



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**“ANÁLISIS TÉCNICO DE BRIQUETAS OBTENIDAS A PARTIR  
DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN  
DE BIOENERGÍA”**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR:**

**JONATHAN CARLOS BERNAL RIVERA**

Riobamba – Ecuador

2024



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**“ANÁLISIS TÉCNICO DE BRIQUETAS OBTENIDAS A PARTIR  
DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN  
DE BIOENERGÍA”**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR: JONATHAN CARLOS BERNAL RIVERA**

**DIRECTOR: ING. MARLON ERNESTO MOSCOSO MARTINEZ, MSC.**

Riobamba – Ecuador

2024

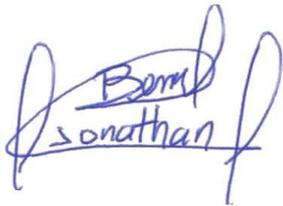
© 2024, Jonathan Carlos Bernal Rivera

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Jonathan Carlos Bernal Rivera, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

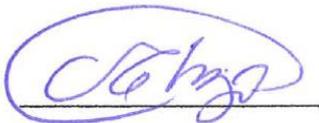
Riobamba, 27 de marzo del 2024

A handwritten signature in blue ink. The signature is stylized and appears to read 'Bernal Jonathan'.

**Jonathan Carlos Bernal Rivera**  
**C.I. 1723830392-2**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, “ANÁLISIS TÉCNICO DE BRIQUETAS OBTENIDAS A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA”, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

|   | <b>FIRMA</b>   | <b>FECHA</b> |
|---|--|--------------|
| Ing. Marco Raúl Chuiza Rojas<br><b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>                                      |   | 27-03-2024   |
| Ing. Marlon Ernesto Moscoso Martínez, MSC.<br><b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b> |  | 27-03-2024   |
| Ing. Mabel Mariela Parada Rivera, MSC.<br><b>ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>      |  | 27-03-2024   |

## **DEDICATORIA**

Con un profundo sentimiento de gratitud y un cúmulo de recuerdos que despiertan emociones, dedico este trabajo a aquellos seres excepcionales que han sido los pilares inquebrantables a lo largo de mi trayectoria académica. En especial, quiero expresar mi agradecimiento a mi amada madre, Rosalía Rivera, quien desde el cielo se convirtió en mi ángel que me cuida y fortalece cada día, a mi padre, Carlos Bernal, quien ha sido mi guía incondicional en este camino. Su amor y constante orientación han sido mi inspiración y fuerza para superar cualquier obstáculo. Agradezco de todo corazón su presencia en mi vida y valoro profundamente los sacrificios y enseñanzas que han compartido conmigo.

Además, deseo agregar un agradecimiento a cada uno de mis hermanos, Ariel, Samantha y, especialmente, a mi hermana Josselyn, quien ocupa un lugar único y especial en mi corazón. Ella es mi principal fuente de motivación para alcanzar este objetivo. A través de su apoyo incondicional y amor inquebrantable, hemos forjado un vínculo irremplazable. Agradezco profundamente su presencia en mi vida y les dedico este logro con un amor y gratitud indescriptibles. Juntos hemos superado desafíos y compartido alegrías, y sé que nuestro vínculo seguirá fortaleciéndose a lo largo de nuestras vidas. Queridos hermanos, ¡gracias por ser parte esencial de mi camino y por estar siempre a mi lado!

Jona

## AGRADECIMIENTO

A mi director de tesis, el Ing. Marlon Moscoso, por su invaluable ayuda y apoyo durante todo el proceso de desarrollo de mi trabajo de integración curricular. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para orientarme y guiarme en cada etapa, y estoy profundamente agradecido por su dedicación y tiempo.

A mi asesora, la Ing. Mabel Parada, por brindarme la oportunidad al asignarme este tema tan relevante y apasionante. Además, su visión y experiencia han sido fundamentales para enriquecer mi investigación y alcanzar resultados significativos. Su guía y apoyo constante me han permitido desarrollar mi tesis de una manera sólida y exitosa.

Al grupo de investigación de materiales avanzados de la ESPOCH (GIMA) por su confianza al permitirme ser parte de este proyecto de investigación.

A los técnicos de laboratorio el Dr. Mauricio Álvarez y el químico Jefferson Bautista, por compartir sus conocimientos y experiencias para el desarrollo de mi trabajo. Su apoyo ha sido invaluable y me han ayudado a resolver cada actividad de la mejor manera.

Finalmente agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Carrera Ingeniería Química, por brindarme una educación de excelencia impartida por grandes docentes comprometidos con su labor.

Jona

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|                              |      |
|------------------------------|------|
| ÍNDICE DE TABLAS .....       | x    |
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | xi   |
| ÍNDICE DE ANEXOS.....        | xii  |
| LISTA DE ACRÓNIMOS .....     | xiii |
| RESUMEN.....                 | xiv  |
| ABSTRACT.....                | xv   |
| INTRODUCCIÓN .....           | 1    |

### CAPÍTULO I

|              |   |          |
|--------------|---|----------|
| <b>1.</b>    | <b>DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA .....</b>   | <b>2</b> |
| <b>1.1.</b>  | <b>Planteamiento del problema .....</b> | <b>2</b> |
| <b>1.2.</b>  | <b>Justificación .....</b>              | <b>3</b> |
| <b>1.3.</b>  | <b>Objetivos .....</b>                  | <b>3</b> |
| <b>1.3.1</b> | <b>Objetivo general .....</b>           | <b>3</b> |
| <b>1.3.2</b> | <b>Objetivos específicos .....</b>      | <b>3</b> |

### CAPÍTULO II

|                 |   |           |
|-----------------|---|-----------|
| <b>2.</b>       | <b>MARCO TEÓRICO .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>2.1.</b>     | <b>Antecedentes del proyecto .....</b>                                | <b>4</b>  |
| <b>2.2.</b>     | <b>Referencias teóricas .....</b>                                     | <b>8</b>  |
| <b>2.2.1.</b>   | <b>Residuos agroindustriales .....</b>                                | <b>8</b>  |
| <b>2.2.2.</b>   | <b>Briquetas.....</b>   | <b>10</b> |
| <b>2.2.3.</b>   | <b>Norma Técnica Colombiana NTC 2060 .....</b>                        | <b>11</b> |
| <b>2.2.4.</b>   | <b>Requisitos técnicos para la fabricación de las briquetas .....</b> | <b>11</b> |
| <b>2.2.5.</b>   | <b>Propiedades y características de las briquetas .....</b>           | <b>12</b> |
| <b>2.2.6.</b>   | <b>Parámetros y variables fisicoquímicos de las briquetas .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>2.2.6.1.</b> | <b>Poder calorífico .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>2.2.6.2.</b> | <b>Humedad .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>2.2.6.3.</b> | <b>Cenizas .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>2.2.6.4.</b> | <b>Carbono fijo .....</b>   | <b>14</b> |

|                |  |           |
|----------------|--|-----------|
| 2.2.6.6.       | Contenido de azufre .....                          | 15        |
| <b>2.2.7.</b>  | <b>Bomba calorimétrica .....</b>                   | <b>15</b> |
| <b>2.2.8.</b>  | <b>Norma ASTM D695 .....</b>                       | <b>16</b> |
| <b>2.2.9.</b>  | <b>Parámetros y variables fisicomecánicas.....</b> | <b>16</b> |
| 2.2.9.1.       | Módulo de elasticidad.....                         | 16        |
| 2.2.9.2.       | Resistencia máxima .....                           | 17        |
| 2.2.9.3.       | Tensión máxima.....                                | 17        |
| 2.2.9.4.       | Deformación máxima.....                            | 17        |
| <b>2.2.10.</b> | <b>Máquina universal de polímeros .....</b>        | <b>17</b> |

### CAPÍTULO III

|               |  |           |
|---------------|--|-----------|
| <b>3.</b>     | <b>MARCO METODOLÓGICO .....</b>  | <b>19</b> |
| <b>3.1.</b>   | <b>Localización del proyecto .....</b>                                       | <b>19</b> |
| <b>3.2.</b>   | <b>Ingeniería del proyecto .....</b>   | <b>20</b> |
| <b>3.2.1.</b> | <b>Nivel de investigación .....</b>  | <b>20</b> |
| <b>3.2.2.</b> | <b>Enfoque de investigación.....</b>   | <b>20</b> |
| <b>3.2.3.</b> | <b>Técnicas.....</b>   | <b>20</b> |
| <b>3.3.</b>   | <b>Caracterización fisicoquímica según la Norma Colombiana NTC 2060.....</b> | <b>21</b> |
| <b>3.3.1.</b> | <b>Poder calorífico .....</b>  | <b>21</b> |
| 3.3.1.1.      | Determinación del poder calorífico.....                                      | 21        |
| <b>3.3.2.</b> | <b>Porcentaje de cenizas .....</b>   | <b>23</b> |
| 3.3.2.1.      | Determinación del porcentaje de cenizas .....                                | 23        |
| <b>3.3.3.</b> | <b>Porcentaje de carbono fijo .....</b>                                      | <b>25</b> |
| 3.3.3.1.      | Determinación del porcentaje de carbono fijo .....                           | 25        |
| <b>3.3.4.</b> | <b>Porcentaje de material volátil .....</b>                                  | <b>25</b> |
| 3.3.4.1.      | Determinación del porcentaje de material volátil .....                       | 25        |
| <b>3.3.5.</b> | <b>Porcentaje de humedad .....</b>   | <b>26</b> |
| 3.3.5.1.      | Determinación del porcentaje de humedad .....                                | 27        |
| <b>3.3.6.</b> | <b>Porcentaje de azufre .....</b>  | <b>28</b> |
| 3.3.6.1.      | Determinación del porcentaje de azufre.....                                  | 28        |

|               |  |           |
|---------------|--|-----------|
| <b>3.4.</b>   | <b>Caracterización fisicomecánica según la norma ASTM D695 .....</b>         | <b>29</b> |
| <b>3.4.1.</b> | <b>Ensayo de compresión a la resistencia .....</b>                           | <b>29</b> |
| 3.4.1.1.      | Determinación de la compresión a la resistencia .....                        | 30        |
| <b>3.5.</b>   | <b>Determinación del proceso óptimo para la producción de briquetas.....</b> | <b>31</b> |
| <b>3.6.</b>   | <b>Costos de producción de briquetas.....</b>                                | <b>31</b> |
| <b>3.6.1.</b> | <b>Costos de producción.....</b>   | <b>31</b> |
| <b>3.6.2.</b> | <b>Costos variables.....</b>   | <b>32</b> |
| <b>3.6.3.</b> | <b>Costos fijos.....</b>   | <b>33</b> |
| <b>3.7.</b>   | <b>Impacto ambiental de la producción de briquetas.....</b>                  | <b>34</b> |

## **CAPÍTULO IV**

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| <b>4.</b>   | <b>ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....</b>                           | <b>36</b> |
| <b>4.1.</b> | <b>Resultados de la caracterización fisicoquímica .....</b>                   | <b>36</b> |
| 4.1.1.      | Porcentaje de poder calorífico .....  | 36        |
| 4.1.2.      | Porcentaje de humedad .....   | 38        |
| 4.1.3.      | Porcentaje de cenizas.....  | 40        |
| 4.1.4.      | Porcentaje de material volátil.....   | 42        |
| 4.1.5.      | Porcentaje de carbono fijo .....  | 44        |
| 4.1.6.      | Porcentaje de azufre .....  | 45        |
| <b>4.2.</b> | <b>Resultados de la caracterización fisicomecánica.....</b>                   | <b>48</b> |
| 4.2.1.      | Resistencia a la compresión.....  | 48        |
| 4.2.2.      | Tensión máxima .....  | 51        |
| 4.2.3.      | Módulo elasticidad .....  | 53        |
| 4.2.4.      | Deformación máxima.....   | 55        |
| <b>4.3.</b> | <b>Resultados obtenidos del proceso óptimo de elaboración briquetas .....</b> | <b>57</b> |
| <b>4.4.</b> | <b>Resultados de costos de producción de las briquetas.....</b>               | <b>59</b> |
| 4.4.1.      | Costos variables.....   | 59        |
| 4.4.2.      | Costos fijos.....   | 60        |
| 4.4.3.      | Costos de producción.....   | 62        |
| <b>4.5.</b> | <b>Impacto ambiental .....</b>  | <b>63</b> |

## **CAPÍTULO V**

|             |  |           |
|-------------|--|-----------|
| <b>5.</b>   | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b> | <b>65</b> |
| <b>5.1.</b> | <b>Conclusiones.....</b>                   | <b>65</b> |
| <b>5.2.</b> | <b>Recomendaciones.....</b>                | <b>67</b> |

