

Determinación del poder calorífico extraído de la biomasa residual forestal proveniente del  
conjunto Villas de Santa Sofia

Angello Camilo Florez Rivera

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Jorge Luis Chacón Velasco

Doctor en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

A Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, que me abre las puertas a nuevas oportunidades.

A mis padres, por su apoyo incondicional y enseñarme que con su ejemplo el valor del esfuerzo, la paciencia y la honestidad se pueden lograr grandes cosas.

A mis hermanos, por mantener siempre el ejemplo de que con perseverancia y la dedicación se pueden lograr cosas excelentes en la vida.

A Ludy Katherine, por enseñarme que la vida siempre es mejor al lado de una persona amorosa, incondicional y comprensiva.

A mis seres queridos, por brindarme el apoyo necesario durante este tiempo de aprendizaje en la Universidad Industrial de Santander.

A Maylo y Zack, por ser fuentes de apoyo emocional en todo momento, demostrando que lo más valioso en la vida es el amor que podemos brindar a los que nos rodean sin importar su situación.

### **Agradecimientos**

Al profesor Jorge Luis por brindarme la orientación en el desarrollo del trabajo de investigación y las herramientas necesarias para resolver un problema de la comunidad desde la ingeniería mecánica.

A la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander por brindarme la formación profesional con las mejores herramientas de aprendizaje, desde la disposición de excelentes docentes hasta una infraestructura dispuesta para aprender.

**Tabla de contenido**

Introducción .....	14
1.Objetivos .....	16
1.1. Objetivo general.....	16
1.2. Objetivos específicos .....	16
2. Marco contextual.....	16
3. Marco teórico .....	18
3.1. Biomasa.....	18
3.2. Biocombustible .....	19
3.2.1. Biocombustibles sólidos .....	19
3.3. Poder calorífico .....	21
4. Metodología .....	21
4.1. Caracterización de la biomasa.....	22
4.1.1. Clasificación de la biomasa.....	22
4.1.2. Selección de la biomasa .....	24
4.2. Muestreo de la biomasa residual forestal .....	25
4.2.1. Proceso de secado de la biomasa .....	25
4.2.2. Proceso de separación en peso de la muestra.....	27
4.2.3. Proceso de triturado de la biomasa .....	28
4.2.4. Proceso de verificación dimensional.....	29

4.3. Determinación del poder calorífico de la biomasa.....	29
4.3.1. Puesta en marcha de la mufla.....	34
4.3.2. Puesta en marcha de la balanza analítica .....	36
4.3.3. Determinación de la humedad.....	36
4.3.4. Determinación de cenizas .....	40
4.3.5. Determinación de material volátil.....	42
4.3.6. Determinación de carbono fijo.....	45
4.3.7. Estimación de la cantidad total de la biomasa residual forestal.....	46
4.4. Tratamiento estadístico .....	48
4.4.1. Media aritmética .....	48
4.4.2. Varianza muestral .....	48
4.4.3. Desviación estándar muestral.....	49
4.4.4. Error estándar muestral .....	50
5. Resultados .....	50
6. Conclusiones .....	52
7. Recomendaciones.....	54
Referencias bibliográficas.....	55
Apéndices.....	57

**Lista de Tablas**

Tabla 1 Tipos de biocombustibles .....	19
Tabla 2 Poder calorífico de diferentes tipos de biomasa .....	20
Tabla 3 Bitácora para descripción del residuo forestal seleccionado .....	24
Tabla 4 Tabla para el seguimiento de secado .....	26

**Lista de Figuras**

Figura 1 Contextualización visual de la disposición del jardín .....	17
Figura 2 Zona de residuos de la urbanización Villas de Santa Sofía .....	18
Figura 3 Zona verde occidental de la urbanización Villas de Santa Sofía.....	23
Figura 4 Báscula gramera digital SF-400 .....	27
Figura 5 Molino mecánico manual .....	28
Figura 6 Mufla eléctrica Terrigeno D8 .....	30
Figura 7 Componentes externos de la mufla eléctrica .....	31
Figura 8 Componentes internos de la mufla eléctrica.....	31
Figura 9 Balanza analítica Pioneer PA224 .....	32
Figura 10 Agente desecante, sílice en gel .....	33
Figura 11 Placa de la mufla eléctrica .....	34
Figura 12 Display de programación de la mufla.....	36

**Lista de Apéndices**

Apéndice 1 Peso por triplicado de los tres crisoles para humedad .....	57
Apéndice 2 Peso de los crisoles con la biomasa procesada para humedad .....	57
Apéndice 3 Primer peso final para humedad .....	58
Apéndice 4 Segundo peso final para humedad .....	58
Apéndice 5 Peso por triplicado de los crisoles para cenizas.....	59
Apéndice 6 Peso de los crisoles con la biomasa procesada para cenizas.....	59
Apéndice 7 Peso final para cenizas .....	60
Apéndice 8 Peso por triplicado de los crisoles para material volátil .....	60
Apéndice 9 Peso de los crisoles con biomasa para material volátil.....	61
Apéndice 10 Peso final para material volátil .....	61
Apéndice 11 Recipiente de recolección para la biomasa forestal .....	62
Apéndice 12 Método de recolección de biomasa.....	62
Apéndice 13 Vista superior del interior del conjunto Villas de Santa Sofía.....	63
Apéndice 14 Bata antifluido .....	64
Apéndice 15 Gafas de protección .....	64
Apéndice 16 Guantes de protección térmica.....	65
Apéndice 17 Pinzas metálicas .....	65
Apéndice 18 Peso crisol para humedad .....	66
Apéndice 19 Peso crisol con biomasa para humedad .....	66
Apéndice 20 Peso final crisol con biomasa para humedad .....	67
Apéndice 21 Peso crisol para cenizas .....	67
Apéndice 22 Peso crisol con biomasa para cenizas .....	68

Apéndice 23 Peso final crisol con biomasa para cenizas .....	68
Apéndice 24 Mufla con crisoles para cenizas .....	69
Apéndice 25 Desecador con crisoles para cenizas .....	69
Apéndice 26 Peso crisol con tapa para volátiles .....	70
Apéndice 27 Peso crisol con tapa y biomasa para volátiles.....	70
Apéndice 28 Mufla con crisol para volátiles .....	71
Apéndice 29 Peso final de crisol con tapa y biomasa para volátiles.....	71
Apéndice 30 Trituración de la muestra con molino manual .....	72
Apéndice 31 Lona de secado .....	72
Apéndice 32 Proceso de secado de la biomasa.....	73
Apéndice 33 Separación por lotes de la biomasa.....	73
Apéndice 34 Pesaje de los lotes de biomasa.....	74
Apéndice 35 Pesaje de los contenedores de biomasa .....	75
Apéndice 36 Pesaje de los recipientes con biomasa residual .....	75
Apéndice 37 Pesaje en vacío de los recipientes.....	76
Apéndice 38 Media aritmética de humedad.....	76
Apéndice 39 Media aritmética de cenizas .....	77
Apéndice 40 Media aritmética de material volátil.....	77
Apéndice 41 Media aritmética de carbono fijo.....	77
Apéndice 42 Media aritmética de HHV.....	78
Apéndice 43 Media aritmética para recipiente de recolección lleno .....	78
Apéndice 44 Media aritmética para recipiente de recolección vacío .....	79
Apéndice 45 Varianza muestral de humedad.....	79

PODER CALORIFICO DE BIOMASA RESIDUAL FORESTAL	10
Apéndice 46 Varianza muestral de cenizas .....	79
Apéndice 47 Varianza muestral de material volátil .....	80
Apéndice 48 Varianza muestral de carbono fijo.....	80
Apéndice 49 Varianza muestral de HHV.....	81
Apéndice 50 Varianza muestral para recipiente de recolección lleno .....	81
Apéndice 51 Varianza muestral para recipiente de recolección vacío .....	81
Apéndice 52 Desviación estándar de humedad .....	82
Apéndice 53 Desviación estándar de cenizas .....	82
Apéndice 54 Desviación estándar de material volátil.....	83
Apéndice 55 Desviación estándar de carbono fijo.....	83
Apéndice 56 Desviación estándar de HHV .....	83
Apéndice 57 Desviación estándar para recipiente de recolección lleno .....	84
Apéndice 58 Desviación estándar para recipiente de recolección vacío .....	84
Apéndice 59 Error estándar de humedad .....	85
Apéndice 60 Error estándar de cenizas .....	85
Apéndice 61 Error estándar de material volátil .....	85
Apéndice 62 Error estándar de carbono fijo .....	86
Apéndice 63 Error estándar de HHV .....	86
Apéndice 64 Error estándar para recipiente de recolección lleno.....	86
Apéndice 65 Error estándar para recipiente de recolección vacío .....	87

## Resumen

**Título:** Determinación del poder calorífico extraído de la biomasa residual forestal proveniente del conjunto Villas de Santa Sofía

**Autor:** Angello Camilo Florez Rivera

**Palabras clave:** Biomasa, poder calorífico superior, combustibles sólidos, residuos lignocelulósicos, energía alternativa.

**Descripción:** En el presente trabajo de se determinó el poder calorífico superior (PSC) de la biomasa residual forestal que se produce en el conjunto residencial Villas de Santa Sofía a partir de la correlación de Parikh, Channiwala y Ghosal, convirtiéndose en una herramienta que permite estimar de manera económica, práctica y con una margen de error del 3,74% la cantidad de energía liberada de combustibles sólidos a partir de una combustión controlada, considerando parámetros como la cantidad de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo presentes en la muestra de estudio.

La importancia de este trabajo de investigación gira en torno al desaprovechamiento que están teniendo los residuos forestales en las unidades residenciales y ciudad en general, dejando de lado la factibilidad de fabricación de materia prima a partir de dichos residuos como fuente de energía alterna.

Esta investigación es relevante en el campo de energías renovables al proponer una fuente de apoyo alternativa en los sistemas que requieren alimentación térmica, en mayor parte calderas de precalentamiento de baja y mediana potencia, ayudando a mitigar el uso de combustibles fósiles como principal fuente de energía.

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón Velasco. PhD en Procesos Termofluidodinámicos Aplicados a MCIA.

### Abstract

**Title:** Determination of the calorific value extracted from forest residual biomass from the Villas de Santa Sofía complex

**Author:** Angello Camilo Florez Rivera

**Key Words:** Biomass, Higher Heating Value, Solid Fuels, Lignocellulosic Residues, Alternative Energy.

**Description:** In the present work, the higher heating value (HHV) of forest residual biomass produced in the residential complex Villas de Santa Sofía was determined using the correlation of Parikh, Channiwala, and Ghosal, becoming a tool that allows estimating, in an economical and practical way, and with a margin of error of 3.74%, the amount of energy released from solid fuels through controlled combustion, considering parameters such as moisture content, ash, volatile matter, and fixed carbon present in the study sample.

The importance of this research lies in the underutilization of forest residues in residential units and in the city in general, disregarding the feasibility of producing raw material from these residues as an alternative energy source.

This research is relevant in the field of renewable energies by proposing an alternative support source in systems that require thermal input, mainly low- and medium-power preheating boilers, helping to mitigate the use of fossil fuels as the main energy source.

