el secado de biomasa. También se pueden integrar estudios de generación de biogás a partir de lixiviados. Estas alternativas podrían reducir la dependencia de combustibles externos y mejorar el desempeño energético global del sistema.

- Refinar el modelo matemático energético y exergético, incorporando pérdidas térmicas reales, y escenarios de recuperación de calor, con el fin de mejorar la precisión del análisis y facilitar su extrapolación a escalas industriales o a configuraciones tecnológicas alternativas.

- Se sugiere analizar estrategias de automatización gradual y optimización logística interna, orientadas a reducir la dependencia de la mano de obra, principal componente del OPEX, manteniendo la flexibilidad requerida para sistemas de pequeña escala y gestión municipal.

Referencias Bibliográficas

- Alonso-Gómez, L. A., Celis-Carmona, D. D., Rodríguez-Sánchez, Y. F., Castro-Ladino, J. R., & Solarte-Toro, J. C. (2024). *Biochar production from cassava waste biomass: A techno-economic development approach in the Colombian context. Biomass Conversion and Biorefinery*, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101872>
- ASTM International. (2014). *Introduction* (Manual Series MNL 57). ASTM International.
- ASTM International. (2020). *ASTM E1131-20: Standard test method for compositional analysis by thermogravimetry*. ASTM International.
- ASTM International. (2024a). *ASTM E1755-24: Standard test method for ash in biomass*. ASTM International.
- ASTM International. (2024b). *ASTM E1756-24: Standard test method for determination of total solids in biomass*. ASTM International.
- ASTM International. (2024c). *ASTM E872-24: Standard test method for volatile matter in biomass*. ASTM International.
- Baca Urbina, G. (2015). *Ingeniería económica* (6.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2021). *Lineamientos sectoriales para la gestión de residuos sólidos y el avance hacia la economía circular*. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Lineamientos-sectoriales-para-la-gestion-de-residuos-solidos-y-el-avance-hacia-la-economia-circular--acelerando-la-transformacion-del-sector.pdf>
- Barneto, A. G., Ariza, J., Conesa, J. A., & Díaz, M. J. (2010). Kinetic study on the thermal degradation of a biomass and its compost: Composting effect on hydrogen production. *Fuel*, 89(2), 462–473. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.024>

- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory*. Academic Press.
- Blanco, M. J., & Almendros, G. (1994). Maturity assessment of wheat straw composts by thermogravimetric analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42(11), 2454–2459. <https://doi.org/10.1021/jf00047a017>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94; <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Cárdenas García, A. L., & Sánchez Carreño, J. M. (2015). *Análisis Técnico-Económico de la Pirólisis de Biomasa Residual Agrícola en Santander: Perspectivas y Escenarios*. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.
- Chen, W.-H., Lu, K.-M., Liu, S.-H., Tsai, C.-M., Lee, W.-J., & Lin, T.-C. (2013). Biomass torrefaction characteristics in inert and oxidative atmospheres at various superficial velocities. *Bioresource Technology*, 146, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.064>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2025). *Termodinámica* (10.^a ed.). McGraw Hill Interamericana.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP. 2021). *Construcción de una estación de clasificación y aprovechamiento de residuos sólidos (ECA)* (Proyectos Tipo, Versión 1.0). [Construcción de estación de clasificación y aprovechamiento de residuos sólidos – ECA](#)
- Departamento Nacional de Planeación (DNP.2023). *Lineamientos conceptuales que soportan la Metodología General Ajustada para Colombia* (Versión 2.0). https://mgaayuda.dnp.gov.co/Recursos/Documento_conceptual_2023.pdf
- Departamento de Santander & Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS). (2023). *Convenio interadministrativo celebrado entre el Departamento de Santander y la Corporación Autónoma Regional de Santander* (Código AP-CCP-RG-12).

- Díaz, M. J., Ruiz-Montoya, M., Palma, A., & de-Paz, M.-V. (2021). Thermogravimetry applicability in compost and composting research: A review. *Applied Sciences*, 11(4), 1692. <https://doi.org/10.3390/app11041692>
- Diesel Kubota Colombia. (web). Cargador frontal para tractores Kubota. <https://dies elkubota.com.co/productos/cargador-frontal/>
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). *Exergy: Energy, environment and sustainable development* (2nd ed.). Elsevier.
- Duranay, N., & Çaycı, G. (2019). Production of solid fuel with torrefaction from agricultural wastes. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(22), 2737–2749. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1604878>
- Elhenawy, Y., Fouad, K., Bassyouni, M., Al-Qabandi, O. A., & Majozi, T. (2024). Yield and energy outputs analysis of sawdust biomass pyrolysis. *Energy Conversion and Management: X*, 22, 100583. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100583>
- El Ouaquodi, F. Z., El Fels, L., Winterton, P., Lemée, L., Amblès, A., & Hafidi, M. (2014). Study of humic acids during composting of ligno-cellulose waste by infra-red spectroscopic and thermogravimetric/thermal differential analysis. *Compost Science & Utilization*, 22(3), 188–198. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2014.910148>
- García Sánchez, G. F. (2023). Evaluación del Bagazo de *Lippia origanoides* como Combustible para Sistemas de Combustión de Baja Potencia. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Doctorado en Ingeniería Mecánica.
- GM Pyrolysis Machine. (web). Biochar pyrolysis machine. <https://www.gmpyrolysis machine.com/>
- González Pérez, R. N. (2024). Dimensionamiento de la estructura: Consultoría estudio de preinversión para la formulación del proyecto de construcción de la estación de clasificación y aprovechamiento

de residuos sólidos en el municipio de Guadalupe, Santander, Asociación BIONET para la Alcaldía del Municipio de Guadalupe.