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 2-1:</b> Estudios de briquetas realizados por otros autores .....                      | 7  |
| <b>Tabla 2-2:</b> Tipos de residuos utilizados en la elaboración de briquetas .....             | 9  |
| <b>Tabla 2-3:</b> Requisito de resistencia a la compresión .....                                | 12 |
| <b>Tabla 2-4:</b> Requisitos técnicos de las briquetas .....                                    | 13 |
| <b>Tabla 3-5:</b> Ubicación y coordenadas de la universidad ESPOCH .....                        | 19 |
| <b>Tabla 3-6:</b> Requisitos del poder calorífico .....   | 21 |
| <b>Tabla 3-7:</b> Proceso para la determinación del poder calorífico .....                      | 22 |
| <b>Tabla 3-8:</b> Requisitos del porcentaje de cenizas .....                                    | 23 |
| <b>Tabla 3-9:</b> Proceso para la determinación del contenido de porcentaje de cenizas .....    | 24 |
| <b>Tabla 3-10:</b> Requisitos del porcentaje de carbono fijo .....                              | 25 |
| <b>Tabla 3-11:</b> Requisitos del porcentaje de material volátil .....                          | 25 |
| <b>Tabla 3-12:</b> Proceso para la determinación del contenido de material volátil .....        | 26 |
| <b>Tabla 3-13:</b> Requisitos del porcentaje de humedad .....                                   | 27 |
| <b>Tabla 3-14:</b> Proceso para la determinación del contenido de porcentaje de humedad .....   | 27 |
| <b>Tabla 3-15:</b> Requisitos del porcentaje de azufre .....                                    | 28 |
| <b>Tabla 3-16:</b> Proceso para la determinación del contenido de porcentaje de azufre .....    | 28 |
| <b>Tabla 3-17:</b> Proceso para la determinación de las propiedades fisicomecánicas .....       | 30 |
| <b>Tabla 3-18:</b> Detalles de materia prima, mano de obra y producción .....                   | 32 |
| <b>Tabla 3-19:</b> Materia prima indirecta, mano de obra indirecta y otros gastos .....         | 34 |
| <b>Tabla 4-20:</b> Resultados del poder calorífico obtenido de cada muestra .....               | 37 |
| <b>Tabla 4-21:</b> Resultados del porcentaje de humedad obtenido de cada muestra .....          | 39 |
| <b>Tabla 4-22:</b> Resultados del porcentaje de cenizas obtenido de cada muestra .....          | 41 |
| <b>Tabla 4-23:</b> Resultados del porcentaje de material volátil obtenido de cada muestra ..... | 43 |
| <b>Tabla 4-24:</b> Resultados del porcentaje de carbono fijo por cada muestra .....             | 44 |
| <b>Tabla 4-25:</b> Resultados del porcentaje de azufre obtenido de cada muestra .....           | 47 |
| <b>Tabla 4-26:</b> Parámetros aplicados en la maquina universal de polímeros .....              | 48 |
| <b>Tabla 4-27:</b> Resultados de la resistencia máxima .....                                    | 49 |
| <b>Tabla 4-28:</b> Resultados obtenidos de la tensión máxima .....                              | 52 |
| <b>Tabla 4-29:</b> Resultados obtenidos del módulo elasticidad .....                            | 54 |
| <b>Tabla 4-30:</b> Resultados obtenidos de la deformación máxima .....                          | 55 |
| <b>Tabla 4-31:</b> Aspectos considerados en el proceso de elaboración .....                     | 57 |
| <b>Tabla 4-32:</b> Resultados obtenidos de los costos variables .....                           | 59 |
| <b>Tabla 4-33:</b> Resultados obtenidos de los costos fijos .....                               | 61 |
| <b>Tabla 4-34:</b> Análisis general .....   | 63 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| <b>Ilustración 2-1:</b> Briquetas orgánicas.....  | 11 |
| <b>Ilustración 2-2:</b> Bomba calorimétrica GDY-1A .....  | 16 |
| <b>Ilustración 2-3:</b> Maquina universal de polímeros .....                                      | 18 |
| <b>Ilustración 3-4:</b> Localización de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo .....       | 19 |
| <b>Ilustración 4-5:</b> Poder calorífico obtenido de cada briqueta elaborada .....                | 37 |
| <b>Ilustración 4-6:</b> Porcentaje de humedad obtenido de cada briqueta elaborada.....            | 39 |
| <b>Ilustración 4-7:</b> Porcentaje de cenizas obtenido de cada briqueta elaborada.....            | 41 |
| <b>Ilustración 4-8:</b> Porcentaje del material volátil obtenido de cada briqueta elaborada ..... | 43 |
| <b>Ilustración 4-9:</b> Porcentaje del carbono fijo obtenido por briqueta elaborada .....         | 45 |
| <b>Ilustración 4-10:</b> Porcentaje del carbono fijo obtenido de cada briqueta elaborada.....     | 46 |
| <b>Ilustración 4-11:</b> Porcentaje de azufre obtenido por briqueta elaborada .....               | 47 |
| <b>Ilustración 4-12:</b> Briquetas que aprobaron las pruebas fisicomecánicas .....                | 50 |
| <b>Ilustración 4-13:</b> Briquetas que no aprobaron las pruebas fisicomecánicas .....             | 51 |
| <b>Ilustración 4-14:</b> Resultados de la tensión máxima de cada briqueta.....                    | 52 |
| <b>Ilustración 4-15:</b> Resultados del módulo de elasticidad de cada briqueta.....               | 54 |
| <b>Ilustración 4-16:</b> Porcentaje de deformación máxima de cada briqueta.....                   | 56 |
| <b>Ilustración 4-17:</b> Impacto ambiental según los tipos de bioenergía .....                    | 63 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|   |          |
|---|----------|
| <b>ANEXO A: PRUEBAS FISICOQUÍMICAS: HUMEDAD .....</b>               | <b>1</b> |
| <b>ANEXO B: PRUEBAS DE CENIZAS Y MATERIAL VOLÁTIL .....</b>         | <b>1</b> |
| <b>ANEXO C: PRUEBAS DEL PORCENTAJE DE AZUFRE .....</b>              | <b>2</b> |
| <b>ANEXO D: EQUIPOS UTILIZADOS .....</b>                            | <b>3</b> |
| <b>ANEXO E: PRUEBAS FISICOMECAÑICAS: ENSAYO DE COMPRESIÓN .....</b> | <b>4</b> |

## **LISTA DE ACRÓNIMOS**

**NTC:** Normativa Técnica Colombiana

**ASTM:** American Society for Testing and Materials

**ICONTEC:** Instituto Colombiano de Normas Técnicas

**ÖNORM:** Instituto Austriaco de Estandarización

**DIN:** Entidad Alemana de Certificación

**INER:** Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables

**PCI:** Poder calorífico inferior

**PLANEE:** Plan Nacional de Eficiencia Energética

**TQ1:** Tallos de quinoa

**CP1:** Cáscara de piña

**BCA:** Bagazo de caña de azúcar

**TM:** Tusa de maíz

**CP2:** Cáscara de papa

**CT:** Cáscara de trigo

**PC:** Paja de cebada

**CA:** Cascarilla de arroz

**CC1:** Cáscara de coco

**CC2:** Cáscara de café

**TP:** Tallo de plátano

## RESUMEN

La producción de briquetas en Ecuador ha sido poco estudiada, lo que ha dificultado la comprensión de su calidad, impacto medioambiental y viabilidad económica como alternativa para la producción de bioenergía. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es llevar a cabo un "Análisis técnico de briquetas obtenidas a partir de residuos agroindustriales para la producción de bioenergía". La metodología empleada combinó enfoques cualitativos y cuantitativos, empezando por las caracterizaciones fisicoquímica y fisicomecánica conforme a la Norma Técnica Colombiana NTC 2060 para evaluar la calidad de las briquetas. Además, se realizó un análisis comparativo para identificar el proceso óptimo de elaboración en caso de incumplimiento de los estándares. Por otro lado, se llevó a cabo un análisis de costos, determinando los costos de producción a través de costos variables y fijos para una producción diaria específica. Asimismo, se evaluó el impacto ambiental del uso de briquetas en comparación con otras fuentes de bioenergía. Los resultados revelaron que tres tipos de briquetas elaboradas a partir de residuos de biomasa cumplen con los requisitos técnicos establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 2060. En términos económicos, se determinó que el precio de la tonelada de briquetas para una producción diaria de 1000 fundas de 3 kg es de \$460. Además, se demostró que el impacto ambiental del uso de briquetas elaboradas a partir de la combinación de biomásas es bajo en comparación con otras fuentes de bioenergía. En ese contexto, se concluye que la producción de briquetas a partir de residuos orgánicos desempeña un papel crucial en la transición hacia un futuro energético más limpio y sostenible, contribuyendo a la gestión de residuos y la preservación de los recursos naturales.

**Palabras clave:** <BRIQUETAS>, <BIOENERGÍA>, <PRODUCCIÓN>, <RESIDUOS>, <CALIDAD>, <MEDIO AMBIENTE>.

0368-DBRA-UPT-2024



## ABSTRACT

Briquette production in Ecuador has been little studied, which has made it difficult to understand its quality, environmental impact and economic viability as an alternative for bioenergy production. Therefore, the objective of this research is to carry out a "Technical analysis of briquettes obtained from agroindustrial wastes for bioenergy production". The methodology used combined qualitative and quantitative approaches, starting with physicochemical and physicomechanical characterizations according to the Colombian Technical Standard NTC 2060 to evaluate the quality of the briquettes. In addition, a comparative analysis was carried out to identify the optimal production process in case of non-compliance with the standards. In addition, a cost analysis was carried out to determine production costs through variable and fixed costs for a specific daily production. The environmental impact of the use of briquettes was also evaluated in comparison with other bioenergy sources. The results revealed that three types of briquettes made from biomass residues meet the technical requirements established by the Colombian Technical Standard NTC 2060. In economic terms, it was determined that the price per ton of briquettes for a daily production of 1,000 3 kg bags is \$460. In addition, it was shown that the environmental impact of using briquettes made from a combination of biomasses is low compared to other bioenergy sources. In this context, it is concluded that the production of briquettes from organic waste plays a crucial role in the transition to a cleaner and more sustainable energy future, contributing to waste management and the preservation of natural resources.

**Key words:** <BRIQUETTES>, <BIOENERGY>, <PRODUCTION>, <WASTE>, <QUALITY>, <ENVIRONMENT>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132

## **INTRODUCCIÓN**

En los últimos años, la fabricación de briquetas ha experimentado un notable crecimiento, focalizado especialmente en la producción de bioenergía a partir de biomasa. Aunque en sus inicios, en la década de 1980 el briquetado enfrentó desafíos debido al bajo precio de los combustibles y a problemas asociados con la higroscopicidad de las briquetas producidas, la constante investigación en fuentes de bioenergía ha consolidado a las briquetas como una alternativa prometedora en la actualidad, estas briquetas elaboradas a partir de residuos agroindustriales, no solo destacan por su elevado poder calorífico, sino que también representan una solución respetuosa con el medio ambiente en comparación con los combustibles fósiles. Además, la optimización en los procesos de producción ha permitido reducir sus costos, convirtiéndolas en una opción competitiva y beneficiosa tanto para la gestión de residuos como para la preservación de los recursos naturales.

Con el objetivo de impulsar el desarrollo sostenible de la producción de bioenergía, se llevó a cabo un estudio técnico exhaustivo que analizó seis variantes de briquetas obtenidas a partir de residuos agroindustriales. Este estudio integral no se limitó únicamente a la observación de los aspectos técnicos y económicos de la producción de briquetas; también comprendió pruebas de laboratorio y análisis comparativo del proceso de fabricación de briquetas que ha permitido identificar ventajas significativas en términos de eficiencia y sostenibilidad en comparación con otras fuentes de bioenergía. La evolución constante de este proceso, respaldada por pruebas de laboratorio y un análisis detallado de costos, ha demostrado el potencial de las briquetas como una alternativa viable y competitiva en el panorama energético actual.

## CAPÍTULO I

### 1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

En el siguiente capítulo se analiza las diferentes problemáticas que tenemos en la investigación para comprender el enfoque del estudio.

#### 1.1. Planteamiento del problema

Según Peláez y Espinoza (2015), la fabricación de briquetas en Ecuador surgió a partir del análisis del briquetado, el cual se dio a mediados del año 1980 en la provincia de Guayas con el fin de vender briquetas a los ingenios azucareros; sin embargo, el proyecto no prosperó dado el bajo precio de los combustibles y problemas con la higroscopicidad de las briquetas producidas. En aquellos tiempos, en la elaboración de briquetas no se contaba con recursos económicos para realizar un estudio previo y analizar la factibilidad del producto elaborado (pág. 52).

El Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables actualmente trabaja en la obtención de briquetas que cumplan con los estándares de la normativa española BSEN-14961. Algunos de los estándares que se buscan cumplir mediante el pre- y pos-tratamiento, son: poder calorífico, porcentaje de humedad, porcentaje de cenizas, porcentaje de carbono fijo, porcentaje de material volátil, porcentaje de azufre (INER, 2016, pág. 44).

Para Bermeo (2019), el fabricar briquetas se ha convertido en un proceso muy innovador, especialmente al usar residuos agroindustriales que poseen un alto potencial para ser aprovechados en diferentes aplicaciones que incluyen la elaboración de nuevos productos, aportar valor agregado a los productos originales y recuperar condiciones alteradas (pág. 6).

Este trabajo formará parte de las investigaciones que realiza el Grupo de Investigación en Materiales Avanzado (GIMA), que busca analizar materiales a través de estudios de laboratorio para aplicaciones energéticas y medio ambientales. Por esta razón, se pretende realizar mediante ensayos y pruebas (poder calorífico, porcentaje de cenizas, porcentaje de humedad, porcentaje de material volátil, porcentaje de carbono fijo y porcentaje de azufre) que las briquetas obtenidas a partir de residuos agroindustriales cumplan con todos los parámetros que establece la Norma Técnica Colombiana (NTC 2060) para su posterior aceptación en las diferentes industrias (ICONTEC, 1987, pág. 2).

## **1.2. Justificación**

La fabricación de briquetas genera una opción para reutilizar los residuos de los procesos agroindustriales, evitando que estos sean quemados, almacenados en grandes espacios físicos o arrojados a los ríos. Su elaboración busca que sean amigables con el medio ambiente y económicas para su uso posterior en la industria (PLANEE, 2016, pág. 40).

Uno de los objetivos de este trabajo consiste en analizar 6 tipos de briquetas obtenidas mediante residuos orgánicos, esto a partir de la combinación de biomasa. Las briquetas fueron elaboradas por los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). Su función principal fue determinar el poder calorífico de los residuos. Por lo tanto, se realiza esta investigación para determinar si las briquetas elaboradas con residuos orgánicos cumplen con los estándares de calidad, medio ambiente y si son viables económicamente en el ámbito comercial. Además, conocer si el proceso de elaboración de las briquetas es el óptimo y apropiado al considerar las características del producto.