\* Degree work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Advisor: Jorge Luis Chacón Velasco. PhD in Thermofluid Dynamic Processes Applied to ICE.

## Glosario

**Biocombustible:** Los biocombustibles son utilizados desde la época en que la humanidad descubrió como hacer fuego y se dividen en dos generaciones, la primera son los que se producen a partir de aceites o azúcares comestibles provenientes de plantas dulces y los de segunda son producidos a partir de materia prima no aprovechable para la alimentación humana, tales como residuos forestales y agrícolas (Ramos, 2016).

**Biomasa forestal:** la biomasa forestal está constituida principalmente por hojas, tallos, ramas, raíces, raíces de un ecosistema forestal que transforme la energía solar a partir de la fotosíntesis y representa una buena viabilidad para el estudio de energías renovables (Russo, 2009).

**Energía renovable:** la energía renovable es aquella que se produce de forma continua y es inagotable, aunque para materia como biomasa depende de un ciclo natural. Las principales fuentes de energía renovable son la eólica, solar, biomasa, biocarburantes, hidráulica, geotérmica y marítima (Merino, 2012).

**Materia lignocelulósica:** la materia lignocelulósica está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, representado un 70% como fuente de energía renovable dado a su favorable conversión energética a partir de la combustión (Gorozabel, 2022).

**Poder calorífico Superior:** Es la cantidad de energía liberada por materia sometida a una combustión controlada y parámetros ambientales, este valor se determina en laboratorios acondicionados para realizar estos procedimientos (Aguero, 2004).

## **Introducción**

En 2013 a nivel global el consumo de energías alternativas abarca aproximadamente un 19%, del cual un 9.1% corresponde a la biomasa, esto ha aumentado exponencialmente en los últimos años por el riesgo ambiental que conlleva utilizar combustibles fósiles tanto en el sector industrial como en la cotidianidad de la humanidad (Algarin, 2018).

Una de las causas más importantes que provocan el desaprovechamiento de estos residuos sólidos es la mala gestión administrativa en los proyectos destinados a la investigación de tratamiento energético proveniente de biomasa residual.

A nivel social es importante generar una conciencia ambiental en la sociedad ya que está directamente asociada a los efectos de estos procesos investigativos y de proyección.

El estudio para llegar a una correlación entre el poder calorífico superior y el análisis próximo de combustibles sólidos (Parikh, 2004) se lleva a cabo en instituciones académicas de la India, permitiendo desarrollar una herramienta práctica y confiable, con un error del 3.74%, cuando se quiere estudiar materiales lignocelulósicos.

Por otra parte, el diseño y construcción de un biodigestor anaeróbico para el aprovechamiento de biomasa (Pérez, 2012) muestra la viabilidad para procesarla como materia prima y así ayudar a la producción de energía renovable a nivel social resaltando áreas de potencial aprovechamiento como zonas rurales y escolares.

La orientación del este trabajo de investigación tiene como objetivo determinar el potencial calorífico de la biomasa forestal proveniente de una zona residencial, con el fin de estimular la perspectiva del aprovechamiento de biocombustibles.

La bioenergía proviene de recursos que están ligados a ciclos naturales, por lo cual el aprovechamiento de biomasa residual se podría trabajar en permanente operación. Aunque en el oriente colombiano no se aprovechan estos recursos lo vemos particularmente implementado en zonas no interconectadas (Pérez, 2012).

En cuanto a los residuos forestales que se pueden generar en una zona residencial dependen directamente de la proporción en cantidad de vegetación de esta y su relevancia energética en el desarrollo sostenible y renovable toma una importancia ante el decaimiento de las fuentes de combustibles fósiles, (López et al. ,2008) afirman:

“El camino hacia un desarrollo sostenible y de renovabilidad de los recursos pasa por la búsqueda/utilización de nuevas fuentes de recursos, productos químicos y de consumo, donde la biomasa y en particular la biomasa lignocelulósica, se releva como una fuente necesaria de materias primas dada su ubicuidad, disponibilidad y carácter poco contaminante”.

Con todos estos precedentes se hace viable la implementación del tratamiento de biomasa residual como alternativa a los combustibles fósiles o a base de carbono, cabe recalcar que esta investigación aporta una relevancia fundamentada en el desarrollo paulatino de una sociedad consciente de la favorabilidad de energías alternativas.

La máxima energía liberada por la muestra de biomasa recolectada y tratada de la urbanización Villas de Santa Sofia debe ser aproximadamente un valor cercano a los proyectos de investigación de apoyo en este análisis y la publicación A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels por Jigisha Parikh, S.A. Channiwala, G.K. Ghosal (Parikh, 2004), ya que pueden influir factores tanto físicos, químicos, humanos, entre otros.

Los efectos de desarrollo con este trabajo de investigación se esperan ser de carácter positivo en la comunidad, ya que es un ejemplo del desaprovechamiento de residuos como materia implementable en el sector energético de carácter residencial.

## **1. Objetivos**

### **1.1.Objetivo general**

Estimar el poder calorífico que podemos extraer de una muestra de biomasa residual forestal mediante combustión.

### **1.2.Objetivos específicos**

Clasificar la biomasa forestal a tratar, proveniente del conjunto villas de santa Sofia.

Caracterizar la muestra de laboratorio de la biomasa forestal tomando como referencia la norma UNE-EN ISO 18135 de febrero del 2018.

Determinar el poder calorífico superior de la muestra de biomasa empleando la correlación de Parikh, Chaniwala y Ghosal.

## **2. Marco contextual**

El conjunto residencial Villas de Santa Sofía es una urbanización de propiedad horizontal con un aproximado de 231 casas. Cada casa cuenta con su jardín de 10 metros cuadrados, donde en su mayoría están situados arboles como el caracolí, pino, sansevieria, corona de cristo, aloe vero, hibisco, pervinca, crotón, entre otros. Las zonas verdes juntas cuentan con un espacio aproximado de 240 metros cuadrados, en los cuales se pueden encontrar arboles como el gusanero, azuceno, gualanday, guayacan, olivo negro, acacia roja, moraceae, jaboncillo, aguacate y camajón (Gómez E. H.).

**Figura 1**

*Contextualización visual de la disposición del jardín*



*Nota.* La figura representa la ubicación espacial del jardín de cada casa y en ella la vegetación que contiene. Tomada del autor.

La recolección de estos residuos forestales está dirigida por una empresa privada que es contratada por la actual administración de la urbanización, y depositada en las zonas de residuos designada por las normas de aseo según el acuerdo 605 de 1996 del gobierno nacional, artículo 18. (Gómez L. , 1999).

**Figura 2**

*Zona de residuos de la urbanización Villas de Santa Sofía*



*Nota.* La figura 2 muestra la zona de residuos designada por la urbanización villas de Santa Sofía. Tomada por el autor.

### 3. Marco teórico

#### 3.1. Biomasa

La biomasa comprende un conjunto heterogéneo de materia orgánica, partiéndose de su origen o su naturaleza. La biomasa tiene relevancia como energía renovable ya que su contenido energético procede de la energía solar suministrada en el proceso fotosintético. El metano ( $\text{CH}_4$ ) proveniente de esta materia tiene como fin romper sus enlaces por combustión para la obtención de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), por lo cual los derivados de estos procesos los llamamos biocombustibles, permitiéndose clasificarlos según su estado físico.

**3.2. Biocombustible**

El biocombustible es una alternativa claramente ideal para el aprovechamiento de recursos renovables provenientes del proceso biológico de materia orgánica originada de organismos recientemente vivos, lo cual se conoce como biomasa. (Callejas, 2009) A partir de esta se pueden obtener una serie de combustibles sólidos, gaseosos y líquidos, que se adaptan muy bien como alternativa de los combustibles a base de carbono, cubriendo necesidades de comodidad, transporte, industria, electricidad o materia prima (Fernandez, 2003).

**Tabla 1**

*Tipos de biocombustibles*

<b>Tipos de biocombustibles</b>		
Sólidos	Líquidos	Gaseosos
Paja	Alcoholes	Gasógeno
Leña sin procesar	Biohidrocarburos	Biogas
Astillas	Aceites vegetales	Hidrógeno
Briquetas <sup>1</sup> y pellets <sup>2</sup>	Ésteres derivados de	
Triturados finos	aceites vegetales	
Carbón vegetal	Aceites de pirolisis	

*Nota.* La tabla representa los tipos de biocombustibles según su estado físico. Tomado de Callejas, E. S., & Quezada, V. G. (2009). Los biocombustibles. El cotidiano, (157), 75-82.

**3.2.1. Biocombustibles sólidos**

Dentro de los biocombustibles fósiles se pueden encontrar los de tipo primario, compuestos de materia lignocelulósica que proviene de los residuos forestales, como la leña, cortezas y restos de poda son tipos de materia típica para la elaboración de estos biocombustibles sólidos.

El uso moderno energético de biocombustibles solidos conlleva un acondicionamiento especial. Dentro de las formas más generales de este tipo de combustibles podemos encontrar las astillas, serrín, residuos de tala forestal y pelets.

**Tabla 2**

*Poder calorífico de diferentes tipos de biomasa*

Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa				
TIPO DE BIOMASA	PCI			PCS
<i>Contenido en humedad (%)</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>0</i>
<b>RESTOS DE CULTIVOS HERBÁCEOS</b>				
■ Paja de cereales	4060	3630	3300	4420
■ Tallos de girasol	3700	3310	3090	4060
<i>Contenido en humedad (%)</i>	<i>0</i>	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>0</i>
<b>RESTOS DE CULTIVOS LEÑOSOS</b>				
■ Sarmientos de vid	4200	3280	2310	4560
■ Ramas de poda del olivo	4240	3190	2135	4600
<i>Contenido en humedad (%)</i>	<i>0</i>	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>0</i>
<b>RESIDUOS FORESTALES</b>				
■ Leñas y ramas				
■ Coníferas	4590	3590	2550	4950
■ Frondosas	4240	3310	2340	4600
■ Cortezas				
■ Coníferas	4670	3650	2650	5030
■ Frondosas	4310	3370	2380	4670
<i>Contenido en humedad (%)</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>0</i>
<b>RESTOS DE AGROINDUSTRIAS</b>				
■ Cáscara de Almendra	4400	3940	3690	4760
■ Cáscara de Avellana	4140	3710	3470	4500
■ Cáscara de Piñón		4570	4090	3830 4930
■ Cáscara de Cacahuete	3890	3480	3260	4250
■ Cascarilla de arroz		3770	3370	3150 4130
<i>Contenido en humedad (%)</i>	<i>0</i>	<i>15</i>	<i>35</i>	<i>0</i>
<b>RESTOS DE INDUSTRIAS FORESTALES Serrines y virutas</b>				
■ Coníferas	4880	4520	3796	4880
■ Frondosas de clima templado	4630	4270	3580	4630
■ Frondosas tropicales	4870	4520	3780	4870

*PCS: poder calorífico superior (en kcal/kg)*  
*PCI: poder calorífico inferior (en kcal/kg).*

*Fuente: Elaboración del autor*

*Nota.* La tabla muestra el poder calorífico inferior y superior, que el máximo poder calorífico que podemos obtener de este tipo de biocombustibles. Tomado de Energía de la biomasa, por Jesus Fernandez (2003), IBERDROLA.