- Herath Bandara, S. J. (2025). *Exploring the potential of biochar in enhancing U.S. agriculture. Regional Science and Environmental Economics*, 2(3), Article 23. <https://doi.org/10.3390/rsee2030023>
- Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2015). A review on biomass-based hydrogen production for renewable energy supply. *International Journal of Energy Research*.
- Ivanovski, M., Lisowski, A., Dabrowska, M., & Świechowski, K. (2023). The evaluation of torrefaction efficiency for lignocellulosic materials combined with mixed solid wastes. *Energies*, 16(4), 1942. <https://doi.org/10.3390/en16093694>
- Khater, E.-S. G. (2011.). *Chemical and physical properties of compost*. Benha University, Faculty of Agriculture, Agricultural Engineering Department.
- Lee, J., Lee, S., Kwon, S., Seo, J., & Sohn, D. (2018). Value-added performance and thermal decomposition characteristics of dumped food waste compost by pyrolysis. *Energies*, 11(5), 1061. <https://doi.org/10.3390/en11051061>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>
- Maldonado Cárdenas, J. J. (2021). Monitorear el sistema de gestión para el manejo de residuos sólidos y potabilización de agua para la Empresa Municipal Oibana de Servicios Públicos del municipio de Oiba, Santander, Universidad Libre, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias.
- McHenry, M. P. (2009). Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 129.

- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2023). *Programa Basura Cero*.
<https://www.minvivienda.gov.co/basura-cero>
- Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Nueva York, Estados Unidos.
- Núñez Castañeda, A. (2023). Orientación del manejo de los residuos sólidos hacia su clasificación, aprovechamiento y disposición final provenientes de la recolección realizada por la Empresa Oibana de Servicios Públicos del municipio de Oiba, Santander. Universidad Libre, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias.
- Nyakuma, B. B., Ahmad, A., Johari, A., Abdullah, T. A. T., & Oladokun, O. (2015). Torrefaction of pelletized oil palm empty fruit bunches. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1505.05469>
- Ortiz Mier, N. L., & Velandia Rojas, D. F. (2018). Descomposición térmica a baja temperatura de residuos orgánicos urbanos: caracterización y modelado matemático del proceso. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Ortiz Ochoa, F. A. (2023). Evaluación Termo-económica del aprovechamiento de los residuos sólidos en la Universidad Industrial de Santander. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicomecánicas
- Palma, M., García, L., & Rodríguez, P. (2023). Producción de biocarbón a partir de residuos orgánicos: Aplicaciones energéticas y ambientales. *Revista de Energías Renovables*.
- Pardavé Livia, W., & Mantilla Suarez, N. F. (2021). Biocarbon from Pruning and Gardening Residues on the Santander University Campus, Using a Pyrolysis System with Minimal Gas Emission. *Journal of Sustainability Perspectives*.
- Peters, M. S., & Timmerhaus, K. D. (1991). *Plant design and economics for chemical engineers* (4th ed.). McGraw-Hill.

- Prins, M. J., Ptasiński, K. J., & Janssen, F. J. J. G. (2006). More efficient biomass gasification via torrefaction. *Energy*, 31(15), 3458–3470. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.03.008>
- Rathod, N., Jain, S., & Patel, M. R. (2023). Thermodynamic analysis of biochar produced from groundnut shell through slow pyrolysis. *Energy Nexus*, 9, 100177. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100177>
- Rueda, M. P., et al. (2026). *Torrefaction as a post-composting strategy to obtain stabilized organic amendments with liming potential*. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133491>
- Sakhiya, A. K., Anand, A., Aier, I., Vijay, V. K., & Kaushal, P. (2021). Suitability of rice straw for biochar production through slow pyrolysis: Product characterization and thermodynamic analysis. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100818. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100818>
- Savitzky, A., & Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627–1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>
- Soria-Verdugo, A., Cano-Pleite, E., Panahi, A., & Ghoniem, A. F. (2022). Kinetics mechanism of inert and oxidative torrefaction of biomass. *Energy Conversion and Management*, 267, 115892. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115892>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2023). Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2022. Bogotá D.C., Colombia.
- Syguła, E., Łyczko, J., Koziel, J. A., & Białowiec, A. (2025). Furfural release from lignocellulosic biomass biochars: Environmental and health implications. *Industrial Crops and Products*, 237, 122255. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122255>
- Szargut, J., Morris, D. R., & Steward, F. R. (1988). *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. Hemisphere Publishing Corporation.

- Tun, M. M., & Juchelková, D. (2019). *Drying methods for municipal solid waste quality improvement in the developed and developing countries: A review*. *Environmental Engineering Research*, 24(4), 529–542. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.327>
- Van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., & Ptasinski, K. J. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3748–3762. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>
- Wang, C., Peng, J., Li, H., Bi, X. T., Legros, R., Lim, C. J., & Sokhansanj, S. (2013). Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets. *Bioresource Technology*, 127, 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.092>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Yun, H., Kim, H., Lee, J., & Lee, J. (2021). *Identification of suitable biomass torrefaction operation envelopes for auto-thermal operation*. *Frontiers in Energy Research*, 9, 636938. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.636938>