Así, este proyecto técnico tiene por finalidad analizar y comprobar que las briquetas obtenidas a partir de residuos agroindustriales cumplan con la Norma Técnica Colombiana NTC 2060. Este análisis se realiza mediante pruebas fisicoquímicas y fisicomecánicas desarrolladas al interior de un laboratorio (ICONTEC, 1987, pág. 2).

## **1.3. Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

Realizar el análisis técnico de briquetas obtenidas a partir de residuos agroindustriales para la producción de bioenergía.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Realizar las caracterizaciones fisicoquímicas y fisicomecánicas de briquetas elaboradas a partir de residuos agroindustriales, utilizando la Norma Técnica Colombiana NTC 2060.
- Determinar si el proceso de elaboración de briquetas con residuos agroindustriales es el óptimo para la producción de bioenergía.
- Analizar los costos de producción de briquetas elaboradas con residuos agroindustriales.
- Estimar el impacto ambiental del uso de briquetas.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se desarrolla un estudio del arte enfocado en analizar cada punto importante de nuestra investigación. Así mismo, se toma en cuenta las referencias teóricas que son la base para comprender de mejor manera dicho estudio.

#### 2.1. Antecedentes del proyecto

El uso de residuos agroindustriales puede solucionar múltiples problemas ambientales derivados tanto de la generación y eliminación de esos residuos como de otros factores producidos por el desarrollo de otras industrias. Asimismo, su aprovechamiento puede reducir el consumo de recursos naturales renovables y no renovables utilizados como materia prima en distintos productos y, a la vez, generar empleo y recursos económicos. Es importante destacar que la valorización de residuos es una alternativa que estimula el desarrollo de tecnologías que favorezcan una transformación sustentable de los recursos naturales (INER, 2016, págs. 39-40).

Para Vargas y Pérez (2018), la gestión de residuos es un tema crítico y cada vez cobra mayor importancia. En el sector agroindustrial, la generación de residuos es una preocupación constante, pero existen tecnologías que ofrecen una solución. Estas tecnologías se pueden clasificar en tres grupos principales: valorización biológica y química, obtención de combustibles a partir de desechos, y valorización térmica. El primer grupo permite la obtención de gases, líquidos o sólidos comercializables como pectinas, enzimas, aceites esenciales y fibra dietética que puede ser utilizada como alimento tanto para animales como para seres humanos. El segundo grupo se enfoca en la producción de combustibles (como la elaboración de briquetas para la producción de bioenergía). Por último, el tercer grupo busca reducir el volumen de los residuos y recuperar energía a partir de los gases, líquidos y sólidos generados, utilizando procesos como la incineración y pirólisis. Es importante señalar que estas tecnologías de recuperación permiten la valorización de los residuos agroindustriales, brindando una alternativa sostenible para la eliminación de los residuos y contribuyendo a la conservación de los recursos naturales (pág. 60).

El uso racional de los residuos agroindustriales se presenta como una estrategia apropiada desde el punto de vista ambiental y económico para el manejo de subproductos. En la elección de la mejor alternativa para el aprovechamiento y tratamiento de estos residuos, resulta fundamental conocer la composición, calidad y cantidad de los componentes presentes en los mismos. La

preservación de propiedades organolépticas y moleculares de diversos residuos agroindustriales, incluyendo los orgánicos, constituye un aspecto clave para optimizar los procesos posteriores. En este sentido, se recomienda realizar una etapa de secado o deshidratación previa a la conservación a largo plazo de los residuos orgánicos, con el objeto de remover el exceso de agua presente en los mismos (Vargas y Pérez, 2018, pág. 61).

Según Aguilar (2021), los residuos agroindustriales repercuten en el medio ambiente, tanto de manera negativa como positiva. Cada proceso productivo dentro de la agroindustria, independientemente de su escala, genera residuos que presentan diferentes niveles de complejidad según sus características particulares. Estos residuos pueden ser perjudiciales si no se gestionan adecuadamente, ya que provocan alteraciones adversas en el medio ambiente que afectan negativamente el desarrollo de los seres vivos. Sin embargo, si se les aprovecha de manera adecuada, los residuos agroindustriales pueden colaborar en la prevención de la contaminación de diversos ecosistemas y pueden contribuir a recuperar las condiciones ambientales que han sido dañadas por las acciones humanas, lo que lograría mejorar la calidad del ambiente y, por lo tanto, evitar afectaciones en la salud humana. Cuando se reciclan o utilizan los residuos para prevenir la contaminación o restaurar ecosistemas alterados, se pueden obtener grandes ventajas. La gran variedad de estos restos orgánicos se puede utilizar principalmente para la producción de compost y bioenergía (pág. 650).

La producción de bioenergía, como biocombustibles (bioetanol, biodiésel, biogás), contribuye a reducir el consumo de combustibles fósiles, luchar contra el cambio climático mediante el uso de tecnologías libres de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar la competitividad de la economía. En este sentido, el aprovechamiento de los desechos orgánicos derivados de la actividad agroindustrial ayuda a prevenir la contaminación y evita la disposición directa de los residuos en el medio ambiente, convirtiéndolos en productos menos contaminantes y contribuyendo a la conservación de los recursos naturales no renovables y renovables. Todo esto promueve un desarrollo sostenible de nuestra economía (Vargas y Pérez, 2018, pág. 62).

La bioenergía se refiere a la producción de energía a partir de biomasa, que consiste en materia viva o sus productos derivados. En comparación con la quema de combustibles fósiles, los biocombustibles son una alternativa energética más sostenible, ya que evitan la emisión de gases de efecto invernadero, que contribuyen significativamente a detener el cambio climático (Vargas y Pérez, 2018, pág. 63).

Los cultivos de maíz, caña de azúcar y palma de aceite son, considerados cultivos bioenergéticos, ya que los residuos de su cosecha o procesamiento pueden ser utilizados para la fabricación de biocombustibles. En México evaluaron la energía disponible en la biomasa de residuos de caña de azúcar. Para esta evaluación, 25 ingenios azucareros determinaron que para la cosecha 2013-2014 se procesaron 52'246.508 toneladas de caña. La biomasa que se aprovechaba energéticamente venía del bagazo y las puntas de tallo. El PCI (poder calorífico inferior o neto) promedio obtenido por tonelada de caña procesada representó un total de 57'277.234,6 TJ de energía disponible, equivalentes a 9'870.441,8 barriles de petróleo. Es relevante recordar que el poder calorífico representa la cantidad de calor que se libera durante la combustión por unidad de masa a presión constante. De esta cantidad disponible de energía, 6'698.332,1 barriles de petróleo se utiliza como fuente energética para las calderas de los ingenios en el país (Muñoz, 2013, pág. 156).

Según Muñoz (2013), se evaluó el potencial energético de tres tipos de biomasa residual agroindustrial: el bagacillo de caña, el polvillo de fique y el afrecho de yuca. De esta manera, se identificó diversas fuentes renovables de energía que podrían utilizarse para generar electricidad u otros fines similares sin tener que recurrir a los combustibles fósiles. Los residuos evaluados presentaron un poder calorífico promedio de 15.623,35 kJ/kg, y el bagacillo de caña fue el residuo que más energía aportó. Por otro lado, en Colombia, otros autores como Potter (2011) detallan que en la industria del aceite de palma los racimos vacíos, fibras y efluentes líquidos con alto contenido de componentes orgánicos, constituyen una importante fuente de subproductos con alto potencial energético que pueden ser aprovechados. Los resultados de la investigación demuestran el potencial de generar energía eléctrica por cogeneración en tres plantas de beneficio ubicadas en dos regiones importantes del área productora de aceite de palma en Colombia. Se determinó que la biomasa disponible en dichas plantas no solo satisface la demanda de energía requerida en el proceso, sino que también permite producir excedentes de electricidad (pág. 158).

Si algo se puede afirmar con seguridad es que el uso de briquetas elaboradas para la producción de bioenergía puede tener un impacto ambiental positivo si se utilizan de manera adecuada y sostenible, esto sin recurrir a los combustibles fósiles que contribuyen al cambio climático. Sin embargo, con toda la información mencionada se estima que el uso de briquetas como fuente de energía puede ser una alternativa sostenible y efectiva para la valorización de residuos sólidos generados por la industria. Estas briquetas son producidas a partir de materiales residuales que usualmente se acumularían en rellenos sanitarios. Con la utilización de briquetas se puede aprovechar estos residuos mediante el proceso de "Valorización de Residuos" que consiste en la producción de energía a partir de la combustión de las briquetas. Este proceso contribuye a minimizar el daño ambiental ya que evita que los residuos sólidos terminen en vertederos y, a su vez, colabora con la producción de energía útil para diversas actividades. Además, las briquetas

son una solución innovadora y sostenible como combustible, compuestas en su mayoría por residuos agroindustriales (López, 2015, págs. 4-7).

Con el objetivo de avanzar en la producción de bioenergía, se lleva a cabo un estudio técnico que analiza seis tipos de briquetas obtenidas a partir de residuos agroindustriales. Estas briquetas se produjeron en la Escuela Superior Politécnica (Espoch) y son sometidas a una caracterización fisicoquímica a través de pruebas de laboratorio para determinar el cumplimiento de la Norma Técnica Colombiana NTC 2060. En la Tabla 2-1, se detallan varios estudios sobre briquetas realizados por otros autores (ICONTEC, 1987, pág. 2).

**Tabla 2-1:** Estudios de briquetas realizados por otros autores

| <b>Referencia</b> | <b>Residuo</b>  | <b>Título</b>  | <b>Año</b> |
|-------------------|---|--|------------|
| Caiza (2022)      | Tallos de quinoa (TQ)<br>Cáscara de piña (CP4)                | Determinación del poder calorífico de la biomasa de tallos de quinoa y cáscara de piña con la combinación de nanopartículas de aluminio.   | 2022       |
| Frías (2022)      | Cáscaras de piña (CP1).<br>Bagazo de la caña de azúcar (BCA). | Determinación del poder calorífico de las cáscaras de piña y del bagazo de la caña de azúcar enriquecidos con nanopartículas de aluminio como alternativa de nuevas fuentes de energía   | 2022       |
| Guevara (2022)    | Tusa de maíz (TM).<br>Cáscara de papa (CP3).                  | Determinación del poder calorífico de residuos agroindustriales de tusa de maíz y cáscara de papa enriquecidas con nanoesferas de celulosa como opción viable en procesos de combustión. | 2022       |
| Huaraca (2022)    | Cáscara de trigo (CT).<br>Paja de cebada (PC).                | Determinación del poder calorífico de los residuos agroindustriales de cáscara de trigo y paja de cebada enriquecidos con nanopartículas de celulosa como una alternativa de energía.    | 2022       |
| Jama (2022)       | Cascarilla de arroz (CA).<br>Cáscara de coco (CC).            | Determinación del poder calorífico de los residuos sólidos agroindustriales de cascarilla de arroz ( <i>oryza sativa</i> ) y cáscara de coco ( <i>cocos nucifera</i> ) con nanocristales | 2022       |

|                 |  |   |      |
|-----------------|--|---|------|
|                 |  | de celulosa como una nueva alternativa de energía.  |      |
| Medina (2022)   | Cáscara de café (CC).<br>Tallo de plátano (CP2). | Determinación del poder calorífico de los residuos sólidos agroindustriales de cáscara de café y tallo de plátano combinados con nanocelulosa.  | 2022 |
| Bastidas (2022) | Raquis residual de la palma africana             | Producción de briquetas a partir de raquis residual de la palma africana para las comunidades alfareras del norte del Cesar.  | 2022 |
| Salcedo (2021)  | Árbol de teca                                    | Elaboración de las Briquetas de carbón a partir de las hojas del árbol de teca.   | 2021 |
| Mendoza (2020)  | Serrín de acacia y estiércol                     | Fabricación de biocombustibles densificados (briquetas) a base de serrín de acacia y estiércol de bovinos.  | 2020 |
| Arias (2016)    | Cascarilla de arroz y cascarilla de café         | Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol, Laboratorios de Química. | 2016 |

Realizado por: Bernal J., 2023

## 2.2. Referencias teóricas

### 2.2.1. Residuos agroindustriales

Los procesos productivos generan subproductos o residuos que, por lo general, no son útiles como materia prima en la cadena de producción posterior. El sector agroindustrial no es la excepción, y produce residuos que pueden ser descritos como materiales sólidos o líquidos que se generan durante el consumo directo de los productos primarios o derivados de su proceso de producción, pero que ya no son útiles para el proceso que los generó. Estos residuos pueden aprovecharse o transformarse en otros productos que tienen valor económico, comercial o social. Cada subsector de la agroindustria produce residuos específicos que en su mayoría presentan características idóneas para su reutilización en otra cadena de producción o como una alternativa para tratar o recuperar medios contaminados (Vargas y Pérez, 2018, pág. 60).