A partir de la biomasa forestal se pueden extraer distintos tipos de biocombustibles, entre ellos sólidos, líquidos y gaseosos, de esto depende el pretratamiento al cual se le aplicando para su aprovechamiento.

### 3.3. Poder calorífico

El poder calorífico es la cantidad de energía liberada por unidad de masa, este puede clasificarse en dos tipos, el poder calorífico inferior (PCI) y el poder calorífico superior (PCS).

El poder calorífico inferior es la cantidad de energía liberada por un combustible sin tener en cuenta el calor latente que genera el agua producida por la combustión cuando se condensa nuevamente al estado líquido. En cambio, el poder calorífico superior es la máxima cantidad de energía liberada por un combustible cuando se quema por completo, incluyendo el calor latente de la vaporización del agua producida por la combustión.

Parikh en la publicación *A correlation for calculating HHV from proximate analysis* presenta una correlación para la determinación del poder calorífico superior que se puede obtener a partir del análisis próximo que se le puede realizar a cualquier tipo de biomasa y combustibles derivados de residuos.

$$HHV = 0.3536 * FC + 0.1559 * VM - 0.0078 * ASH \left[ \frac{MJ}{Kg} \right] \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde *HHV* es el poder calorífico superior, *FC* es la cantidad porcentual de carbono fijo, *VM* es la cantidad porcentual de material volátil y *ASH* es la cantidad porcentual de cenizas de la muestra de biomasa. El error promedio de la correlación es de 3.74% y el error de sesgo es de 0.12%, lo cual es considerablemente bajo, con respecto a los valores de poder calorífico de referencia y además favorece una estimación de manera sencilla, rápida y económica (Algarin, 2018) (Pérez, 2012) (López, 2008) (Gómez) (Gómez L. , 1999) (Fernandez, 2003).

## 4. Metodología

El desarrollo del presente proyecto tiene una metodología con alcance investigativo, de tal manera que se puedan medir las variables que esperamos analizar para así determinar el grado de

energía calórica que podamos extraer de la biomasa residual forestal de la urbanización Villas de Santa Sofia.

#### **4.1. Caracterización de la biomasa**

Para la caracterización de la biomasa residual forestal se tiene en cuenta factores de recolección y selección para conducir un análisis más específico en cuanto a la aleatoriedad de sus posibles componentes.

##### ***4.1.1. Clasificación de la biomasa***

Mediante sondeos manuales, a partir de permisos solicitados a la administración actual de la urbanización Villas de Santa Sofia, se debe clasificar la biomasa residual forestal a partir de su peso por división de lotes, método e instrumentos de recolección, frecuencia de recolección, zona de recolección y tiempo promedio de almacenamiento.

La composición de la biomasa residual forestal va directamente relacionada con las variables anteriormente mencionadas, por ende, se hace necesario anexar un espacio de observaciones para tener en cuenta factores secundarios.

La clasificación de la biomasa está ligada principalmente a la zona de recolección y la tarea que ejerce el operario encargado de la recolección, ya que no solo se desempeñan tareas de limpieza para los residuos decaídos, sino también para los restos de poda con un fin estético, la cual en mayoría esta aun verde.

En el Apéndice 13 se muestra la vista superior del interior de la unidad residencial Villas de Santa Sofía junto a sus divisiones cardinales, dividiendo las 8 zonas de la siguiente manera:

- A. Zona Norte: Casas residentes con jardín
- B. Zona Noreste: Lindero con vegetación de la unidad residencial

- C. Zona Este: Lindero con vegetación de la unidad residencial
- D. Zona Sureste: Casas residentes con jardín
- E. Zona Sur: Casas residentes con jardín
- F. Zona Suroeste: Zona verde y lindero con vegetación de la unidad residencial
- G. Zona Oeste: Casas residentes con jardín
- H. Zona Noroeste: Casas residentes con jardín

### **Figura 3**

*Zona verde occidental de la urbanización Villas de Santa Sofía*



*Nota.* La figura muestra una de las zonas de vegetación que se encuentra en la parte occidental de la urbanización. Tomado por el autor.

**4.1.2. Selección de la biomasa**

En la selección de la biomasa se debe seguir un esquema en base a la zona de recolección, especificando el tipo de residuo (hojas, tallos, restos de poda, viruta, entre otros), la tarea por la cual fue obtenido (poda estética, recolección del suelo) y la descripción de su estado físico.

En la Tabla 3 se muestra la bitácora de recolección de datos en donde se incluyen los factores físicos mencionados anteriormente, este trabajo se llevó a cabo en la semana del 1 de julio al 2 de agosto del 2025 junto con los trabajadores a cargo de la recolección vinculados a la empresa Nacional de Servicios.

**Tabla 3**

*Bitácora para descripción del residuo forestal seleccionado*

<b>Zona de recolección</b>	<b>Tipo de residuo</b>	<b>Tarea de recolección</b>	<b>Descripción del residuo</b>
Zona Este	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad
Zona Suroeste	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad
Zona Sureste	Hojas y restos de tallos	Poda estética	Fibroso, alta humedad
Zona Sur	Hojas y restos de tallos	Poda estética	Fibroso, alta humedad
Zona Noreste	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad
Zona Norte	Hojas y restos de tallos	Poda estética	Fibroso, alta humedad
Zona Noroeste	Hojas y restos de tallos	Poda estética	Fibroso, alta humedad
Zona Oeste	Hojas y restos de tallos	Poda estética	Fibroso, alta humedad
Zona Noreste	Hojas y restos de tallos	Poda estética	Fibroso, alta humedad
Zona Sureste	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad
Zona Norte	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad
Zona Noroeste	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad
Zona Oeste	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad
Zona Suroeste	Hojas y restos de tallos	Poda estética	Fibroso, alta humedad
Zona Norte	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad
Zona Noroeste	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad
Zona Oeste	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad
Zona Sureste	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad
Zona Este	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad
Zona Suroeste	Hojas	Recolección de suelo	Fragil, poca humedad

*Nota.* En la tabla se contempla la descripción de la biomasa forestar residual seleccionada para el análisis de su poder calorífico. Tabla realizada por el autor.

#### **4.2.Muestreo de la biomasa residual forestal**

El muestreo que mejor satisface el principio de la correcta toma de muestras es el que está en constante movimiento, como por ejemplo en bandas transportadoras, en tornillos sin fin o en cualquier mecanismo mecánico de transporte de materia orgánica.

Para nuestro proyecto el lote de investigación está en estado estacionario, ya que se hace poco práctico implementar un mecanismo de transporte para mejorar los índices de muestreo, por lo cual se recomienda seguir la norma española UNE-EN ISO 18135 de febrero 2018, Biocombustibles sólidos Muestreo, sección 12 (Toma de muestras en la práctica).

En el Apéndice 12 se muestra el método de muestreo manual siguiendo la norma española UNE-EN ISO 18135, recolectando de cada recipiente de almacenamiento una muestra no superior a 50 kilogramos. Para garantizar la aleatoriedad de selección en el lote se debe realizar este proceso al menos 2 veces por semana durante un mínimo de 2 semanas, es decir por lo menos se debe tener disponible 4 muestreos manuales para el proceso de secado.

##### ***4.2.1. Proceso de secado de la biomasa***

El proceso de secado consiste en extender la materia recolectada, seleccionada y muestreada mediante la norma española UNE-EN ISO 18135 sobre una lona protectora de material impermeable para asegurar la separación con residuos del ambiente en el que se encuentre, sobre esas primeras dos capas se extenderá un plástico negro, estirado con estacas y cuerda, entre estos dos materiales de protección debe existir un espacio de al menos 10 centímetros para asegurar el flujo de aire para la biomasa, este proceso debe ser controlado por un esquema, especificando las

horas al día que pasa expuesto al sol durante el día. El tiempo secado depende del tipo de residuo forestal seleccionado, para ello debemos dejarlo expuesto al menos 70 horas en total.

En el Apéndice 32 se puede observar como el método de secado es realizado, asegurando los lineamientos anteriormente mencionados para satisfacer la norma española UNE-EN ISO 18135 para ser almacenado posteriormente en un recipiente plástico hermético con el propósito de evitar ganancias o pérdidas de masa de la biomasa residual forestal.

En la Tabla 4 se muestra la recopilación de las horas de exposición al sol de la biomasa residual forestal recolectada y dispuesta bajo las condiciones anteriormente mencionadas con el fin de reducir la humedad y la rigidez de la fibra vegetal para facilitar el proceso de acondicionamiento de la muestra para el análisis. La máxima temperatura promedio entre este ciclo de secado fue alrededor de los 27 °C, estos datos fueron recopilados del aplicativo web AccuWeather (AccuWeather, 2025) para la ciudad de Bucaramanga en los meses junio, julio y agosto del año 2025.

**Tabla 4**

*Tabla para el seguimiento de secado*

<b>Tiempo de exposición [h/día]</b>	<b>Descripción</b>
9	Fribroso, pierde humedad
8	Perdiendo turgencia y humedad
9	Quebradiza, perdiendo humedad
9	Fragil, cambio de coloración
9	Fragil, poca humedad
7	Fragil, poca humedad
8	Fragil, poca humedad
8	Fragil, poca humedad
8	Fragil, poca humedad

*Nota.* En esta tabla se describe en cantidad las horas que pasa la biomasa muestreada extendida sobre la lona al día expuesta a la radiación solar. Tabla realizada por el autor.

En el Apéndice 31 se puede ver la disposición del secado de la biomasa residual forestal, garantizando el flujo de aire en su interior y regado sobre un material plástico para garantizar la no variabilidad de masa en ganancia.

#### ***4.2.2. Proceso de separación en peso de la muestra***

Una vez el proceso de secado haya culminado, se debe seguir a la separación por lotes para el adecuamiento y posterior análisis de la muestra, se deben separar con una báscula gramera de laboratorio SF-400 por un peso no mayor a 100 gramos, la cual la podemos apreciar de manera más precisa en la Figura 4, separados del resto con aleatoriedad y una pala pequeña, y empacado en bolsas herméticas, este proceso debe tener al menos 3 muestras.

En el Apéndice 33 se observa cómo el proceso de separación de muestras es realizado almacenándolo en bolsas transparentes herméticas, las cuales son apartadas del resto de materia prima para someterla posteriormente al proceso de trituración y garantizar su acondicionamiento para el análisis.

#### **Figura 4**

*Báscula gramera digital SF-400*



*Nota. La figura representa la báscula gramera digital con la cual se realizará el proceso de separación por lotes antes del adecuamiento para su análisis calorimétrico.*

En el Apéndice 34 se muestra el método de pesaje de los lotes separados menores a 100 gramos dispuestos en bolsas herméticas.

#### **4.2.3. Proceso de triturado de la biomasa**

La trituración de la muestra separada por lotes se hace mediante un molino mecánico manual que se encuentra en el laboratorio de combustión de la escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad Industrial de Santander sede principal, este nos puede otorgar un margen dimensional de la viruta no mayor a 1 milímetro según sea su ajuste, la muestra debe llevarse totalmente seca, separada por peso y en bolsas herméticas.

En el Apéndice 30 se muestra cómo se realiza el proceso de trituración de la biomasa residual forestal con el margen máximo del molino manual para garantizar la mínima dimensión de viruta.

#### **Figura 5**

*Molino mecánico manual*



*Nota. La figura representa una de las herramientas mediante la cual se realiza la trituración de la biomasa residual forestal seca. Tomada de la página web Victoria.com.co en su sección de productos.*

#### **4.2.4. Proceso de verificación dimensional**

Seguido al proceso de trituración se hace la verificación dimensional a una muestra de cada lote, este proceso se puede llevar a cabo con un tamiz de filtrado con un rango máximo de 1 milímetro en su máxima medida.

#### **4.3.Determinación del poder calorífico de la biomasa**

Las estimaciones de poder calorífico superior, que es la máxima cantidad de energía liberada por un combustible sólido, se realizan utilizando la correlación de Parikh et al, Ecuación 1, por lo cual se debe calcular la cantidad porcentual de humedad según la norma ASTM E871, la cantidad porcentual de cenizas según la norma ASTM E1755, la cantidad porcentual de material volátil según la norma ASTM E872 y la cantidad porcentual de carbono fijo según la norma ASTM D3172 de la muestra de biomasa residual forestal, utilizando la mufla de marca Terrigeno y modelo D8 dispuesta en el laboratorio de combustión de la Universidad Industrial de Santander sede principal.

**Figura 6***Mufla eléctrica Terrigeno D8*

*Nota. La figura representa la mufla eléctrica mediante la cual se realizará el análisis próximo para la estimación del poder calorífico de nuestra muestra de biomasa residual forestal.*

*Tomada del Autor.*

En las Figuras 7 y 8 se muestran las partes de la mufla eléctrica A) Perilla para asegurar la compuerta de la Mufla, B) Compuerta de la mufla, C) Controlador para la programación de la mufla, D) Perilla de encendido, E) Resistencia de la mufla. El equipo consta también de un sistema para suministro de energía eléctrica de 220 Voltios.

**Figura 7**

*Componentes externos de la mufla eléctrica*



*Nota. La figura representa las partes externas numeradas de una mufla eléctrica. Tomada del autor*

**Figura 8**

*Componentes internos de la mufla eléctrica*



*Nota. La figura representa las partes internas numeradas de una mufla eléctrica. Tomada de Terrigeno, sección productos.*

Los registros de peso en el análisis próximo deben tener una resolución de al menos 0.001 gramos, para ello se utiliza la balanza analítica marca Pioneer y modelo PA224, la cual se puede ver en la Figura 9, dispuesta en el laboratorio de combustión de la Universidad Industrial de Santander sede principal.

### **Figura 9**

*Balanza analítica Pioneer PA224*



*Nota. La figura representa la balanza analítica con la cual serán registrados los pesos.*

*Tomada del autor.*

Las medidas de seguridad y protección personal del laboratorio son las siguientes:

- A. Utilizar bata antifluido, pantalón y zapato cerrado.
- B. Utilizar gafas de seguridad cuando se esté utilizando la mufla eléctrica

C. Utilizar las pinzas metálicas para manipular los recipientes dentro y posterior a la prueba en la mufla.

D. Utilizar guantes de protección térmica cuando se esté realizando una prueba en la mufla eléctrica.

E. Se debe activar el sistema de evacuación de gases del laboratorio cuando se encuentre en funcionamiento la mufla eléctrica.

En los Apéndices 14, 15, 16 y 17 se muestran los elementos de seguridad requeridos para la correcta operación del laboratorio de combustión.

El desecador que se utiliza en las normas para el análisis próximo consta de un agente desecante, en este caso sílice en gel que se encuentra dispuesto en el laboratorio de combustión de la Universidad Industrial de Santander sede principal y un recipiente plástico con tapa para mantener las condiciones en su interior.

### **Figura 10**

*Agente desecante, sílice en gel*



*Nota. La figura representa el agente desecante que se utiliza para el análisis próximo.*

*Tomada del autor*

#### **4.3.1. Puesta en marcha de la mufla**

Se realiza una verificación previa al manejo del equipo, para ello se requiere mantenerlo en una superficie estable, con las condiciones de seguridad y ambiente apropiadas, además garantizar que la mufla se encuentre libre de residuos en su cámara interior. Las especificaciones técnicas de la mufla eléctrica se pueden apreciar en la Figura 11.

### **Figura 11**

*Placa de la mufla eléctrica*



*Nota. La figura representa la placa de información técnica de la mufla eléctrica. Tomada del autor*

La programación de la mufla una vez haya sido conectada se realiza mediante el controlador MC5438 como se puede ver en la Figura 12 y se opera de la siguiente manera:

A. Gire la perilla de encendido de la mufla hacia la posición ON y verificar que el bombillo verde este encendido, esto significa que la corriente es estable.

B. Mantenemos oprimido el botón F/S por dos segundos hasta que aparezca la palabra User en el display de programación

C. Oprimimos el botón de flecha izquierda hasta que la palabra User en el display de programación comience a ser intermitente.

D. Oprimimos el botón de flecha arriba hasta que aparezca en el display de programación la palabra ProG e inmediatamente dejamos sostenido el botón F/S hasta que aparezca la palabra SEG en el display de programación.

E. Presionamos el botón F/S hasta que aparezca en el display de programación la palabra EndS, esta es la cantidad de rampas de temperatura que vamos a utilizar en cada prueba.

F. Presionamos el botón F/S hasta que aparezca en el display de programación la palabra Su1, este es el tiempo de sostenimiento posterior a la rampa de temperatura.

G. Los valores de sostenimiento y rampas se pueden modificar presionando el botón de flecha izquierda y luego variamos los valores con los botones arriba y abajo.

H. Para iniciar la programación mantenemos sostenido el botón flecha arriba hasta que comience a encender la luz roja (horno).

I. Para cancelar el protocolo se mantiene presionado el botón flecha abajo y luego el botón F/S.

**Figura 12**

*Display de programación de la mufla*



*Nota. La figura representa el display de programación de la mufla eléctrica. Tomada del autor.*

**4.3.2. Puesta en marcha de la balanza analítica**

Se realiza una inspección visual del equipo, garantizando que se encuentre en una superficie estable y libre de residuos en su interior. Las especificaciones técnicas de la balanza analítica se pueden ver en la Figura 13.

- A. Encienda el equipo una vez haya garantizado las condiciones apropiadas para su uso.
- B. Espere a que el equipo haya estabilizado, para ello debe esperar por lo menos 10 segundos para su uso.

**4.3.3. Determinación de la humedad**

Para determinar la cantidad de humedad de la muestra de biomasa residual forestal se toma como referencia el procedimiento establecido en la norma ASTM 8E71.

### A. Resumen del ensayo

El porcentaje de humedad de la muestra de biomasa residual forestal se determina a partir de la pérdida de masa que experimenta bajo unas condiciones controladas de temperatura, tiempo y ambiente.

### B. Equipos y materiales

Mufla eléctrica

Crisoles de porcelana

Pinzas metálicas

Balanza analítica con precisión de 0,01 gramos

Elementos de protección y seguridad personal

Desecador

### C. Procedimiento

Se programa la mufla para introducir el crisol durante 30 minutos a  $103^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y garantizar el acondicionamiento del recipiente, se toma como referencia la rampa de calentamiento de humedad para alcanzar la temperatura de trabajo.

Se introduce el crisol inmediatamente ha salido de la mufla en el desecador hasta temperatura ambiente para minimizar la ganancia de humedad del recipiente.

En el Apéndice 18 se muestra el pesaje del crisol en la balanza analítica posterior al tratamiento térmico para su acondicionamiento.

Se pesa en la balanza analítica el crisol y se registra el peso como  $W_{ch}$  (masa del crisol) con una precisión de 0,01 gramos.

En el Apéndice 1 se muestran los siguientes resultados registrados para el peso de los crisoles.

$$W_{ch_1} = 27.5629 [g]$$

$$W_{ch_2} = 26.1270 [g]$$

$$W_{ch_3} = 27.0002 [g]$$

Se coloca la muestra de biomasa residual forestal en el recipiente y se registra el peso de la balanza analítica como  $W_{ih}$  (masa inicial).

En el Apéndice 2 se muestran los siguientes resultados para el peso de los crisoles con la biomasa residual forestal procesada y en el Apéndice 19 se muestra el crisol dentro de la balanza analítica.

$$W_{ih_1} = 33.5280 [g]$$

$$W_{ih_2} = 32.4593 [g]$$

$$W_{ih_3} = 33.7345 [g]$$

Se programa la mufla para introducir el crisol durante 16 horas a  $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , se toma como referencia la rampa de calentamiento de humedad.

Se retira la muestra de la mufla y se pasa al desecador hasta temperatura ambiente.

Se pasa la muestra a la balanza analítica y se registra como  $W'_{fh}$  (primera masa final) con una precisión de 0,01 gramos.

En el Apéndice 3 se muestran los datos registrados para la primera masa final posterior al tratamiento térmico en la mufla para la determinación de la humedad de la muestra y en el Apéndice 20 se muestra el pesaje del crisol en la balanza analítica.

$$W'_{fh_1} = 32.5592 [g]$$

$$W'_{fh_2} = 31.5639 [g]$$

$$W'_{fh_3} = 32.8537 [g]$$

Se repite el proceso de estimación de humedad sin tener en cuenta la preparación del recipiente cambiando la duración en temperatura de trabajo por 2 horas hasta que la diferencia entre masas sea menor al 0.2%, se registra este último como  $W_{fh}$  (masa final).

En el Apéndice 4 se muestran los datos registrados para la masa final de los crisoles con la biomasa procesada posterior al tratamiento térmico en la mufla para la determinación de la humedad de la muestra.

$$W_{fh_1} = 32.5550 [g]$$

$$W_{fh_2} = 31.5540 [g]$$

$$W_{fh_3} = 32.8375 [g]$$

$$\text{Diferencia promedio entre masas} = 0.0310\%$$

#### D. Cálculos

El contenido de humedad de la muestra se determina a partir de la siguiente expresión:

$$\%H = \left( \frac{W_{ih} [g] - W_{fh} [g]}{W_{ih} [g] - W_{ch} [g]} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde  $\%H$  es el porcentaje de humedad de la muestra de biomasa residual forestal.

#### 4.3.4. *Determinación de cenizas*

Para determinar la cantidad de cenizas, en porcentaje, de la muestra de biomasa residual forestal se toma la norma ASTM E1755 como referencia.

##### A. Resumen del ensayo

Este ensayo busca determinar la cantidad de cenizas, expresada en porcentaje de masa residual posterior a la oxidación en seco, de residuos agrícolas como la biomasa residual forestal.

##### B. Equipos y materiales

Crisoles para calcinación

Balanza analítica con precisión de 0.01 gramos

Desecador

Pinzas metálicas

Mufla

Elementos de protección y seguridad personal

##### C. Procedimiento

Se programa la mufla para introducir el crisol durante 60 minutos a  $575^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$  y garantizar el acondicionamiento del recipiente.