**Tabla 2-2:** Tipos de residuos utilizados en la elaboración de briquetas

| <b>Residuos agroindustriales</b> | <b>Características</b>   |
|----------------------------------|--|
| <b>Quinoa</b>                    | Es una planta originaria de la región andina, cuyo nombre científico es también <i>Chenopodium Quinoa</i> , que produce semillas con un alto valor nutricional debido a su elevado contenido de proteínas y aminoácidos esenciales, capaz de soportar niveles variantes de temperatura y condiciones climáticas intolerables para otras plantas (Rojas, 2016, pág. 2).   |
| <b>Piña</b>                      | La piña se origina en América tropical, especialmente en Brasil, siendo su nombre original Anana, del cual se deriva su nombre científico. Es una planta tropical que se cultiva en lugares con ambientes cálidos y es un fruto muypreciado a nivel internacional debido a su rico sabor (Montilla, 1997, pág. 17).  |
| <b>Bagazo de caña de azúcar</b>  | La caña de azúcar, conocida científicamente como <i>Saccharum Officinarum</i> , es ampliamente utilizada para la producción de azúcar a través del proceso de molienda en trapiches para la extracción de su jugo. Además, se emplea como combustible en calderas, generando vapor para el funcionamiento de máquinas térmicas y para diversos procesos, como calentamiento, concentración, cocimiento, secado (Rodríguez, 2017, pág. 528).                            |
| <b>Maíz</b>                      | El maíz, cuyo nombre científico es <i>Zea Mays</i> , es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial gracias a su capacidad para adaptarse a diversas condiciones ecológicas. La biomasa residual del maíz se puede aprovechar para producir biocombustibles de manera eficiente y amigable con el medio ambiente, reduciendo así la quema de estos residuos agrícolas y aprovechando su potencial (Izquierdo, 2012, págs. 22-27).                              |
| <b>Papa</b>                      | La papa ( <i>Solanum tuberosum</i> ) es una planta herbácea que pertenece al grupo de las dicotiledóneas. Puede presentarse en forma rastrera o erecta, siendo común en ella tallos gruesos y robustos con entrenudos cortos (Pumisacho y Sherwood, 2012, págs. 15-23).  |
| <b>Trigo</b>                     | El trigo ( <i>Triticum</i> ) es un cereal que se cultiva en grandes extensiones de tierra en todo el mundo. Una de las más relevantes es el aprovechamiento de su cáscara como residuo agroindustrial. La cáscara de trigo es un material fibroso que puede ser utilizado en la producción de biocombustibles, la elaboración de materiales compuestos y como fuente de materia orgánica en la agricultura, entre otras aplicaciones (Chaquilla, 2017, págs. 137-139). |

|                |  |
|----------------|--|
| <b>Cebada</b>  | La paja de cebada es un residuo agroindustrial que se produce en grandes cantidades durante el procesamiento del cereal de cebada ( <i>Hordeum Vulgare</i> ). Tiene un gran potencial para ser aprovechada en diversas aplicaciones industriales, como la producción de biocombustibles, la elaboración de materiales compuestos y como una fuente de materia orgánica en la agricultura (Contreras, 2008, pág. 202).  |
| <b>Arroz</b>   | El arroz ( <i>Oryza Sativa</i> ) se encuentra entre los granos más ampliamente utilizados en todo el planeta, representando un alimento básico en muchas culturas y regiones del mundo. La cascarilla de arroz es la capa externa del grano de arroz, y posee propiedades térmicas, acústicas y mecánicas. Puede ser utilizada como fuente de materia orgánica para la producción agrícola, ya que es rica en nutrientes y fibra (Bayas, 2012, págs. 10-12).     |
| <b>Coco</b>    | El coco, conocido científicamente como <i>Cocos Nucifera</i> , es una fruta tropical obtenida del cocotero, una de las palmeras más importantes. La cáscara de coco es versátil y puede ser aprovechada como materia prima en la producción de hortalizas y plantas florales, debido a que contiene propiedades aislantes que regularizan la temperatura del sustrato y su efecto drenante favorece la circulación de agua y aire (Carvajal, 2016, págs. 29-31). |
| <b>Café</b>    | Su nombre científico es <i>Coffea Arábica</i> y es originario de Etiopía. Esta planta se cultiva en zonas tropicales de todo el mundo. La cáscara de café es rica en nutrientes y puede utilizarse como abono orgánico para la producción agrícola. La cáscara de café también se ha utilizado en la producción de biocombustibles, debido a su contenido en carbono y su potencial energético (Arias y Meneses, 2016, págs. 8-10).                              |
| <b>Plátano</b> | El plátano, conocido científicamente como <i>Musa X Paradisiaca</i> , es una de las frutas más consumidas en todo el mundo. Además, esta fruta también contiene ácido fólico, vitamina C y diferentes compuestos antioxidantes. En cuanto al tallo de plátano, este se considera un residuo agroindustrial en la producción de plátanos. Sin embargo, es una fuente valiosa de materia prima renovable (Motato, 2005, pág. 25).                                  |

Realizado por: Bernal J., 2023

### 2.2.2. *Briquetas*

Las briquetas son un tipo de biocombustibles o bioenergías que se obtienen principalmente a partir de residuos lignocelulósicos, también conocidos como materia seca. Estos residuos pueden

provenir de diversas fuentes, como la madera, los bosques, el aserrín o las cáscaras de arroz. Por lo general, las briquetas se elaboran a partir de biomasa compactada.

El propósito de la elaboración de briquetas es revalorizar la materia orgánica que produce calor mediante procesos de combustión. Esto contribuye a sustituir los combustibles fósiles convencionales que se utilizan ampliamente y les da a los residuos agroindustriales un destino final más adecuado que ser desechados en vertederos. Existen muchas variedades de briquetas de diferentes tipos, ya que pueden ser elaboradas a partir de diversos materiales compactados, como la biomasa residual, natural, el carbón vegetal, entre otros. Las briquetas son 100 % biodegradables, ecológicas y naturales, y producen una combustión completa sin generar grandes cantidades de contaminantes, debido a que están fabricadas con materia orgánica. Por este motivo, tienen un mayor poder calorífico que la leña (Vera, 2021, pág. 26).



**Ilustración 2-1:** Briquetas orgánicas

**Fuente:** Vera, 2021

### **2.2.3. Norma Técnica Colombiana NTC 2060**

La NTC 2060 define los requisitos técnicos que deben cumplir las briquetas para su uso doméstico. Las especificaciones técnicas de esta norma aseguran la calidad y seguridad de las briquetas como combustibles. Con el fin de garantizar un mejor ambiente y un aprovechamiento de residuos, esta norma ayuda a implementar las mejores prácticas y a generar un mercado de briquetas estandarizado en Colombia. Así, las normas técnicas aseguran que las briquetas sean de calidad óptima, mejorando las condiciones de vida y disminuyendo el impacto ambiental (ICONTEC, 1987, pág. 1).

### **2.2.4. Requisitos técnicos para la fabricación de las briquetas**

La producción de briquetas requiere de recursos técnicos nacionales adecuados. Sin embargo, para asegurar su calidad y cumplir con los estándares internacionales, es necesario tener en cuenta

los requisitos técnicos establecidos por la norma NTC 2060. Estos requisitos están detallados en la Tabla 2-3 y deben ser cumplidos rigurosamente para garantizar la calidad de las briquetas, así como la seguridad y la calidad del proceso de producción.

**Tabla 2-3:** Requisito de resistencia a la compresión

| <b>La cantidad de masa que posee cada briketa se mide en gramos por unidad de briketa (gr/briketa)</b> | <b>Rm, mínimo en N (kgf)</b> |
|--|------------------------------|
| 60 o más   | 784,31 (80)                  |
| 40   | 588,23 (60)                  |
| 30   | 490,19 (50)                  |
| 20   | 392,15 (40)                  |

Fuente: ICONTEC, 1987

Realizado por: Bernal J., 2023

La Tabla 2-3 establece los valores que deben cumplirse en términos de la resistencia a la compresión. El cumplimiento de estos requisitos técnicos asegura la calidad y seguridad de las briquetas como combustible para el consumo doméstico (ICONTEC, 1987, pág. 3).

### **2.2.5. Propiedades y características de las briquetas**

Según la normativa ICONTEC (1987), las briquetas son compuestas principalmente por material orgánico que garantiza la protección del medio ambiente. Además, poseen un alto poder calorífico, también conocido como biomasa sólida. Estas briquetas se pueden obtener a partir de residuos y desperdicios como el aserrín, el arroz, el café, la caña de azúcar, la pulpa del papel y el coco, entre otros. Las dimensiones estándar para la fabricación de briquetas son 5 cm de diámetro y una longitud que varía entre 50 y 80 cm. Las características fundamentales de las briquetas incluyen densidad, humedad, combustión y emisión de cenizas, las cuales están detalladas en la Tabla 2-4 que presenta las principales especificaciones técnicas para garantizar un producto de calidad.

**Tabla 2-4:** Requisitos técnicos de las briquetas

| <b>Propiedades</b>  | <b>Tipo 1</b> |
|---|---------------|
| Poder calorífico, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ , mínimo        | 21000         |
| Porcentaje de cenizas, (%) $\frac{\text{m}}{\text{m}}$ , máximo | 30            |
| Porcentaje de carbono fijo, masa, mínimo                        | 50            |
| Porcentaje de material volátil, máximo                          | 15            |
| Porcentaje de humedad, máximo                                   | 2.5           |
| Porcentaje de azufre, $\frac{\text{m}}{\text{m}}$ , máximo      | 1.0           |

Fuente: ICONTEC, 1987

Realizado por: Bernal J., 2023

La Tabla 2-4 define los límites permisibles para la humedad, el porcentaje de ceniza, el poder calorífico y otros parámetros importantes para el uso de las briquetas como combustible. El cumplimiento de estos requisitos técnicos asegura la calidad y seguridad de las briquetas como combustible para el consumo doméstico (ICONTEC, 1987, pág. 2).

### **2.2.6. Parámetros y variables fisicoquímicos de las briquetas**

#### **2.2.6.1. Poder calorífico**

El poder calorífico es el parámetro más importante a considerarse cuando se comparan combustibles alternativos. Este valor indica la cantidad de energía que se puede obtener de un material por unidad de masa y se expresa en Joules por kilogramo (J/kg). Se determina midiendo la cantidad de energía que se libera cuando se quema completamente la biomasa después de haberla calentado. Un mayor poder calorífico se traduce en una mayor cantidad de energía liberada por la combustión, lo que a su vez resulta en una mayor generación de vapor, incrementando la producción de energía. Sin embargo, medir el valor calorífico de los residuos o combustibles sólidos puede ser costoso y requiere de equipos especializados como la bomba calorimétrica, que mide la temperatura de combustión de las muestras. Por lo tanto, es importante tener en cuenta el poder calorífico al seleccionar un combustible adecuado, ya que esto puede marcar la diferencia en la cantidad de energía generada y en los costos asociados (Ahumada, 2016, pág. 180).

#### *2.2.6.2. Humedad*

En la producción a escala semi-industrial de briquetas, es esencial contar con una mezcla homogénea de biomásas que tenga una humedad adecuada, la cual no debe ser superior al 20 % ni inferior al 15 %. Si la humedad es demasiado alta, puede activar en exceso el aglutinante y hacer que se pegue en el molde de la maquina briquetadora; mientras que, una humedad demasiado baja puede hacer que la mezcla sea deficiente y resulte en briquetas quebradizas. Determinar el porcentaje de humedad es crucial para lograr objetivos técnicos, económicos y científicos. Para medir la humedad existen varias metodologías disponibles, tales como la destilación, el secado, y los procedimientos químicos e instrumentales (Bastidas, 2022, pág. 196).

#### *2.2.6.3. Cenizas*

En los alimentos, el término "cenizas" se refiere a la cantidad de materia inorgánica que queda después de incinerar la materia orgánica. Es importante tener en cuenta que existen condiciones específicas para llevar a cabo este análisis, dependiendo del material. Determinar la cantidad de cenizas es una medida general de calidad que nos permite identificar de manera confiable la autenticidad de la materia prima. Si el valor de cenizas se encuentra fuera de los parámetros establecidos, se indica que hay una menor presencia de compuestos inorgánicos en el producto, lo que puede afectar su calidad. Por lo general, la metodología más utilizada para determinar las cenizas implica la calcinación de la muestra a una temperatura entre 500 - 550 °C en un secador o mufla (Sandoval, 2011, pág. 25).

#### *2.2.6.4. Carbono fijo*

El carbono fijo se refiere al porcentaje de carbón que queda en una muestra de biomasa después de eliminar todo el material volátil a través de la calcinación. En el caso de las briquetas, este parámetro es importante ya que puede indicar su calidad. El método más común para medir el porcentaje de carbono fijo en las briquetas implica medir el contenido de carbono fijo antes y después de la calcinación para establecer cuánto queda después de eliminar el material volátil. Estos resultados son útiles para identificar y controlar la calidad de las briquetas (Vera, 2021, pág. 41).

#### *2.2.6.5. Material volátil*

Se refiere a la cantidad de materia orgánica que se evapora cuando se calienta una muestra de biomasa a una determinada temperatura. Para medir el porcentaje de material volátil en las briquetas es necesario realizar un análisis de laboratorio en el que se mida la cantidad de materia orgánica que se evapora cuando se calienta la muestra a una temperatura específica. Este análisis consiste en calentar una muestra de las briquetas a una temperatura específica, generalmente entre 450 - 750 °C, en una atmósfera controlada para evitar la oxidación completa del material orgánico (Vera, 2021, pág. 41).

#### *2.2.6.6. Contenido de azufre*

Es una medida del porcentaje de azufre presente en una muestra de biomasa. En el caso de las briquetas de biomasa, el contenido de azufre puede ser un indicador importante de la calidad del combustible y puede afectar su rendimiento. La prueba de contenido de azufre en las briquetas se lleva a cabo utilizando un analizador de espectroscopía de fluorescencia de rayos X. Primero, se toma una muestra de la briqueta y se pulveriza para obtener una muestra homogénea. Luego, la muestra se coloca en el analizador de espectroscopía de fluorescencia de rayos X y se le aplica radiación electromagnética para excitar los electrones del átomo de azufre. El análisis del contenido de azufre es importante para garantizar el cumplimiento de las regulaciones de emisiones y para prevenir daños a los equipos que queman los combustibles (Mendoza, 2020, págs. 451-452).

#### *2.2.7. Bomba calorimétrica*

La bomba calorimétrica, conforme se observa en la Ilustración 2-2, es un equipo que permite determinar el poder calorífico de sólidos o líquidos, mediante su combustión completa en una atmósfera de oxígeno. Es importante conocer la cantidad de masa de la muestra y el aumento de temperatura que se produce al quemarla dentro de la celda de medición. La bomba introduce el gas (oxígeno) a través de una válvula en el recipiente calorimétrico lleno de agua, que se introduce en una camisa de doble pared llena también de agua (Beltrán y Guerrero, 2018, pág. 1).