Se traslada el crisol inmediatamente ha salido de la mufla dentro del desecador hasta temperatura ambiente para minimizar la ganancia de humedad del recipiente.

Se pesa en la balanza analítica el crisol y se registra el peso como  $W_{cont}$  (masa tara del crisol) con una precisión de 0,01 gramos.

En el apéndice 5 se muestran los resultados registrados de los crisoles posterior a su acondicionamiento y en el Apéndice 21 se muestra como el crisol es introducido a la balanza analítica.

$$W_{cont_1} = 26.8233 [g]$$

$$W_{cont_2} = 26.2424 [g]$$

$$W_{cont_3} = 24.7320 [g]$$

Repetir los pasos anteriores hasta que la variación de la masa del crisol sea inferior a 0.3 mg.

Se introduce la muestra de biomasa residual procesada al crisol y se registra el peso desde la balanza analítica como  $m_{od}$  (masa inicial) con una precisión de 0.01 gramos.

En el apéndice 6 se muestra el registro de datos de los crisoles con la biomasa procesada para ingresar al tratamiento térmico en la mufla y en el Apéndice 22 se muestra como el crisol con la biomasa son introducidos a la balanza analítica.

$$m_{od_1} = 31.9864 [g]$$

$$m_{od_2} = 32.9668 [g]$$

$$m_{od_3} = 30.1877 [g]$$

Se programa la mufla para calentar la el crisol a 250°C a una tasa de 10 K/min y mantener durante 30 minutos para evitar llamas, posteriormente el recipiente debe someterse durante 3 horas a 575 °C ± 25°C, se toma como referencia la rampa de calentamiento anterior. En el Apéndice 24 se muestra como los crisoles son introducidos en la mufla para el tratamiento térmico y en el Apéndice 25 se muestra como son introducidos al desecador.

Se retira la muestra de la mufla y se pasa al desecador hasta temperatura ambiente.

Se pasa la muestra a la balanza analítica y se registra como  $m_{ash}$  (masa del contenedor más cenizas) con una precisión de 0,01 gramos.

En el Apéndice 7 se muestra el registro de los crisoles posterior al tratamiento térmico que recibieron en la mufla para la determinación de la cantidad de cenizas y en el Apéndice 23 se muestra como es introducido el crisol en la balanza analítica.

$$m_{ash_1} = 27.5637 [g]$$

$$m_{ash_2} = 26.9594 [g]$$

$$m_{ash_3} = 25.5348 [g]$$

#### D. Cálculos

El contenido de cenizas de la muestra se determina a partir de la siguiente expresión:

$$\%C = \left( \frac{m_{ash} - m_{cont}}{m_{od} - m_{cont}} \right) \times 100 \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde  $\%C$  es el contenido de cenizas, en porcentaje, de la muestra de biomasa residual forestal.

#### ***4.3.5. Determinación de material volátil***

Para determinar la cantidad de material volátil de la muestra de biomasa residual forestal se toma como referencia el procedimiento establecido en la norma ASTM D3175.

#### A. Resumen del ensayo

La cantidad de material volátil en la muestra de biomasa se determina en relación a la pérdida de peso que experimenta bajo unas condiciones controladas de temperatura, tiempo y ambiente, corregida por su contenido de humedad calculado según la norma ASTM E871.

#### B. Equipos y materiales

Mufla eléctrica

Crisoles de porcelana con tapa

Pinzas metálicas

Balanza analítica con precisión de 0,01 gramos

Elementos de protección y seguridad personal

Desecador

#### C. Procedimiento

Se programa la mufla para introducir el crisol con tapa durante 30 minutos a  $103^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y garantizar el acondicionamiento del recipiente, se toma como referencia la rampa de calentamiento utilizada en la determinación de la cantidad de humedad de la muestra para alcanzar la temperatura de trabajo.

Se introduce el crisol con tapa inmediatamente ha salido de la mufla en el desecador hasta temperatura ambiente para minimizar la ganancia de humedad del recipiente.

Se pesa en la balanza analítica el crisol y se registra el peso como  $W_{cv}$  (masa del crisol) con una precisión de 0,01 gramos.

En el Apéndice 8 se muestra el registro de datos de los crisoles junto con la tapa posterior a su acondicionamiento y en el Apéndice 26 se muestra como es introducido el crisol en la balanza analítica.

$$W_{cv_1} = 36.8106 [g]$$

$$W_{cv_2} = 34.0939 [g]$$

$$W_{c3} = 43.4026 [g]$$

Se introduce aproximadamente 1 gramo de muestra de biomasa residual procesada en el crisol y se pasa por la balanza analítica, registramos este peso como  $W_{iv}$  (masa del crisol con tapa y la muestra)

En el Apéndice 9 se muestra el registro de datos de los crisoles junto con la tapa y la biomasa procesada para ingresar al tratamiento térmico en la mufla y en el Apéndice 27 se muestra como es introducido el recipiente preparado a la balanza analítica.

$$W_{iv_1} = 42.5402 [g]$$

$$W_{iv_2} = 40.7876 [g]$$

$$W_{iv_3} = 40.6975 [g]$$

Se programa la mufla para introducir el crisol con tapa durante exactamente 7 minutos a  $950\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ , se toma como referencia la rampa de calentamiento de material volátil. En el Apéndice 28 se muestra como es introducido el recipiente preparado en la mufla para su tratamiento térmico.

Se retira la el crisol con tapa de la mufla y se pasa al desecador hasta temperatura ambiente.

Se pasa la muestra a la balanza analítica y se registra el peso como  $W_{fv}$  (primera masa final) con una precisión de 0,01 gramos.

En el Apéndice 10 se muestra los datos registrados de los crisoles con la tapa y biomasa posterior al tratamiento térmico realizado en la mufla para la determinación de la cantidad de material volátil en la muestra y en el Apéndice 29 se muestra como es introducido el recipiente en la balanza analítica.

$$W_{fv_1} = 38.2215 [g]$$

$$W_{fv_2} = 35.7212 [g]$$

$$W_{fv_3} = 44.6711[g]$$

#### D. Cálculos

Se calcula el porcentaje de pérdida de peso de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\%A = \left( \frac{W_{iv} - W_{fv}}{W_{iv} - W_{cv}} \right) * 100 \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde  $\%A$  es la pérdida de peso, en porcentaje, de la muestra de biomasa residual forestal.

Se determina el porcentaje de material volátil de la muestra a partir de la siguiente relación:

$$\%MV = \%A - \%H \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde  $\%MV$  es la cantidad de material volátil, en porcentaje, de la muestra de biomasa residual forestal.

#### **4.3.6. Determinación de carbono fijo**

El carbono fijo es un valor que se calcula a partir de la diferencia entre el 100% y la suma de las cantidades, en porcentaje, de humedad, cenizas y material volátil calculados anteriormente.

$$\%CF = 100\% - (\%H + \%C + \%MV) \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde  $\%CF$  es la cantidad de carbono fijo, en porcentaje, de la muestra de biomasa residual forestal.

#### ***4.3.7. Estimación de la cantidad total de la biomasa residual forestal***

La estimación de la cantidad total de biomasa residual forestal proveniente del conjunto residencial Villas de Santa Sofia va ligado a la recopilación de información con la empresa que le presta el servicio de recolección a la administración. Se tienen en cuenta factores de zona de recolección, peso neto de los residuos forestales por recipiente y peso neto de residuos forestales por semana.

La recolección de biomasa residual forestal está a cargo de dos empleados vinculados a la empresa NACIONAL DE SERVICIOS SM SAS mediante un acuerdo con la administración de la Urbanización Villas de Santa Sofia. El recipiente de recolección, se puede ver en el Apéndice 11, tiene las siguientes dimensiones:

$$H_{ext} = 0.93 [m]$$

$$D_{ext} = 0.59 [m]$$

El grosor del material del recipiente es de aproximadamente 2 milímetros (FLUID CONTAIMENT HDPE, 2025).

Calculamos la capacidad volumétrica del recipiente a partir de la Ecuación 7, teniendo en cuenta el grosor de las paredes del material.

$$V_{int} = \frac{\pi}{4} * D_{int}^2 * H_{int} \text{ (Ecuación 7)}$$

$$V_{int} = 0.2503 [m^3]$$

Se utiliza un peso con la capacidad de al menos 100 kilogramos y los resultados del peso del tres recipientes llenos se puede ver en el Apéndice 36, las mediciones se hacen por triplicado. En el Apéndice 35 se muestra cómo se realiza el proceso de pesaje del recipiente que se utiliza para recolectar la biomasa por los trabajadores encargados.

$$W_{prom} = 36.3889 [Kg]$$

Se debe descontar el peso del recipiente plástico que se utiliza para recolectar la biomasa, en el Apéndice 37 se muestran los resultados del procedimiento con tres recipientes vacíos. Con lo cual, el peso neto de la biomasa residual forestal tendrá que ser considerado como la diferencia entre estos dos respectivamente.

$$W_{recip_{prom}} = 7.2778 [Kg]$$

$$W_{neto\ biomasa_{prom}} = 29.1111 [Kg]$$

Se recopiló información con uno de los trabajadores de la empresa NACIONAL DE SERVICIOS SM SAS encargado de la recolección semanal de los residuos forestales generados por la urbanización, la estimación del trabajador es de 2 recipientes totalmente llenos al día. El método de recolección es manual, con un recogedor un poco más grande del que podemos encontrar comúnmente en los hogares y una escoba de paja. La frecuencia de recolección inicialmente es de tres veces por semana (martes, miércoles y jueves), dependiendo de las condiciones climáticas puede variar esta frecuencia.

$$W_{reco} = W_{neto\ biomasa_{prom}} * 6 \left[ \frac{kg}{semana} \right] \text{ (Ecuación 8)}$$

$$W_{reco} = 174.6667 \left[ \frac{Kg}{semana} \right]$$

#### 4.4. Tratamiento estadístico

Con el fin de garantizar la confiabilidad de nuestros resultados en cuanto a la determinación porcentual del análisis próximo, poder calorífico superior y la cantidad total de residuos forestales recolectados proveniente del conjunto Villas de Santa Sofía se utilizó un tratamiento estadístico de todos los datos registrados.

Para el tratamiento estadístico se deben tener en cuenta factores tales como la media aritmética, la varianza muestral, la desviación estándar muestral y el error estándar de la muestra.

##### 4.4.1. Media aritmética

La media aritmética se determina a partir de la Ecuación 9, representando la tendencia central en cuanto al análisis estadístico (Hernández, 2016).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \text{ (Ecuación 9)}$$

Para la cantidad porcentual de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo podemos ver de manera detallada la determinación de la media aritmética en los Apéndices 38, 39, 40 y 41 respectivamente, y en cuanto al poder calorífico superior podemos encontrar esta parte del tratamiento estadístico en el Apéndice 42.

Por último, los resultados de la media aritmética en cuanto a los registros para la estimación de la cantidad total de residuos forestales recolectados se pueden ver de manera detallada en los Apéndices 43 y 44.

##### 4.4.2. Varianza muestral

La varianza muestral se puede calcular a partir de la Ecuación 10, siendo este factor el que representa la variación entre datos de una población (Hernández, 2016).

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \text{ (Ecuación 10)}$$

Esta determinación de la varianza muestral para la cantidad porcentual presente en los registros de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo puede encontrarse de manera detallada en los Apéndices 45, 46, 47 y 48 respectivamente, y en cuanto al poder calorífico superior la podemos ver en el Apéndice 49.

Por último, los resultados de la varianza muestral en cuanto a los registros para la estimación de la cantidad total de residuos forestales recolectados se pueden ver de manera detallada en los Apéndices 50 y 51.

#### **4.4.3. Desviación estándar muestral**

La desviación estándar de la muestra de biomasa residual forestal se puede calcular a partir de la Ecuación 11, siendo la medida de dispersión mayormente repetida en un conjunto de registros (Hernández, 2016).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \text{ (Ecuación 11)}$$

El cálculo de la desviación estándar de los registros de análisis próximo de la muestra de biomasa forestal se puede ver de manera detallada en los Apéndices 52, 53, 54 y 55, para los valores de poder calorífico superior este tratamiento estadístico se puede ver en el Apéndice 56.

Finalmente, para los registros de la estimación de la cantidad total de biomasa residual recolectada se puede ver el análisis estadístico en los Apéndices 57 y 58.

#### 4.4.4. Error estándar muestral

La desviación estándar de la muestra de biomasa residual forestal se calcula a partir de la Ecuación 12, siendo el que se aplica cuando un instrumento de medición es utilizado con una muestra y no su población total (Hernández, 2016).

$$SE = \frac{s}{\sqrt{n}} \text{ (Ecuación 12)}$$

El cálculo del error estándar de los registros de análisis próximo de la muestra de biomasa forestal se puede ver de manera detallada en los Apéndices 59, 60, 61 y 62, para los valores de poder calorífico superior este tratamiento estadístico se puede ver en el Apéndice 63.

Finalmente, para los registros de la estimación de la cantidad total de biomasa residual recolectada se puede ver el análisis estadístico en los Apéndices 64 y 65.

## 5. Resultados

A partir de la Ecuación 2 el contenido de humedad de la muestra de biomasa residual forestal promedio que satisface la norma ASTM E871 tiene un valor de:

$$\% H_{prom} = 14.6424 \pm 0.0125$$

El contenido de cenizas de la muestra se calcula con la Ecuación 3, la cual obedece a la norma ASTM E1755, y tiene un valor promedio de:

$$\% C_{prom} = 13.2392 \pm 0.4174$$

La diferencia de masa para calcular la cantidad de material volátil en la muestra de biomasa se puede obtener a partir de la Ecuación 4 y tiene un valor promedio de:

$$\% A_{prom} = 75.7025$$

El contenido de material volátil de la muestra de biomasa, siguiendo la norma ASTM E872, se calcula con la Ecuación 5 y tiene un valor promedio de:

$$\%MV_{prom} = 61.0602 \pm 0.0100$$

El contenido de carbono fijo presente en la muestra, obedeciendo a la norma ASTM D3172, se calcula con la Ecuación 6 y tiene un valor promedio de:

$$\%CF_{prom} = 11.0583 \pm 0.4148$$

Finalmente, el valor promedio del poder calorífico superior de la biomasa residual forestal procesada se calcula a partir de la Ecuación 1, reemplazando los valores de Humedad, Cenizas, Material Volátil y Carbono Fijo anteriormente determinados y tiene un valor de:

$$HHV_{prom} = 14.2112 \pm 0.1484 \left[ \frac{MJ}{Kg} \right]$$

El margen de error de la Ecuación 1 es aproximadamente del 3.74%, con este valor podemos calcular el poder calorífico superior mínimo que podemos extraer de la biomasa residual forestal proveniente del conjunto Villas de Santa Sofía.

$$HHV_{min} = 13.6797 \pm 0.1484 \left[ \frac{MJ}{Kg} \right]$$

Teniendo en cuenta la cantidad de biomasa residual forestal recolectada en el conjunto Villas de Santa Sofía y el poder calorífico superior mínimo que podemos extraer de una muestra de la misma, se calcula el poder calorífico semanal que podemos extraer de la cantidad total semanal.

$$HHV_{semana} = 2389.3830 \pm 25.9149 \left[ \frac{MJ}{semana} \right]$$

## 6. Conclusiones

El presente trabajo de investigación tiene como propósito estimar la cantidad de poder calorífico superior que se puede extraer de una muestra de biomasa residual forestal proveniente del conjunto residencial Villas de Santa Sofía. Para alcanzar este objetivo se plantearon varias tareas como la clasificación de biomasa, la caracterización de la muestra y la determinación del PCS a partir de la correlación de Parikh, las cuales se lograron cumplir, permitiendo el correcto desarrollo académico y práctico de la investigación.

La biomasa residual forestal proveniente del conjunto Villas de Santa Sofía se logró clasificar de acuerdo a varios criterios planteados en el trabajo de investigación, tales como una organización demográfica planteada según su plano cartesiano visto desde la parte superior con ayuda de la herramienta web Google Maps, plantear las 8 zonas de recolección de acuerdo a dicha subdivisión, una selección de biomasa de acuerdo a una bitácora de recolección teniendo en cuenta la zona de recolección, tipo de tarea realizada por el trabajador encargado y descripción cualitativa de la biomasa.

Posteriormente, se logró caracterizar la muestra de laboratorio para el estudio planteando diferentes tareas, la primera fue tomar una muestra de biomasa residual forestal de acuerdo a la norma española UNE-EN ISO 18135 garantizando la aleatoriedad de muestreo, la segunda fue preparar la muestra para su ingreso al laboratorio, para ello se realizó un procedimiento de secado a partir de una exposición al sol sobre una lona y garantizando el flujo de aire, anotando una bitácora según la cantidad de horas expuesta y la descripción cualitativa de la biomasa, la tercera consistió en procesar la biomasa en un molino manual para acondicionar para mejorar el almacenamiento y practicidad dentro de los recipientes del laboratorio y en la cuarta tarea se

realizó una verificación dimensional con un tamiz de máximo 1 milímetro del resultado de la trituración anterior.

Para la determinación del poder calorífico superior de la muestra de biomasa residual forestal se aplicó la correlación propuesta por Parikh, Channiwala y Ghosal. Con lo cual se hizo necesario la estimación de la cantidad de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo de la muestra, tomando como referencias las normas ASTM E871, E1755, E872 y D3172 respectivamente, de las cuales se obtuvieron como resultado un 14.6424%, 13.2392%, 61.0602% y 11.0583% respectivamente, con lo cual se estimó una cantidad de 13.6797 [MJ/Kg] teniendo en cuenta el porcentaje de error de la correlación.

Finalmente se estimó una cantidad total de 174.6667 Kilogramos de biomasa residual forestal recolectada por semana en el conjunto Villas de Santa Sofía a partir de sondeos y estudios sobre 3 contenedores dispuestos para realizar este proceso, la cual nos otorga una disponibilidad mínima de 2389.3830 [MJ] por semana a partir de dicha materia prima procesada que no está siendo aprovechada por ninguna organización pública o privada.

El trabajo de investigación cumple con los objetivos propuestos, brindando un pilar metodológico para el análisis residencial de los residuos forestales que no están siendo aprovechados, contribuyendo a la mitigación de combustibles fósiles como única fuente energética en procesos térmicos y además mostrando la factibilidad en el análisis energético de los residuos aprovechables.

## **7. Recomendaciones**

Si se estudia el mejoramiento de los valores estimados en este trabajo de investigación se recomienda realizar un diseño experimental para cada una de las fases metodológicas, teniendo en cuenta los factores más relevantes que podrían relacionarse a la ecuación de Parikh.

Se el propósito cambia a la determinación de poder calorífico de biomasa residual forestal proveniente de las zonas residenciales de Bucaramanga, se recomienda analizar cada una de las muestras por separado provenientes de una población estadística para brindar un apoyo si además se requiere una correlación de PSC para la ciudad.

Se recomienda automatizar el proceso de trituración y secado si se desea materializar la metodología del proyecto a mediana y baja escala, ya que el tiempo es un factor fundamental en todos los procesos industriales.

Se recomienda seguir las normas ambientales vigentes para el área metropolitana de Bucaramanga si se lleva a cabo la construcción de un sistema térmico en base al material de analizado en este proyecto de investigación.

### Referencias bibliográficas

- Carlos Robles Algarin y Omar Rodriguez Alvarez (2018). Un panorama de energías renovables en el mundo, Latinoamérica y Colombia. ESPACIOS.
- María Acosta Pérez (2012). Diseño y construcción de un biodigestor anaeróbico para el aprovechamiento energético de la biomasa y uso experimental para la universidad francisco de paula Santander Ocaña. Universidad Francisco de Paula Santander.
- López, F.; Alfaro, A.; Caparrós, S.; García, M.M.; Pérez, A.; Garrote, G. (2008). APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO E INTEGRADO POR FRACCIONAMIENTO DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA FORESTAL Y AGROINDUSTRIAL. CARACTERIZACIÓN DE HEMICELULOSAS, CELULOSAS Y OTROS PRODUCTOS DEL FRACCIONAMIENTO. Universidad de Huelva.
- Elva Hercilia Páez Gómez (2011). FLORA URBANA DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB.
- Lucevin Gómez (1999). LOS CUARTOS DE LA BASURA, A LA CANECA. EL TIEMPO.
- Jesus Fernandez (2003). Energías renovables para el desarrollo. Energía de la biomasa. IBERDROLA.
- Callejas, E. S., & Quezada, V. G. (2009). Los biocombustibles. El cotidiano.
- UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL (2016). DETERMINACIÓN DEL CALOR DE COMBUSTIÓN MEDIANTE LA BOMBA CALORIMÉTRICA. Facultad Regional de Rosario.

Jigisha Parikh, S.A. Channiwala, G.K. Ghosal (2004). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. Sarvajanic College of Engineering and Technology, Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Laxminarayan Institute of Technology.

Fluid Containment (2021). (s. f.). HDPE chemical containers – 55-gallon blue plastic barrel ISO 9001. Recuperado de <https://fluidcontainment.com/>.

Gorozabel, B. P. L., Reyes, E. R., & Parra, J. C. P. (2022). Transformación de biomasa lignocelulósica en biocombustible de segunda generación: estado del arte del pretratamiento.

Russo, R. (2009). Guía práctica para la medición de la captura de carbono en la biomasa forestal. Universidad EARTH.

Agüero, A. C., Pisa, J. R., Agüero, C. J., & Bugeau, A. T. (2004). Poder calorífico del bagazo de caña de azúcar. Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería.

Ramos, F. D., Díaz, M. S., & Villar, M. A. (2016). Biocombustibles.

Merino, L. (2012). Las energías renovables. Energías renovables.

Gabriel Jaime Posada (2016). ELEMENTOS BÁSICOS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS.

## Apéndices

### Apéndice 1

*Peso por triplicado de los tres crisoles para humedad*

<b>Peso</b>	<b>Crisol 1</b>	<b>Crisol 2</b>	<b>Crisol 3</b>
m 1.1 [g]	27,563	26,1271	27,0003
m 1.2 [g]	27,5625	26,1269	27,0003
m 1.3 [g]	27,5633	26,1271	27,0001
m1 [g]	27,5629	26,1270	27,0002

*Nota.* Estos datos fueron registrados en la sección de humedad y hacen referencia al peso en la balanza analítica de los tres crisoles posterior a su respectivo acondicionamiento en la mufla.