**Ilustración 2-2:** Bomba calorimétrica GDY-1A

Fuente: Beltrán y Guerrero, 2018

### 2.2.8. Norma ASTM D695

La norma ASTM D695 es una reglamentación utilizada en la caracterización de propiedades mecánicas de plásticos rígidos. Esta norma establece los procedimientos y condiciones para realizar pruebas de compresión en materiales plásticos bajo cargas uniaxiales. La norma ASTM D695 especifica los requisitos para la preparación de las muestras, el equipo de prueba y los parámetros de ensayo. Durante el ensayo, se aplica una carga uniaxial gradual a la muestra hasta que se produce la falla o deformación plástica significativa (Raheem, 2019, pág. 1).

### 2.2.9. Parámetros y variables fisicomecánicas

#### 2.2.9.1. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es una propiedad fisicomecánica que permite evaluar la rigidez de un material y representa la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante. Esta propiedad es importante porque permite evaluar la capacidad de un material para volver a su forma original después de someterse a una carga y su capacidad para soportar cargas repetidas sin deformarse permanentemente (Ruiz y Díaz, 2015, pág. 3).

#### *2.2.9.2. Resistencia máxima*

La resistencia máxima es otra propiedad fisicomecánica importante que se evalúa en los materiales. Esta propiedad representa la capacidad de un material para soportar cargas o esfuerzos sin sufrir una deformación plástica permanente. Es decir, la resistencia a la fluencia indica la carga máxima que un material puede soportar sin perder su forma original o sufrir daños irreparables. Esta propiedad es especialmente importante en aplicaciones donde los materiales están sujetos a cargas de manera continua y en la fabricación de piezas que deberán soportar cargas sin sufrir cambios en su forma original (Ruiz y Díaz, 2015, pág. 6).

#### *2.2.9.3. Tensión máxima*

La tensión es una prueba en la que se aplica una carga gradual al material y se registra la cantidad de esfuerzo que experimenta a lo largo del tiempo. Esta propiedad es importante en el diseño de estructuras y en la elección de materiales para aplicaciones específicas, ya que permite determinar cuánta carga puede soportar un material y su resistencia a las cargas constantes (Ruiz y Díaz, 2015, pág. 1).

#### *2.2.9.4. Deformación máxima*

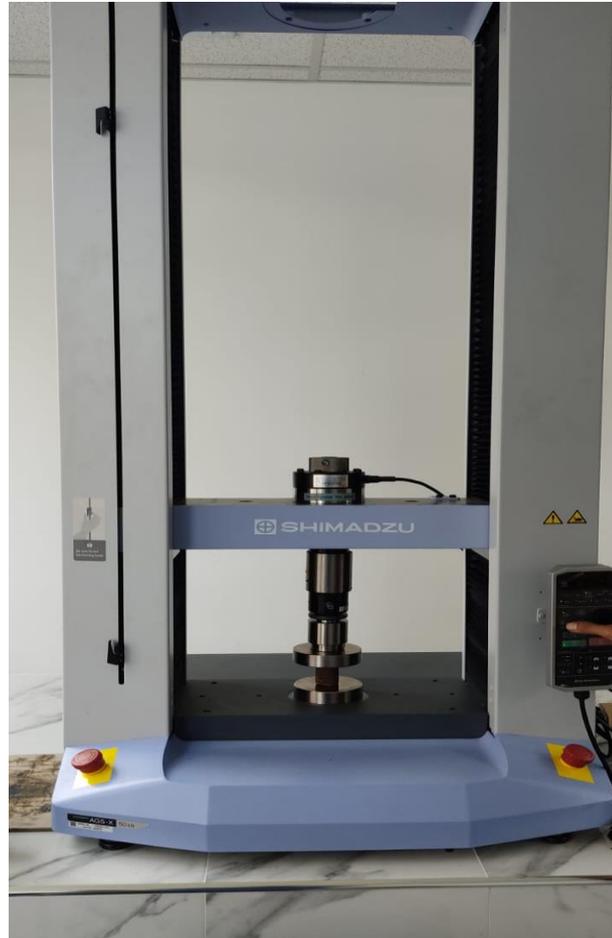
La prueba de deformación consiste en someter las briquetas a una carga gradual hasta que se alcanza la deformación máxima o hasta que se produce la rotura. Durante este proceso, se mide la deformación de la muestra y se registra el máximo valor alcanzado antes de la rotura.

Es importante destacar que la norma ASTM D695 establece procedimientos específicos para asegurar la precisión y reproducibilidad de los resultados de la deformación máxima. Esto incluye requisitos de preparación de muestras, calibración de equipos y métodos de cálculo. Estos datos son valiosos en el desarrollo de nuevos materiales o en la evaluación de la calidad de los materiales existentes (Ruiz y Díaz, 2015, pág. 19).

#### **2.2.10. Máquina universal de polímeros**

La máquina universal de polímeros permite realizar pruebas de compresión uniaxial, aplicando cargas graduales a las muestras y registrando datos precisos de carga y deformación. Es importante destacar en gran medida la preparación adecuada de las muestras. Asegurarse de seguir los procedimientos estándar de preparación y realizar mediciones precisas.

Este equipo aplica una carga gradual sobre las muestras, registrando los parámetros de resistencia mecánica. Estos parámetros incluyen la resistencia máxima, el punto de ruptura y la deformación en función de la carga aplicada. Los resultados obtenidos permiten evaluar la calidad de cada briqueta y determinar su idoneidad para diversas aplicaciones (Jesús, 2013, pág. 37).



**Ilustración 2-3:** Maquina universal de polímeros

**Realizado por:** Bernal J., 2023

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

En el siguiente capítulo se desarrolla cada técnica aplicada para poder cumplir cada objetivo planteado de la investigación.

#### 3.1. Localización del proyecto

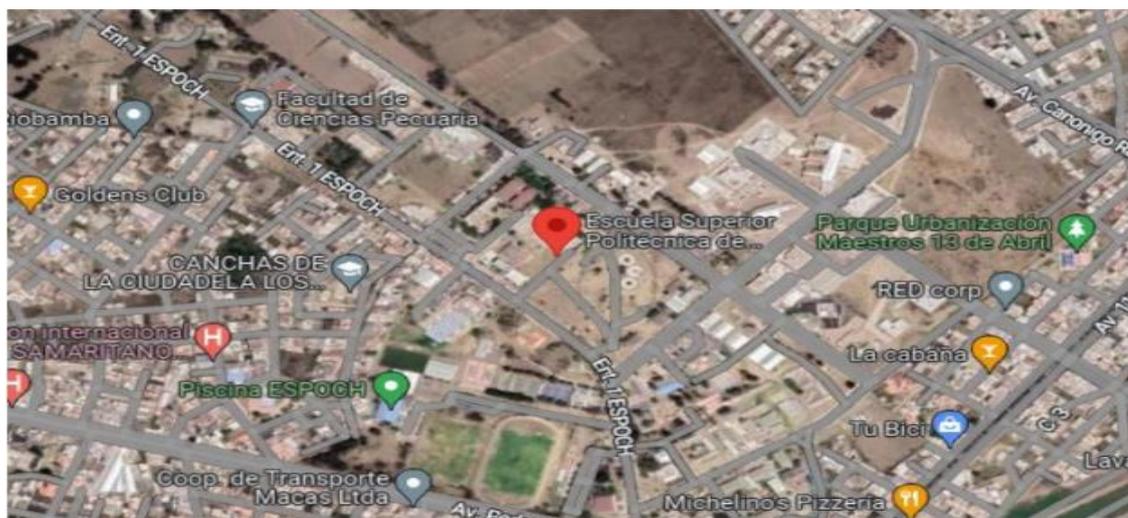
La investigación se lleva a cabo en los laboratorios de Química Analítica e Instrumental de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, los cuales se encuentran en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo, específicamente en el km 1 ½ de la vía panamericana sur.

**Tabla 3-5:** Ubicación y coordenadas de la universidad ESPOCH

| Parámetros  | Descripción    |
|-------------|----------------|
| Provincia   | Chimborazo     |
| Cantón      | Riobamba       |
| Latitud     | 1°39'32,3" sur |
| Coordenadas | 78°40'20"      |

Fuente: Google Maps, 2023

Realizado por: Bernal J., 2023



**Ilustración 3-4:** Localización de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Fuente: Google Maps, 2023

## **3.2. Ingeniería del proyecto**

Para lograr un correcto y óptimo desarrollo de un proyecto técnico, es necesario seguir una serie de pasos clave que se describen a continuación.

### ***3.2.1. Nivel de investigación***

Este proyecto se enmarca en una investigación de carácter exploratorio, ya que su propósito es analizar la producción de briquetas a partir de residuos agroindustriales con el fin de generar bioenergía. Esta iniciativa se sustenta en la exploración de áreas poco estudiadas, tales como la calidad del producto, el impacto ambiental y la viabilidad económica, partiendo de información existente.

### ***3.2.2. Enfoque de investigación***

Para la elaboración de este proyecto, se han utilizado como referencia los métodos cualitativos, cuantitativo. Estos métodos se han aplicado con el propósito principal de realizar un estudio de los datos obtenidos durante el proceso y determinar las condiciones óptimas para el desarrollo de cada briqueta.

- **Cualitativo:** Este enfoque parte de observaciones específicas para llegar a conclusiones generales. En este caso, iniciaré mi investigación recopilando datos específicos sobre los seis tipos de briquetas y sus propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas. A través de la observación de estos datos, buscaré patrones y generalizaciones para entender cómo la utilización de los diferentes residuos agroindustriales influye en las características de las briquetas.
- **Cuantitativo:** Realizaré pruebas fisicoquímicas y fisicomecánicas en los seis tipos de briquetas, donde se realizó una recopilación y análisis de datos numéricos para comparar y garantizar que la briqueta se ajuste a las especificaciones de la Norma Técnica Colombiana NTC 2060.

### ***3.2.3. Técnicas***

Para llevar a cabo la caracterización de las briquetas, se utilizaron normas específicas, haciendo referencia a las características encontradas en diversas fuentes bibliográficas y estudios relevantes. Las técnicas fisicoquímicas empleadas para analizar los seis tipos fueron

cuidadosamente seleccionadas como las más apropiadas para el tipo particular de briqueta que se estudia.

Estos análisis se llevaron a cabo en los laboratorios de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), específicamente en los laboratorios de Analítica, Instrumental e Investigación, donde se realizó la caracterización fisicoquímica. Por otro lado, la caracterización fisicomecánica se efectuó en los laboratorios de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). Se utilizó la máquina universal de polímeros para llevar a cabo los ensayos y se registraron meticulosamente todos los datos establecidos. Ambas técnicas de caracterización, tanto químicas como físicas, fueron realizadas siguiendo la Norma Técnica Colombiana NTC 2060. Los parámetros esenciales que deben cumplir las briquetas se detallan en la Tabla 1 y Tabla 2 de dicha normativa.

### 3.3. Caracterización fisicoquímica según la Norma Colombiana NTC 2060

#### 3.3.1. Poder calorífico

El procedimiento se lleva a cabo siguiendo las especificaciones detalladas por la normativa NTC 2128.

**Tabla 3-6:** Requisitos del poder calorífico

| Propiedades  | Tipo 1            | Tipo 2            |
|--|-------------------|-------------------|
| Poder calorífico, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ , mínimo | 21000<br>(Nota 1) | 12500<br>(Nota 2) |

Fuente: ICONTEC, 1987

Realizado por: Bernal J., 2023

Los valores de la Tabla 3-6 representan medidores de la cantidad de energía liberada por las briquetas al quemarse, en unidades de calorías por unidad de peso (por ejemplo, kilocalorías por kilogramo). Es decir, una briqueta con un poder calorífico mayor generará más energía al quemarse que una con un poder calorífico menor.

##### 3.3.1.1. Determinación del poder calorífico

Para la determinar el poder calorífico nos basamos en Tabla 3-7, que sigue el procedimiento de la bomba calorimétrica.

**Tabla 3-7:** Proceso para la determinación del poder calorífico

| <b>Materiales y equipos</b>   | <b>Reactivos</b>  |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Crisol</li><li>• Tanque de oxígeno</li><li>• Alambre de ignición</li><li>• Bomba calorimétrica</li><li>• Bomba manual</li></ul>   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Ácido benzoico (para calibración)</li><li>• 0.6 <math>\approx</math> 1 gramos de biomasa</li><li>• Agua destilada</li></ul> |
| <b>Procedimiento</b>  |   |
| <ol style="list-style-type: none"><li>1. Conectar el sistema de alimentación eléctrica.</li><li>2. Pesar la muestra a analizar entre el rango determinado y colocar en el crisol de tal manera que el material no se desborde.</li><li>3. Ubicar la tapa del obús en el soporte y situar el crisol entre los dos hilos gruesos verticales.</li><li>4. Medir y cortar el alambre de ignición de acuerdo con lo que se necesite.</li><li>5. Conectar el alambre de ignición entre los dos hilos. El alambre debe rozar la superficie de la muestra.</li><li>6. Envolver la tapa en el obús de acero para la seguridad del equipo.</li><li>7. Conectar la válvula de entrada de <math>O_2</math>, abrir la llave de paso hasta 3 MPa y cronometrar 30 segundos. Pasado este tiempo cerrar, la llave de paso. Desconectar el tanque de <math>O_2</math> de manera rápida para no dejar escapar tanta cantidad de oxígeno.</li><li>8. Ubicar el obús en el fondo del vaso del calorímetro y conectar los cables de conexión eléctrica. Ver el Anexo A.</li><li>9. Con la ayuda de la bomba manual llenar con agua destilada la vasija de doble pared. El agua debe quedar por debajo de la conexión eléctrica.</li><li>10. Tapar la bomba e insertar el termómetro digital.</li><li>11. Una vez todo este bien conectado, se enciende el agitador. Después de que el equipo registre 10 datos de temperatura, se inicia la ignición.</li><li>12. A continuación, se registran los datos de temperatura cada 30 segundos, cuando el registro se encuentre en un rango de 26 y 31 se puede dar fin al proceso.</li><li>13. Se procede a tomar los datos de temperatura y se apaga el agitador.</li><li>14. Por último, se extrae el obús de la vasija se desconectan los cables eléctricos y con la ayuda de la válvula de desfogue se eliminan los gases producidos por la combustión. De esta manera la tapa se desenrosca fácilmente.</li></ol> |   |

Realizado por: Bernal J., 2023

Antes de proceder con el análisis calorimétrico de cualquier muestra, se determina la capacidad calorífica del equipo con la siguiente Ecuación 3-1.

$$\epsilon = \frac{Q_c \times M_c + 40}{\Delta T} \quad (3-1)$$

Para la determinación del poder calorífico se usa la siguiente Ecuación 3-2:

$$Q = \frac{\epsilon \times \Delta T - 40}{G}, \quad (3-2)$$

donde

$\epsilon$  es la capacidad calorífica del equipo  $\left(\frac{J}{^\circ C}\right)$ ,

$Q_c$  es el valor calorífica del ácido benzoico  $\left(\frac{J}{g}\right)$ ,

$M_c$  es el peso del ácido benzoico (g),

40 representa el calor adicional del cable de encendido (J),

$G$  es el peso de la muestra puesta en el crisol (g),

$\Delta T$  es el incremento de temperatura en el sistema calorimétrico ( $^\circ C$ ), y

$Q$  es el valor calorimétrico de la muestra.

### 3.3.2. Porcentaje de cenizas

El procedimiento se lleva a cabo siguiendo las especificaciones detalladas por la normativa NTC 1859.

**Tabla 3-8:** Requisitos del porcentaje de cenizas

| Propiedades                                       | Tipo 1 | Tipo 2 |
|---|--------|--------|
| Porcentaje de cenizas, (%) $\frac{m}{m}$ , máximo | 30     | 30     |

Fuente: ICONTEC, 1987

Realizado por: Bernal J., 2023

#### 3.3.2.1. Determinación del porcentaje de cenizas

El análisis de cenizas por proximidad es una técnica importante que permite determinar los minerales presentes en la composición química de la biomasa. A través de este análisis, se puede estimar la cantidad de suciedad que la biomasa puede generar durante la combustión completa. En la preparación de la muestra, se realizaron diferentes ensayos por cada tipo de biomasa en el laboratorio de Analítica de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de

Chimborazo, utilizando crisoles. Las instrucciones para llevar a cabo el análisis se encuentran detalladas en la Tabla 3-9.

**Tabla 3-9:** Proceso para la determinación del contenido de porcentaje de cenizas

| Materiales y equipos  | Reactivos  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crisoles</li> <li>• Estufa de secado</li> <li>• Balanza analítica</li> <li>• Pinza</li> <li>• Desecador</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Residuos Agroindustriales con muestras de biomasa alrededor de 2≈2.5g por muestra.</li> </ul> |
| <p><b>Procedimiento</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lave cuidadosamente las cápsulas y crisoles con agua y detergente.</li> <li>• Coloque los crisoles en una estufa a 110 °C durante 3 horas para eliminar cualquier humedad residual y permitir que los crisoles alcancen una temperatura constante.</li> <li>• Después de retirar los crisoles de la estufa, colóquelos en un desecador para que se enfríen a temperatura ambiente.</li> <li>• Pese cuidadosamente las muestras de biomasa, midiendo de 2 a 2.5 g de cada muestra.</li> <li>• Utilizando un reverbero, incinere las muestras hasta que se consuman por completo.</li> <li>• Coloque las muestras incineradas en una mufla precalentada a 550 °C durante 24 horas para quemar cualquier resto de carbono.</li> <li>• Después de retirar las muestras de la mufla, péselas cuidadosamente.</li> <li>• Utilizando los valores previamente obtenidos, calcule el porcentaje de ceniza por muestra.</li> </ul> |  |

Realizado por: Bernal J., 2023

Para determinar las cenizas en una muestra de residuo se hace uso de la siguiente fórmula:

$$\%C = \frac{(m_1 - m)}{(m_2 - m)} \times 100, \tag{3-3}$$

donde

*%C* es el contenido de ceniza en porcentaje de masa,

*m* es la masa del crisol tarado en (g),

*m<sub>1</sub>* es la masa del crisol después de la incineración en (g), y

*m<sub>2</sub>* es la masa del crisol con la muestra antes de la incineración en (g).

### 3.3.3. *Porcentaje de carbono fijo*

**Tabla 3-10:** Requisitos del porcentaje de carbono fijo

| <b>Propiedades</b>                       | <b>Tipo 1</b> | <b>Tipo 2</b> |
|--|---------------|---------------|
| Porcentaje de carbono fijo, masa, mínimo | 50            | –             |

Fuente: ICONTEC, 1987

Realizado por: Bernal J., 2023

#### 3.3.3.1. *Determinación del porcentaje de carbono fijo*

El carbono fijo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de carbono fijo} = 100 - (A + B + C), \quad (3-4)$$

donde

*A* es el contenido de humedad, en % (Obtenido en el numeral 3.3.5),

*B* es el contenido de cenizas, en % (Obtenido en el numeral 3.3.2), y

*C* es el contenido de materia volátil, en %, (Obtenido en el numeral 3.3.4).

### 3.3.4. *Porcentaje de material volátil*

El procedimiento se lleva a cabo siguiendo las especificaciones detalladas por la normativa NTC 2018.

**Tabla 3-11:** Requisitos del porcentaje de material volátil

| <b>Propiedades</b>                            | <b>Tipo 1</b> | <b>Tipo 2</b> |
|---|---------------|---------------|
| Porcentaje de material volátil, máximo en m/m | 15            | 15            |

Fuente: ICONTEC, 1987

Realizado por: Bernal J., 2023

#### 3.3.4.1. *Determinación del porcentaje de material volátil*

Para determinar cuánto material volátil tienen las briquetas, se sigue el procedimiento de la Tabla 3-12.

**Tabla 3-12:** Proceso para la determinación del contenido de material volátil

| Materiales y equipos   | Reactivos   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Capsulas</li><li>• Estufa de secado</li><li>• Balanza analítica</li><li>• Desecador</li><li>• Pinzas</li></ul>   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Residuos Agroindustriales con muestras de biomasa alrededor de 2.5≈ 5g por muestra.</li></ul> |
| <p style="text-align: center;"><b>Procedimiento</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Tomar una muestra del material que deseas analizar y pesarla en la balanza analítica. Registra la masa como "m1".</li><li>• Colocar la muestra en una cápsula de porcelana o vidrio y ponerla dentro del horno de secado precalentado a una temperatura de 110°C. Dejar la muestra allí por 1 hora.</li><li>• Sacar la cápsula del horno con pinzas y deja que se enfríe en un desecador.</li><li>• Vuelve a pesar la cápsula con la muestra dentro en la balanza analítica. Registra la nueva masa como "m2".</li></ul> |   |

Realizado por: Bernal J., 2023

Calcular la masa del material volátil mediante la siguiente Ecuación 3-5.

$$\text{Masa del material volátil} = m_1 - m_2 \quad (3-5)$$

Para el cálculo del porcentaje de material volátil utilizamos la siguiente Ecuación 3-5.

$$\%M_v = \frac{\text{Masa del material volátil}}{m_1} \times 100, \quad (3-6)$$

donde

$\%M_v$  es el porcentaje del material volátil,

$m_1$  es la masa inicial de la muestra en (g), y

$m_2$  es la muestra una vez calentada en el horno y enfriada en el desecador en (g).

### 3.3.5. Porcentaje de humedad

El procedimiento se lleva a cabo siguiendo las especificaciones detalladas por la normativa NTC 1872.

**Tabla 3-13:** Requisitos del porcentaje de humedad

| <b>Propiedades</b>            | <b>Tipo 1</b> | <b>Tipo 2</b> |
|-------------------------------|---------------|---------------|
| Porcentaje de humedad, máximo | 2.5           | 2.5           |

Fuente: ICONTEC, 1987

Realizado por: Bernal J., 2023

### 3.3.5.1. Determinación del porcentaje de humedad

Las muestras de biomasa son preparadas en el laboratorio de Analítica de la Facultad de Ciencia de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Para determinar la humedad de cada muestra, se utilizan cápsulas y se realizan diferentes ensayos por cada tipo de biomasa. Es importante utilizar una cantidad pequeña de muestra en cada ensayo, que permita la liberación de agua en forma de vapor durante el proceso de secado. El procedimiento completo se describe con detalle en la Tabla 3-14:

**Tabla 3-14:** Proceso para la determinación del contenido de porcentaje de humedad

| <b>Materiales y equipos</b>  | <b>Reactivos</b>   |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capsulas</li> <li>• Termo Balanza</li> <li>• Mortero</li> <li>• Desecador</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Residuos Agroindustriales con muestras de biomasa alrededor de <math>5 \approx 10</math>g por muestra.</li> </ul> |
| <b>Procedimiento</b>   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Enciende y calibra la termobalanza.</li> <li>• Coloca una bandeja de muestra limpia y seca en la termobalanza y tara el peso.</li> <li>• Muele una briqueta representativa de la muestra hasta obtener una muestra homogénea.</li> <li>• Pesa exactamente 5 gramos de la muestra molida y colócala en la bandeja de muestra.</li> <li>• Establece la temperatura de la termobalanza en un rango de 110°C a 120°C.</li> <li>• Cierra la tapa de la termobalanza y comienza el análisis.</li> <li>• La termobalanza registrará automáticamente la pérdida de peso a medida que se elimina la humedad.</li> <li>• Registra el resultado proporcionado por la termobalanza como el porcentaje de humedad de tus briquetas.</li> </ul> |  |

Realizado por: Bernal J., 2023

### 3.3.6. Porcentaje de azufre

Es importante seguir el proceso indicado en la norma ASTM D 3177.

**Tabla 3-15:** Requisitos del porcentaje de azufre

| Propiedades                       | Tipo 1 | Tipo 2 |
|-----------------------------------|--------|--------|
| Porcentaje de azufre, m/m, máximo | 1.0    | 1.0    |

Fuente: ICONTEC, 1987

Realizado por: Bernal J., 2023

#### 3.3.6.1. Determinación del porcentaje de azufre

Para calcular el contenido de azufre que tienen las briquetas seguimos el procedimiento de la Tabla 3-16:

**Tabla 3-16:** Proceso para la determinación del contenido de porcentaje de azufre

| Materiales y equipos   | Reactivos   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Papel filtro</li><li>• Agua destilada</li><li>• Agua ultra pura</li><li>• Balanza digital</li><li>• Matraz aforado de 100ml</li><li>• Pipetas</li><li>• Bureta</li><li>• Tubos de ensayo</li></ul>   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Fosfato monobásico de calcio 0.08M <math>\text{CaHPO}_4</math></li><li>• Ácido clorhídrico (HCl)</li><li>• Gelatina</li><li>• Sulfato de potasio (<math>\text{K}_2\text{SO}_4</math>)</li><li>• Cloruro de bario (<math>\text{BaCl}_2</math>)</li><li>• Muestra 10g por cada tipo de briqueeta</li><li>• Software Visionlite.</li></ul> |
| <p style="text-align: center;"><b>Procedimiento</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Se pesaron 10 gramos de suelo en un matraz Erlenmeyer de 125 ml.</li><li>• Se añadieron 50 ml de fosfato de calcio (0.08M) al matraz Erlenmeyer y se agitó la mezcla durante 30 minutos.</li><li>• Empleando papel filtro doble, la suspensión se filtró por gravedad en un tubo de ensayo.</li><li>• Se tomó una muestra de 10 ml de las muestras y de los patrones de trabajo mediante una alícuota.</li><li>• Se agregaron 2 ml de la solución semilla a las muestras y los patrones de trabajo.</li><li>• Luego, se incorporaron 4 ml de gelatina y se agitó suavemente la mezcla.</li></ul> |   |

- El tubo de ensayo se dejó en reposo durante un período de 45 minutos.
- Se procedió a calibrar el espectrofotómetro utilizando los patrones a una longitud de onda de 420 nm, utilizando la concentración o absorbancia como referencia.
- Se leyó la turbidimetría de las muestras, asegurándose de agitarlas nuevamente antes de realizar la lectura.
- Finalmente, se llevó a cabo el cálculo de la concentración de azufre en microgramos de azufre por gramo de suelo ( $\mu\text{g S g}^{-1}$  suelo).

**Realizado por:** Bernal J., 2023

Primero debemos calcular la curva de turbulencia con cada una de las soluciones preparadas, una vez obtenida la curva aplicamos la siguiente fórmula para calcular el porcentaje de azufre primero determinamos la concentración final restando la inicial menos la final y luego procedemos a calcular el porcentaje de azufre con la siguiente Ecuación 3-7.

$$\%S = \left( \frac{C_m}{C_{est}} \times 100 \right) / 10000, \quad (3-7)$$

donde

$C_m$  es la concentración de azufre en la muestra desconocida, medida o calculada a partir de la curva de calibración,

$C_{est}$  es la concentración de azufre esperada teóricamente en la muestra, y

**1000** es el valor para convertir ppm a % de azufre.

### **3.4. Caracterización fisicomecánica según la norma ASTM D695**

#### **3.4.1. Ensayo de compresión a la resistencia**

El ensayo se lleva a cabo siguiendo las especificaciones detalladas por la normativa ASTM D695.

### 3.4.1.1. Determinación de la compresión a la resistencia

Para determinar la resistencia a la compresión se sigue en procedimiento de la Tabla 3-17.