Tabla realizada por el autor.

### Apéndice 2

*Peso de los crisoles con la biomasa procesada para humedad*

<b>Peso</b>	<b>Crisol 1</b>	<b>Crisol 2</b>	<b>Crisol 3</b>
m 2.1 [g]	33,5284	32,4595	33,7347
m 2.2 [g]	33,5281	32,4595	33,7345
m 2.3 [g]	33,5275	32,4589	33,7343
m2 [g]	33,5280	32,4593	33,7345

*Nota.* Estos datos se registraron en la sección de humedad y hacen referencia al peso en la balanza analítica una vez se ha introducido la biomasa residual forestal en los crisoles. Tabla realizada por el autor.

**Apéndice 3***Primer peso final para humedad*

<b>Peso</b>	<b>Crisol 1</b>	<b>Crisol 2</b>	<b>Crisol 3</b>
m 3.1.1 [g]	32,5586	31,5634	32,8535
m 3.2.1 [g]	32,5589	31,5637	32,8535
m 3.3.1 [g]	32,5600	31,5645	32,8540
m3.1 [g]	32,5592	31,5639	32,8537

*Nota.* Estos datos se registraron en la sección de humedad y hacen referencia al peso en la balanza analítica posterior al primer tratamiento térmico que recibió en la mufla. Tabla realizada por el autor.

**Apéndice 4***Segundo peso final para humedad*

<b>Peso</b>	<b>Crisol 1</b>	<b>Crisol 2</b>	<b>Crisol 3</b>
m 3.1.2 [g]	32,5542	31,5534	32,8367
m 3.2.2 [g]	32,5548	31,5535	32,8373
m 3.3.2 [g]	32,5560	31,5552	32,8386
m3.2 [g]	32,5550	31,5540	32,8375

*Nota.* Estos datos se registraron en la sección de humedad y hacen referencia al peso en la balanza analítica posterior al segundo tratamiento térmico que recibió en la mufla. Tabla realizada por el autor.

**Apéndice 5***Peso por triplicado de los crisoles para cenizas*

<b>Peso</b>	<b>Crisol 1</b>	<b>Crisol 2</b>	<b>Crisol 3</b>
m 4.1 [g]	26,8231	26,2423	24,7319
m 4.2 [g]	26,8239	26,2425	24,7321
m 4.3 [g]	26,8229	26,2423	24,7319
m 4 [g]	26,8233	26,2424	24,7320

*Nota.* Estos datos fueron registrados en la sección de cenizas y hacen referencia al peso en la balanza analítica de los tres crisoles posterior a su respectivo acondicionamiento en la mufla.

Tabla realizada por el autor.

**Apéndice 6***Peso de los crisoles con la biomasa procesada para cenizas*

<b>Peso</b>	<b>Crisol 1</b>	<b>Crisol 2</b>	<b>Crisol 3</b>
m 5.1 [g]	32,3200	32,9670	30,1879
m 5.2 [g]	32,3197	32,9669	30,1877
m 5.3 [g]	31,3196	32,9666	30,1875
m 5 [g]	31,9864	32,9668	30,1877

*Nota.* Estos datos se registraron en la sección de cenizas y hacen referencia al peso en la balanza analítica una vez se ha introducido la biomasa residual forestal en los crisoles. Tabla realizada por el autor.

**Apéndice 7***Peso final para cenizas*

<b>Peso</b>	<b>Crisol 1</b>	<b>Crisol 2</b>	<b>Crisol 3</b>
m 6.1 [g]	27,5633	26,9589	25,5341
m 6.2 [g]	27,5637	26,9595	25,5349
m 6.3 [g]	27,5641	26,9597	25,5353
m 6 [g]	27,5637	26,9594	25,5348

*Nota.* Estos datos se registraron en la sección de cenizas y hacen referencia al peso en la balanza analítica posterior al tratamiento térmico que recibió en la mufla. Tabla realizada por el autor.

**Apéndice 8***Peso por triplicado de los crisoles para material volátil*

<b>Peso</b>	<b>Crisol 1</b>	<b>Crisol 2</b>	<b>Crisol 3</b>
m 7.1 [g]	36,8106	34,0940	43,4026
m 7.2 [g]	36,8105	34,0940	43,4027
m 7.3 [g]	36,8106	34,0938	43,4024
m 7 [g]	36,8106	34,0939	43,4026

*Nota.* Estos datos fueron registrados en la sección de material volátil y hacen referencia al peso en la balanza analítica de los tres crisoles posterior a su respectivo acondicionamiento en la mufla. Tabla realizada por el autor.

**Apéndice 9***Peso de los crisoles con biomasa para material volátil*

<b>Peso</b>	<b>Crisol 1</b>	<b>Crisol 2</b>	<b>Crisol 3</b>
m 8.1 [g]	42,5402	40,7876	48,6975
m 8.2 [g]	42,5402	40,7875	48,6975
m 8.3 [g]	42,5402	40,7877	48,6976
m 8 [g]	42,5402	40,7876	48,6975

*Nota.* Estos datos se registraron en la sección de material volátil y hacen referencia al peso en la balanza analítica una vez se ha introducido la biomasa residual forestal en los crisoles. Tabla realizada por el autor.

**Apéndice 10***Peso final para material volátil*

<b>Peso</b>	<b>Crisol 1</b>	<b>Crisol 2</b>	<b>Crisol 3</b>
m 9.1 [g]	38,2214	35,7212	44,6709
m 9.2 [g]	38,2214	35,7212	44,6710
m 9.3 [g]	38,2216	35,7213	44,6713
m 9 [g]	38,2215	35,7212	44,6711

*Nota.* Estos datos se registraron en la sección de material volátil y hacen referencia al peso en la balanza analítica posterior al tratamiento térmico que recibió en la mufla. Tabla realizada por el autor.

## Apéndice 11

### *Recipiente de recolección para la biomasa forestal*



*Nota.* En el apéndice se muestra el recipiente de recolección utilizado por los trabajadores encargados de esta tarea pertenecientes a la empresa Nacional de Servicios SAS. Foto realizada por el autor.

## Apéndice 12

### *Método de recolección de biomasa*



*Nota.* En la fotografía se muestra el método y materiales de recolección de la biomasa forestal utilizados por los trabajadores de la empresa Nacional de Servicios SAS. Foto realizada por el autor.

### Apéndice 13

*Vista superior del interior del conjunto Villas de Santa Sofía*



*Nota.* Esta ilustración hace referencia a la organización cardinal del conjunto residencial Villas de Santa Sofía. Imagen tomada de Google Maps sección de búsqueda Villas de Santa Sofía.

**Apéndice 14*****Bata antifluido***

*Nota.* La fotografía representa la bata utilizada en la practica para la determinación del poder calorifico de la biomasa residual forestal. Foto realizada por el autor.

**Apéndice 15*****Gafas de protección***

*Nota.* La fotografía representa las gafas de seguridad que se deben utilizar al momento de realizar prácticas en la mufla. Foto realizada por el autor.

**Apéndice 16***Guantes de protección térmica*

*Nota.* La fotografía representa los guantes utilizados como medida de seguridad para la práctica en la mufla eléctrica. Foto realizada por el autor.

**Apéndice 17***Pinzas metálicas*

*Nota.* La fotografía representa las pinzas metálicas utilizadas como medida de protección térmica en la práctica con la mufla eléctrica. Foto realizada por el autor.

## Apéndice 18

### *Peso crisol para humedad*



*Nota.* La fotografía hace referencia al pesaje del crisol en la balanza analítica posterior a su acondicionamiento para la determinación de humedad. Foto realizada por el autor.

## Apéndice 19

### *Peso crisol con biomasa para humedad*



*Nota.* La fotografía hace referencia al pesaje del crisol con la biomasa en la balanza analítica para la determinación de humedad.

### **Apéndice 20**

*Peso final crisol con biomasa para humedad*



*Nota.* La fotografía hace referencia al pesaje del crisol posterior al tratamiento térmico recibido en la mufla para la determinación de humedad. Foto realizada por el autor.

### **Apéndice 21**

*Peso crisol para cenizas*



*Nota.* La fotografía hace referencia al pesaje del crisol posterior a su acondicionamiento para la determinación de cenizas. Foto realizada por el autor.

## Apéndice 22

*Peso crisol con biomasa para cenizas*



*Nota.* La fotografía hace referencia al pesaje del crisol junto a la biomasa en la balanza analítica antes de ser introducidos a la mufla para la determinación de cenizas. Foto realizada por el autor.

## Apéndice 23

*Peso final crisol con biomasa para cenizas*



*Nota.* La fotografía hace referencia al pesaje del crisol con la biomasa en la alanza analítica posterior a su tratamiento térmico en la mufla para la determinación de cenizas. Foto realizada por el autor.

#### **Apéndice 24**

##### *Mufla con crisoles para cenizas*



*Nota.* La fotografía representa los crisoles con biomasa introducidos en la mufla para la determinación de cenizas. Foto realizada por el autor.

#### **Apéndice 25**

##### *Desecador con crisoles para cenizas*



*Nota.* La fotografía hace referencia a los crisoles introducidos en el desecador posterior a su tratamiento térmico en la mufla para la determinación de cenizas. Foto realizada por el autor.

### **Apéndice 26**

*Peso crisol con tapa para volátiles*



*Nota.* La fotografía hace referencia al pesaje del crisol con tapa posterior a su acondicionamiento en la mufla para la determinación de material volátil. Foto realizada por el autor.

### **Apéndice 27**

*Peso crisol con tapa y biomasa para volátiles*



*Nota.* La fotografía hace referencia al pesaje del crisol con tapa y biomasa antes de ser introducido a la mufla para la determinación de cenizas. Foto realizada por el autor.

### **Apéndice 28**

*Mufla con crisol para volátiles*



*Nota.* La fotografía hace referencia al crisol con tapa y biomasa introducido en la mufla a temperatura de trabajo con el fin de recibir su tratamiento térmico para la determinación de material volátil. Foto realizada por el autor.

### **Apéndice 29**

*Peso final de crisol con tapa y biomasa para volátiles*



*Nota.* La fotografía hace referencia al pesaje del crisol con tapa y biomasa en la balanza analítica posterior a su tratamiento térmico en la mufla para la determinación de material volátil.

Foto realizada por el autor.

### **Apéndice 30**

*Trituración de la muestra con molino manual*



*Nota.* La fotografía hace referencia al proceso de trituración de la muestra con el molino manual ajustado para garantizar el mejor dimensionamiento de viruta. Foto realizada por el autor.

### **Apéndice 31**

*Lona de secado*



*Nota.* La fotografía hace referencia a la lona de plástico utilizada para secar la biomasa residual forestal. Foto realizada por el autor.

### **Apéndice 32**

*Proceso de secado de la biomasa*



*Nota.* La fotografía hace referencia al proceso de secado de la biomasa residual forestal sobre la lona de plástico sometido al sol. Foto realizada por el autor.