**Tabla 3-17:** Proceso para la determinación de las propiedades fisicomecánicas

| Materiales y Equipos   | Software   |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maquina universal de polímeros</li> <li>• Probetas</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Trapezium</i></li> </ul> |
| <p><b>Procedimiento</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El primer paso es preparar las muestras según las especificaciones requeridas. Las muestras deben ser cilíndricas o de forma cuadrada con dimensiones definidas por la norma ASTM D695.</li> <li>• Posteriormente, se coloca la muestra en la máquina de ensayo universal, asegurándose de que esté correctamente alineada. Se aplica una carga axial de compresión de manera gradual y constante, hasta que la muestra se rompa o se produzca una deformación significativa.</li> <li>• Durante el ensayo, se registran los datos de carga y deformación de manera continuada. Estos datos permiten obtener una curva de carga-deformación, que muestra la respuesta del material ante la compresión.</li> <li>• Una vez finalizado el ensayo, se determinan los parámetros de resistencia del material, como la resistencia máxima a la compresión, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria. Estos parámetros proporcionan información valiosa sobre la capacidad del material para soportar cargas de compresión.</li> <li>• Una vez que se han realizado las pruebas de resistencia a la compresión utilizando la máquina universal de polímeros, los datos obtenidos de carga y deformación pueden ser procesados y analizados por el software de control. En este caso, el software utilizado es el Trapezium.</li> <li>• Los datos cargados en el software Trapezium, se pueden aplicar diferentes métodos de análisis y generar informes detallados. Estos informes pueden incluir cálculos de la resistencia máxima, deformación residual, módulo de elasticidad y otros parámetros relevantes.</li> <li>• Se recomienda realizar varias pruebas y promediar los resultados para obtener una evaluación más representativa de la resistencia del material.</li> </ul> |  |

Realizado por: Bernal J., 2023

### **3.5. Determinación del proceso óptimo para la producción de briquetas**

En la presente investigación, se emprende una exploración minuciosa del proceso de elaboración de briquetas a partir de diversos residuos agroindustriales, con el objetivo principal de evaluar la optimización de dicho proceso. Un enfoque fundamental para alcanzar este propósito ha sido la revisión exhaustiva de seis tipos de briquetas, cada una elaborada con diferentes residuos agroindustriales.

El análisis comparativo empleado ha sido esencial para desentrañar las particularidades de cada tipo de briqueta y ha sentado las bases para determinar la eficiencia del proceso de elaboración. En este contexto, se presta especial atención a variables cruciales como la selección del residuo agroindustrial, donde se busca analizar las mejores combinaciones de biomasa con el objetivo de cumplir con todos los requerimientos normativos al final del proceso.

Así mismo, se concede importancia significativa a la elección del aglutinante, reconociendo su impacto directo en el porcentaje de humedad. En este sentido, se propone considerar aglutinantes naturales como el maíz, la yuca o la papa, debido a sus reconocidas propiedades para proporcionar cohesión y resistencia en las briquetas.

### **3.6. Costos de producción de briquetas**

#### ***3.6.1. Costos de producción***

Son los gastos relacionados con la producción de briquetas, como los costos de materia prima, energía, mano de obra y otros insumos, así como los costos indirectos, como el alquiler de instalaciones, gastos generales, seguro y otros costos compartidos. El cálculo de los costos de producción es esencial para determinar el precio adecuado de las briquetas y para asegurar que la producción sea rentable (Villacis, 2023, pág. 63).

Para determinar los costos de producción de las briquetas se realizará un estudio económico, para determinar el costo total de elaborar briqueta, lo cual se calcula mediante la siguiente Ecuación 3-8.

$$C_p = C_v + \frac{C_f}{P_E}, \quad (3-8)$$

donde

$C_p$  es el costo total de producción,

$C_v$  es el costo variable,  
 $C_f$  es el costo fijo, y  
 $P_E$  es la producción esperada.

### 3.6.2. Costos variables

Son aquellos costos que cambian en proporción directa a la cantidad de producción de briquetas, como los costos de la materia prima, la mano de obra directa y los costos de los suministros necesarios para producir las briquetas, entre otros (Villacis, 2023, pág. 62).

Para determinar los costos variables se ocupa la siguiente Ecuación 3-9.

$$C_v = M_p + M_{OD}, \quad (3-9)$$

donde

$C_v$  es el costo variable,  
 $M_p$  es la materia prima directa, y  
 $M_{OD}$  es la mano de obra directa.

Para calcular los costos variables debemos considerar las siguientes tablas donde especifica cada uno de los detalles de la materia prima, mano de obra directa y la producción.

**Tabla 3-18:** Detalles de materia prima, mano de obra y producción

| <b>Materia Prima</b>    |                 |                        |                                    |                    |
|-------------------------|-----------------|------------------------|------------------------------------|--------------------|
| <b>Rubros</b>           | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b>          | <b>Precio Unitario</b>             | <b>Total (USD)</b> |
| Briquetas               | 1               | Paquete de 3kg         | 0.8                                | 0.8                |
| Funda de papel          | 1               | Unidad                 | 0.2                                | 0.2                |
| Etiquetas para la funda | 1               | Pliego                 | 0.3                                | 0.3                |
| <b>Rubros</b>           |                 | <b>Cantidad</b>        |                                    |                    |
| Operario                |                 | 2                      |                                    |                    |
| <b>Producción</b>       |                 |                        |                                    |                    |
| <b>Detalle</b>          | <b>Diario</b>   | <b>Días trabajados</b> | <b>Producción mensual esperada</b> |                    |
| Unidades a producir     | 1000            | 20                     | 20000                              |                    |

Realizado por: Bernal J., 2023

Para obtener el valor de la mano de obra directa debemos utilizar la siguiente Ecuación 3-10.

$$M_{OD} = \frac{M_{ODM}}{P_E}, \quad (3-10)$$

donde

$M_{OD}$  es la mano de obra directa,

$M_{ODM}$  es la mano de obra directa mensual, y

$P_E$  es la producción esperada mensual.

### 3.6.3. Costos fijos

Son aquellos costos que no cambian con la cantidad de producción, como lo pueden ser la renta, la depreciación del equipo, seguros y gastos administrativos. Estos costos son independientes de la cantidad producida y se mantienen constantes a lo largo del tiempo (Villacis, 2023, pág. 63).

Para obtener el valor de costos fijos se debe utilizar la siguiente Ecuación 3-11.

$$C_F = M_{PI} + M_{OI} + O_{GF}, \quad (3-11)$$

donde

$M_{PI}$  es la materia prima indirecta,

$M_{OI}$  es la mano de obra indirecta,

$O_{GF}$  representa otros gastos fijos, y

$C_F$  es los costos fijos.

Para calcular los costos fijos debemos considerar las siguiente Tablas 3-19, donde especifica cada uno de los detalles de la materia prima indirecta, mano de obra indirecta y otros gastos fijos.

**Tabla 3-19:** Materia prima indirecta, mano de obra indirecta y otros gastos

| <b>Materia prima indirecta</b>           |                              |
|--|------------------------------|
| <b>Rubros</b>                            | <b>Valores por mes (USD)</b> |
| Cajas, cartones                          | 40                           |
| Distribución (combustible)               | 70                           |
| <b>Mano de obra indirecta</b>            |                              |
| <b>Rubros</b>                            | <b>Valores por mes (USD)</b> |
| Contadora                                | 100                          |
| Controlador de calidad                   | 600                          |
| Secretaria                               | 450                          |
| <b>Otros gastos fijos</b>                |                              |
| <b>Rubros</b>                            | <b>Valores por mes (USD)</b> |
| Servicios básicos (Agua, luz y teléfono) | 450                          |
| Publicidad                               | 75                           |
| Reparaciones y mantenimiento             | 75                           |
| Suministros de oficina (Papel, esferos)  | 10                           |

Realizado por: Bernal J., 2023

### 3.7. Impacto ambiental de la producción de briquetas

La búsqueda de fuentes de energía sostenibles y respetuosas con el medio ambiente se ha vuelto imperativa en la era actual, marcada por la creciente conciencia sobre el cambio climático y la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles. En este contexto, el presente estudio se enmarca en la revisión exhaustiva de las alternativas más utilizadas para la generación de bioenergía, abordando su impacto ambiental a través de un análisis comparativo detallado.

La metodología empleada implicó una revisión bibliográfica exhaustiva de las fuentes de energía más prominentes, centrándonos en el biogás, los biocombustibles, la energía geotérmica y, particularmente, la biomasa. Este último, en específico, se exploró en su faceta más sostenible al utilizar residuos agroindustriales como materia prima.

A través de una tabla comparativa, se evaluaron diversos aspectos, desde la eficiencia en la generación de energía hasta el impacto directo e indirecto en el medio ambiente. Este enfoque analítico proporcionó una visión integral de las fortalezas y debilidades de cada alternativa, permitiendo así la identificación de la opción más viable y sostenible.

En las siguientes secciones, presentaremos los resultados de este análisis comparativo, destacando la biomasa como una elección destacada para la generación de bioenergía. Los datos recopilados no solo resaltan su eficacia en términos de impacto ambiental, sino que también subrayan la importancia de la elección específica de utilizar residuos agroindustriales como una práctica innovadora y respetuosa con el entorno.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos. El objetivo principal fue caracterizar los 6 tipos briquetas mediante pruebas fisicoquímicas y fisicomecánicas esperando que cumplan con la Norma Técnica Colombiana NTC 2060 para una posterior aplicación en la industria y su posterior uso en diferentes aplicaciones afines a la producción de energía.

#### 4.1. Resultados de la caracterización fisicoquímica

##### 4.1.1. *Porcentaje de poder calorífico*

En esta sección, presentaremos los resultados obtenidos del análisis del poder calorífico de las diferentes briquetas que se elaboraron como parte de la investigación. Para llevar a cabo esta prueba, se revisaron varios trabajos de investigación que abordan experimentos similares utilizando diversos residuos agroindustriales.

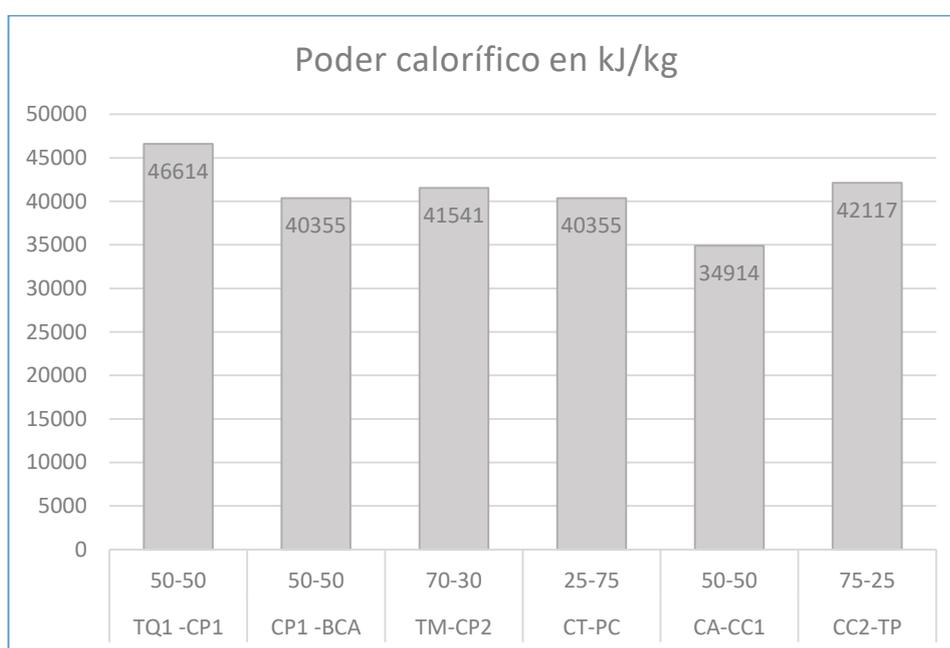
Recordar que las briquetas analizadas son: tallos de quinoa (TQ1), cáscara de piña (CP1), bagazo de caña de azúcar (BCA), tuza de maíz (TM), cáscara de papa (CP2), cáscara de trigo (CT), paja de cebada (PC), cascarilla de arroz (CA), cáscara de coco (CC1), cáscara de café (CC2) y tallos de plátano (TP).

La medición del poder calorífico se realizó utilizando una bomba calorimétrica, la cual permitió determinar la cantidad de energía térmica liberada durante la combustión de las briquetas. Sin embargo, antes de llevar a cabo las mediciones, se procedió a combinar diferentes biomásas en distintas proporciones, como 25/75, 50/50, 70/30 y 75/25. Para la selección de la combinación de biomasa más adecuada, se consideró la briqueta que presenta el mayor poder calorífico dentro de cada relación. De esta manera, se obtuvieron los valores establecidos que se detallan en la Tabla 4-20.

**Tabla 4-20:** Resultados del poder calorífico obtenido de cada muestra

| Tipo de briqueta | Relación de biomasa | Poder calorífico en $\frac{kJ}{kg}$ |
|------------------|---------------------|-------------------------------------|
| TQ1 y CP1        | 50/50               | 46614                               |
| CP1 y BCA        | 50/50               | 40355                               |
| TM y CP2         | 70/30               | 41541                               |
| CT y PC          | 25/75               | 40355                               |
| CA y CC1         | 50/50               | 34914                               |
| CC2 y TP         | 75/25               | 42117                               |

Realizado por: Bernal J., 2023



**Ilustración 4-5:** Poder calorífico obtenido de cada briqueta elaborada

Realizado por: Bernal J., 2023

Después de realizar el análisis de los datos obtenidos y considerando la Tabla 4-20 y la Ilustración 4-5, se determinaron los valores de poder calorífico para cada una de las 6 muestras de diferentes tipos de residuos agroindustriales. Con la mejor combinación de relación de biomasa, los resultados muestran que el poder calorífico de las briquetas es el siguiente: 46.61 kJ/kg tiene la briqueta con TQ1 y CP1, 40.36 kJ/kg tiene la briqueta con CP1 y BCA, 41.54 kJ/kg tiene la briqueta con TM y CP2, 40.36 kJ/kg tiene la briqueta con CT y PC, 34.91 kJ/kg tiene la briqueta con CA y CC1 y 42.12 kJ/kg tiene la briqueta con CC2 y TP.