### **Apéndice 33**

*Separación por lotes de la biomasa*



*Nota.* La fotografía hace referencia a la separación de la muestra de biomasa residual forestal en una bolsa hermética. Foto realizada por el autor.

### **Apéndice 34**

#### *Pesaje de los lotes de biomasa*



*Nota.* La fotografía hace referencia al pesaje de la muestra de biomasa residual forestal separada por lotes menores a 100 gramos en bolsa hermética. Foto realizada por el autor.

**Apéndice 35**

*Pesaje de los contenedores de biomasa*



*Nota.* La fotografía hace referencia al pesaje de los recipientes donde es recolectada la biomasa residual forestal en el conjunto residencial Villas de Santa Sofía. Foto realizada por el autor.

**Apéndice 36**

*Pesaje de los recipientes con biomasa residual*

<b>Muestreo</b>	<b>Recipiente 1</b>	<b>Recipiente 2</b>	<b>Recipiente 3</b>
Peso 1 [kg]	37,2	39,2	33,1
Peso 2 [kg]	37,1	39,2	32,8
Peso 3 [kg]	36,9	38,9	33,1
Peso prom [kg]	37,0667	39,1000	33,0000

*Nota.* La tabla representa los resultados del pesaje de los recipientes llenos de biomasa residual forestal recolectados por los trabajadores pertenecientes a la empresa Nacional de

Servicios SAS encargados de dicha tarea en el conjunto Villas de Santa Sofía. Tabla realizada por el autor.

**Apéndice 37**

*Pesaje en vacío de los recipientes*

<b>Muestreo</b>	<b>Recipiente 1</b>	<b>Recipiente 2</b>	<b>Recopiente 3</b>
Peso 1 [kg]	7,1	7,5	7,2
Peso 2 [kg]	7,3	7,5	7,1
Peso 3 [kg]	7,3	7,4	7,1
Peso prom [kg]	7,2333	7,4667	7,1333

*Nota.* La tabla muestra los resultados del pesaje de los recipientes vacíos con los que se realiza el proceso de recolección de biomasa residual forestal. Tabla realizada por el autor.

**Apéndice 38**

*Media aritmética de humedad*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	16,2571	14,1510	13,0851
x_2	16,2465	14,1458	13,0825
x_3	16,2218	14,1255	13,0721
$\bar{x}$	16,2418	14,1408	13,0799

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de media aritmética para la cantidad de humedad presente en la muestra.

**Apéndice 39**

*Media aritmética de cenizas*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x <sub>1</sub>	13,4658	10,6562	14,7031
x <sub>2</sub>	13,4612	10,6627	14,7152
x <sub>3</sub>	16,4832	10,6688	14,7262
$\bar{x}_{c1}$	14,4701	10,6626	14,7148

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de media aritmética para la cantidad de cenizas presente en la muestra.

**Apéndice 40**

*Media aritmética de material volátil*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x <sub>1</sub>	59,1199	61,5392	62,9617
x <sub>2</sub>	59,1292	61,5440	62,9638
x <sub>3</sub>	59,1517	61,5613	62,9647
$\bar{x}_{c1}$	59,1336	61,5482	62,9634

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de media aritmética para la cantidad de material volátil presente en la muestra.

**Apéndice 41**

*Media aritmética de carbono fijo*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x <sub>1</sub>	11,1572	13,6536	9,2502
x <sub>2</sub>	11,1631	13,6475	9,2385
x <sub>3</sub>	8,1433	13,6444	9,2371
$\bar{x}_{c1}$	10,1546	13,6485	9,2419

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de media aritmética para la cantidad de carbono fijo presente en la muestra.

#### Apéndice 42

*Media aritmética de HHV*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	13,0570	14,3387	12,9719
x_2	13,0605	14,3373	12,9680
x_3	11,9727	14,3389	12,9676
$\bar{x}_{c1}$	12,6967	14,3383	12,9692

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de media aritmética para el poder calorífico superior presente en la muestra.

#### Apéndice 43

*Media aritmética para recipiente de recolección lleno*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	37,2000	39,2000	33,1000
x_2	37,1000	39,2000	32,8000
x_3	36,9000	38,9000	33,1000
$\bar{x}_{c1}$	37,0667	39,1000	33,0000

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de media aritmética para los registros del recipiente lleno con el cual es recolectada la biomasa.

**Apéndice 44**

*Media aritmética para recipiente de recolección vacío*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x <sub>1</sub>	7,1000	7,5000	7,2000
x <sub>2</sub>	7,3000	7,5000	7,1000
x <sub>3</sub>	7,3000	7,4000	7,1000
$\overline{x_{c1}}$	7,2333	7,4667	7,1333

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de media aritmética para los registros del recipiente vacío con el cual es recolectada la biomasa.

**Apéndice 45**

*Varianza muestral de humedad*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x <sub>1</sub>	16,2571	14,1510	13,0851
x <sub>2</sub>	16,2465	14,1458	13,0825
x <sub>3</sub>	16,2218	14,1255	13,0721
s <sup>2</sup>	0,0004	0,0002	0,0000

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de varianza muestral para la cantidad de humedad presente en la muestra.

**Apéndice 46**

*Varianza muestral de cenizas*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x <sub>1</sub>	13,4658	10,6562	14,7031
x <sub>2</sub>	13,4612	10,6627	14,7152
x <sub>3</sub>	16,4832	10,6688	14,7262
s <sup>2</sup>	1,5129	0,0001	0,0002

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de varianza muestral para la cantidad de cenizas presente en la muestra.

#### Apéndice 47

*Varianza muestral de material volátil*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	59,1199	61,5392	62,9617
x_2	59,1292	61,5440	62,9638
x_3	59,1517	61,5613	62,9647
$s^2$	0,0003	0,0001	0,0000

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de varianza muestral para la cantidad de material volátil presente en la muestra.

#### Apéndice 48

*Varianza muestral de carbono fijo*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	11,1572	13,6536	9,2502
x_2	11,1631	13,6475	9,2385
x_3	8,1433	13,6444	9,2371
$s^2$	1,5080	0,0000	0,0001

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de varianza muestral para la cantidad de carbono fijo presente en la muestra.

**Apéndice 49***Varianza muestral de HHV*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	13,0570	14,3387	12,9719
x_2	13,0605	14,3373	12,9680
x_3	11,9727	14,3389	12,9676
s <sup>2</sup>	0,1947	0,0000	0,0000

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de varianza muestral para el poder calorífico superior presente en la muestra.

**Apéndice 50***Varianza muestral para recipiente de recolección lleno*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	37,2000	39,2000	33,1000
x_2	37,1000	39,2000	32,8000
x_3	36,9000	38,9000	33,1000
s <sup>2</sup>	0,0267	0,0150	0,0150

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de varianza muestral para los registros del recipiente lleno con el cual es recolectada la biomasa.

**Apéndice 51***Varianza muestral para recipiente de recolección vacío*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	7,1000	7,5000	7,2000
x_2	7,3000	7,5000	7,1000
x_3	7,3000	7,4000	7,1000
s <sup>2</sup>	0,0267	0,0017	0,0067

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de varianza muestral para los registros del recipiente vacío con el cual es recolectada la biomasa.

### Apéndice 52

#### *Desviación estándar de humedad*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	16,2571	14,1510	13,0851
x_2	16,2465	14,1458	13,0825
x_3	16,2218	14,1255	13,0721
s	0,0187	0,0125	0,0064

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de desviación estándar para la cantidad de humedad presente en la muestra.

### Apéndice 53

#### *Desviación estándar de cenizas*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	13,4658	10,6562	14,7031
x_2	13,4612	10,6627	14,7152
x_3	16,4832	10,6688	14,7262
s	1,2300	0,0077	0,0143

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de desviación estándar para la cantidad de cenizas presente en la muestra.

**Apéndice 54***Desviación estándar de material volátil*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	59,1199	61,5392	62,9617
x_2	59,1292	61,5440	62,9638
x_3	59,1517	61,5613	62,9647
s	0,0168	0,0110	0,0021

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de desviación estándar para la cantidad de material volátil presente en la muestra.

**Apéndice 55***Desviación estándar de carbono fijo*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	11,1572	13,6536	9,2502
x_2	11,1631	13,6475	9,2385
x_3	8,1433	13,6444	9,2371
s	1,2280	0,0062	0,0101

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de desviación estándar para la cantidad de carbono fijo presente en la muestra.

**Apéndice 56***Desviación estándar de HHV*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	13,0570	14,3387	12,9719
x_2	13,0605	14,3373	12,9680
x_3	11,9727	14,3389	12,9676
s	0,4412	0,0005	0,0034

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de desviación estándar para el poder calorífico superior presente en la muestra.

### Apéndice 57

*Desviación estándar para recipiente de recolección lleno*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	37,2000	39,2000	33,1000
x_2	37,1000	39,2000	32,8000
x_3	36,9000	38,9000	33,1000
s	0,1633	0,1225	0,1225

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de desviación estándar para los registros del recipiente lleno con el cual es recolectada la biomasa.

### Apéndice 58

*Desviación estándar para recipiente de recolección vacío*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
n	3	3	3
x_1	7,1000	7,5000	7,2000
x_2	7,3000	7,5000	7,1000
x_3	7,3000	7,4000	7,1000
s	0,1633	0,0408	0,0816

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores de desviación estándar para los registros del recipiente vacío con el cual es recolectada la biomasa.

**Apéndice 59***Error estándar de humedad*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
s	0,0187	0,0125	0,0064
n	3	3	3
SE	0,0108	0,0072	0,0037

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores del error estándar para la cantidad de humedad presente en la muestra.

**Apéndice 60***Error estándar de cenizas*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
s	1,2300	0,0077	0,0143
n	3	3	3
SE	0,7101	0,0045	0,0083

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores del error estándar para la cantidad de cenizas presente en la muestra.

**Apéndice 61***Error estándar de material volátil*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
s	0,0168	0,0110	0,0021
n	3	3	3
SE	0,0097	0,0063	0,0012

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores del error estándar para la cantidad de material volátil presente en la muestra.

**Apéndice 62***Error estándar de carbono fijo*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
s	1,2280	0,0062	0,0101
n	3	3	3
SE	0,7090	0,0036	0,0058

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores del error estándar para la cantidad de carbono fijo presente en la muestra.

**Apéndice 63***Error estándar de HHV*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
s	0,4412	0,0005	0,0034
n	3	3	3
SE	0,2547	0,0003	0,0019

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores del error estándar para el poder calorífico superior presente en la muestra.

**Apéndice 64***Error estándar para recipiente de recolección lleno*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
s	0,1633	0,1225	0,1225
n	3	3	3
SE	0,0943	0,0707	0,0707

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores del error estándar para los registros del recipiente lleno con el cual es recolectada la biomasa.

**Apéndice 65**

*Error estándar para recipiente de recolección vacío*

<b>Variables</b>	<b>Valor C1</b>	<b>Valor C2</b>	<b>Valor C3</b>
s	0,1633	0,0408	0,0816
n	3	3	3
SE	0,0943	0,0236	0,0471

*Nota.* La tabla realizada por el autor representa los valores del error estándar para los registros del recipiente vacío con el cual es recolectada la biomasa.