Es importante destacar que estos valores se deben comparar con los requisitos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 2060. Según la Tabla 2-4 de esta norma, se establece que el poder calorífico mínimo requerido es de 21.00 kJ/kg. Al analizar los valores obtenidos, se concluye que todas las briquetas cumplen con los requisitos establecidos por la normativa.

Estos resultados son de gran importancia, ya que demuestran que las briquetas elaboradas a partir de diferentes combinaciones de biomasa logran alcanzar un poder calorífico adecuado para su uso eficiente. Además, estos hallazgos respaldan la viabilidad y el potencial de utilizar estas briquetas como una fuente de energía sostenible.

#### ***4.1.2. Porcentaje de humedad***

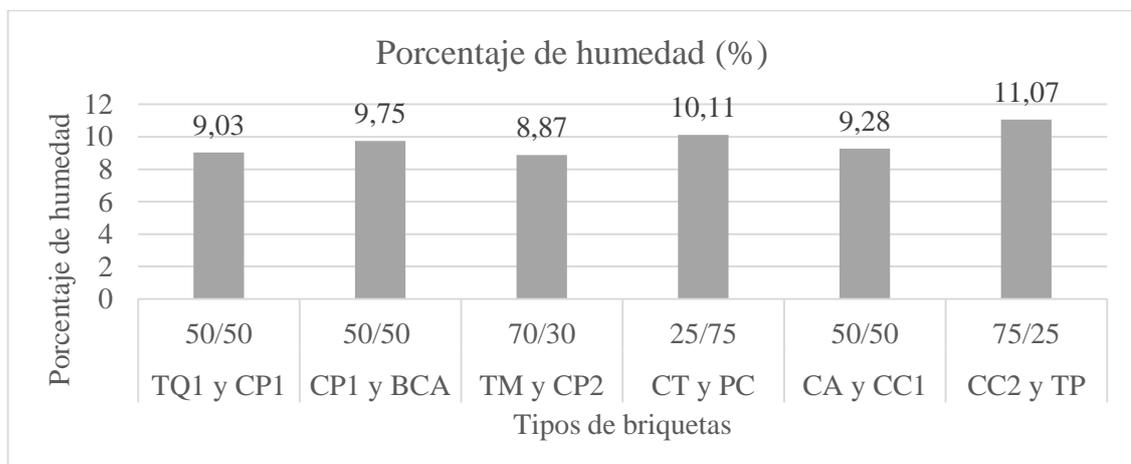
Para determinar el porcentaje de humedad en las muestras de cada briqueta, se realizaron cinco muestras de cada tipo de briqueta. Se extrajeron muestras de 5 g de peso y se sometieron a una temperatura de 110 °C. Estas muestras se analizaron utilizando el método de la máquina de termo balanza, el cual se basa en el procedimiento de análisis gravimétrico de humedad.

El análisis gravimétrico de humedad tiene como objetivo medir la pérdida de peso de la muestra a medida que se elimina la humedad mediante un método de calentamiento controlado. Este método se utiliza ampliamente en la determinación del contenido de humedad en diversos materiales. El uso de la máquina de termo balanza nos permitió obtener mediciones precisas y confiables del porcentaje de humedad en un determinado tiempo. Los valores obtenidos por cada tipo de muestras se indican en Tabla 4-21.

**Tabla 4-21:** Resultados del porcentaje de humedad obtenido de cada muestra.

| Tipo de briqueta | Relación de biomasa | Porcentaje de humedad (%) | Promedio del porcentaje de humedad (%) |
|------------------|---------------------|---------------------------|--|
| TQ1 y CP1        | 50/50               | Muestra 1= 8.76           | 9.03                                   |
|                  |                     | Muestra 2= 8.85           |  |
|                  |                     | Muestra 3= 9.24           |  |
|                  |                     | Muestra 4= 9.11           |  |
|                  |                     | Muestra 5= 9.18           |  |
| CP1 y BCA        | 50/50               | Muestra 1= 9.65           | 9.75                                   |
|                  |                     | Muestra 2= 9.80           |  |
|                  |                     | Muestra 3= 9.75           |  |
|                  |                     | Muestra 4= 9.90           |  |
|                  |                     | Muestra 5= 9.70           |  |
| TM y CP2         | 70/30               | Muestra 1= 9.15           | 8.87                                   |
|                  |                     | Muestra 2= 8.95           |  |
|                  |                     | Muestra 3= 8.75           |  |
|                  |                     | Muestra 4= 8.87           |  |
|                  |                     | Muestra 5= 8.65           |  |
| CT y PC          | 25/75               | Muestra 1= 10.25          | 10.11                                  |
|                  |                     | Muestra 2= 9.90           |  |
|                  |                     | Muestra 3= 10.09          |  |
|                  |                     | Muestra 4= 10.35          |  |
|                  |                     | Muestra 5= 9.98           |  |
| CA y CC1         | 50/50               | Muestra 1= 9.38           | 9.28                                   |
|                  |                     | Muestra 2= 9.15           |  |
|                  |                     | Muestra 3= 9.38           |  |
|                  |                     | Muestra 4= 9.11           |  |
|                  |                     | Muestra 5= 9.39           |  |
| CC2 y TP         | 75/25               | Muestra 1= 11.09          | 11.07                                  |
|                  |                     | Muestra 2= 11.25          |  |
|                  |                     | Muestra 3= 11.12          |  |
|                  |                     | Muestra 4= 10.91          |  |
|                  |                     | Muestra 5= 10.98          |  |

Realizado por: Bernal J., 2023



**Ilustración 4-6:** Porcentaje de humedad obtenido de cada briqueta elaborada

Realizado por: Bernal J., 2023

En la Tabla 4-21 y en la Ilustración 4-6, se pueden observar los valores de humedad para cada tipo de briqueta. Se realizó un promedio de las 5 muestras y se obtuvieron los siguientes porcentajes de humedad: 9.03 % tiene la briqueta con TQ1 y CP1, 9.75 % tiene la briqueta con CP1 y BCA, 8.87 % tiene la briqueta con TM y CP2, 10.11 % tiene la briqueta con CT y PC, 9.28 % tiene la briqueta con CA y CC1 y 11.07% tiene la briqueta con CC2 y TP.

Al comparar estos valores con la Norma Técnica Colombiana NTC, específicamente en la Tabla-2-4 de requisitos de briquetas, se menciona que el valor máximo de humedad permitido es del 2.5 %. Esto indica que los valores de humedad obtenidos para las briquetas exceden el límite establecido por la norma colombiana.

Es importante tener en cuenta que un alto porcentaje de humedad en las briquetas puede afectar su calidad y rendimiento. La humedad excesiva puede dificultar la combustión y disminuir el poder calorífico de las briquetas. En base a estos resultados, se recomienda tomar medidas para reducir el contenido de humedad en las briquetas. Esto puede incluir el uso de técnicas de secado adecuadas durante el proceso de fabricación o el almacenamiento adecuado de las briquetas para evitar la absorción de humedad.

#### **4.1.3. Porcentaje de cenizas**

Para determinar el porcentaje de cenizas en los 6 tipos de briquetas se parte del procedimiento de análisis gravimétrico de cenizas que se menciona en la metodología. Este proceso implica la incineración controlada de las muestras para eliminar la materia orgánica y luego pesar el residuo, que es la ceniza. Las etapas de preparación de crisoles, incineración y pesado cuidadoso son componentes esenciales de esta metodología. Este enfoque permite determinar con precisión el contenido de ceniza en las muestras de biomasa. Una vez obtenido los valores del crisol vacío, con la muestra y una vez incinerado completamente, se utiliza la Ecuación 3-3.

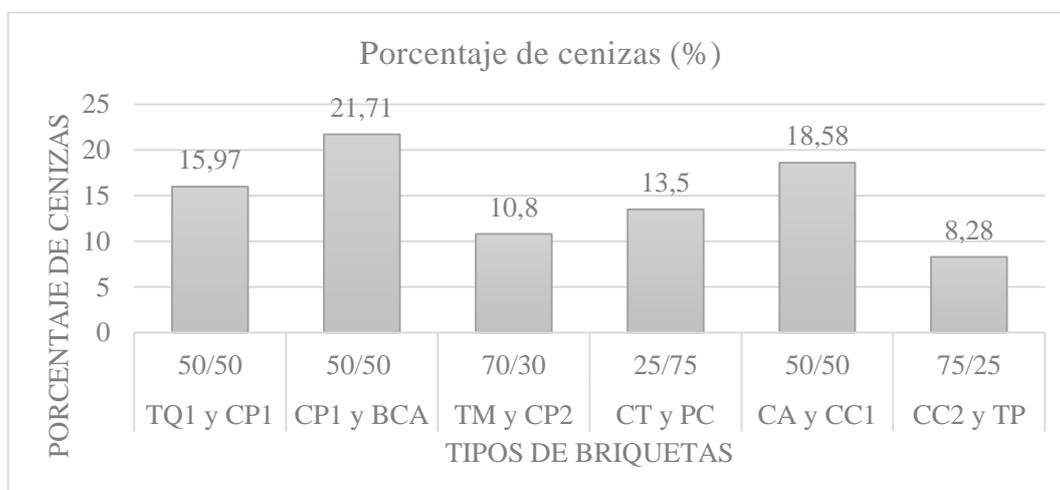
Es importante destacar que se realizaron 5 muestras de cada tipo de briqueta. Sin embargo, para este análisis, nos enfocaremos en la combinación de biomasa utilizada, que consiste en tallos de quinoa y cáscara de piña. Cabe mencionar que el procedimiento para calcular el porcentaje de ceniza en los demás tipos de briquetas es el mismo y se detalla en la Tabla 4-22.

$$\%C = \frac{(27.2937 - 26.8304)}{(29.3333 - 26.8304)} \times 100$$
$$\%C = 18.51$$

**Tabla 4-22:** Resultados del porcentaje de cenizas obtenido de cada muestra

| Tipo de briqueta | Relación de biomasa | Porcentaje de cenizas (%) | Promedio del porcentaje de cenizas (%) |
|------------------|---------------------|---------------------------|--|
| TQ1 y CP1        | 50/50               | Muestra 1= 18.51          | 15.97                                  |
|                  |                     | Muestra 2= 15.08          |  |
|                  |                     | Muestra 3= 14.56          |  |
|                  |                     | Muestra 4= 14.95          |  |
|                  |                     | Muestra 5= 16.74          |  |
| CP1 y BCA        | 50/50               | Muestra 1= 19.80          | 21.71                                  |
|                  |                     | Muestra 2= 22.17          |  |
|                  |                     | Muestra 3= 20.58          |  |
|                  |                     | Muestra 4= 23.24          |  |
|                  |                     | Muestra 5= 22.78          |  |
| TM y CP2         | 70/30               | Muestra 1= 12.89          | 10.80                                  |
|                  |                     | Muestra 2= 11.12          |  |
|                  |                     | Muestra 3= 9.54           |  |
|                  |                     | Muestra 4= 9.89           |  |
|                  |                     | Muestra 5= 10.56          |  |
| CT y PC          | 25/75               | Muestra 1= 14.41          | 13.50                                  |
|                  |                     | Muestra 2= 14.15          |  |
|                  |                     | Muestra 3= 13.25          |  |
|                  |                     | Muestra 4= 12.56          |  |
|                  |                     | Muestra 5= 13.15          |  |
| CA y CC1         | 50/50               | Muestra 1= 19.78          | 18.58                                  |
|                  |                     | Muestra 2= 18.97          |  |
|                  |                     | Muestra 3= 18.52          |  |
|                  |                     | Muestra 4= 17.50          |  |
|                  |                     | Muestra 5= 18.12          |  |
| CC2 y TP         | 75/25               | Muestra 1= 8.89           | 8.28                                   |
|                  |                     | Muestra 2= 8.79           |  |
|                  |                     | Muestra 3= 8.50           |  |
|                  |                     | Muestra 4= 7.82           |  |
|                  |                     | Muestra 5= 7.42           |  |

Realizado por: Bernal J., 2023



**Ilustración 4-7:** Porcentaje de cenizas obtenido de cada briqueta elaborada

Realizado por: Bernal J., 2023

Al analizar los resultados obtenidos del porcentaje de cenizas se obtuvo 15.97 % de la briqueta con TQ1 y CP1, 21.71 % de la briqueta con CP1 y BCA, 10.80 % de la briqueta con TM y CP2, 13.50 % de la briqueta con CT y PC, 18.58 % de la briqueta con CA CC1 y 8.28 % de la briqueta con CC2 y TP. Al comparar con la Norma Técnica Colombiana NTC 2060, la cual establece un límite máximo de 30 % de cenizas para las briquetas, se concluye que cada tipo de briqueta cumple con los requisitos establecidos por dicha normativa.

Es importante destacar que los valores obtenidos están por debajo del límite máximo permitido de cenizas, lo cual es beneficioso para la calidad de las briquetas. Un menor porcentaje de cenizas implica una mayor eficiencia energética de las briquetas, ya que se reduce la cantidad de residuos y materiales no combustibles presentes en ellas. Esto contribuye a un mayor poder calorífico y, por ende, a un mejor rendimiento durante su uso.

#### **4.1.4. Porcentaje de material volátil**

En esta prueba, se empleó una metodología consistente en la toma de 2.5 g de muestra de cada briqueta utilizando crisoles. El proceso se llevó a cabo en una estufa, donde se obtuvieron los datos necesarios para calcular el porcentaje de material volátil. Inicialmente, se tomó el peso del crisol vacío con el fin de establecer una referencia. A continuación, se añadió la muestra de briqueta al crisol y se registró el peso total. Posteriormente, el crisol con la muestra se introdujo en la estufa precalentada a 110°C durante una hora. Una vez finalizado el tiempo de calentamiento, se retiró el crisol de la estufa y se permitió que alcanzara la temperatura ambiente. Luego, se procedió a medir el peso final del crisol con la muestra, registrando así el peso después de la volatilización.

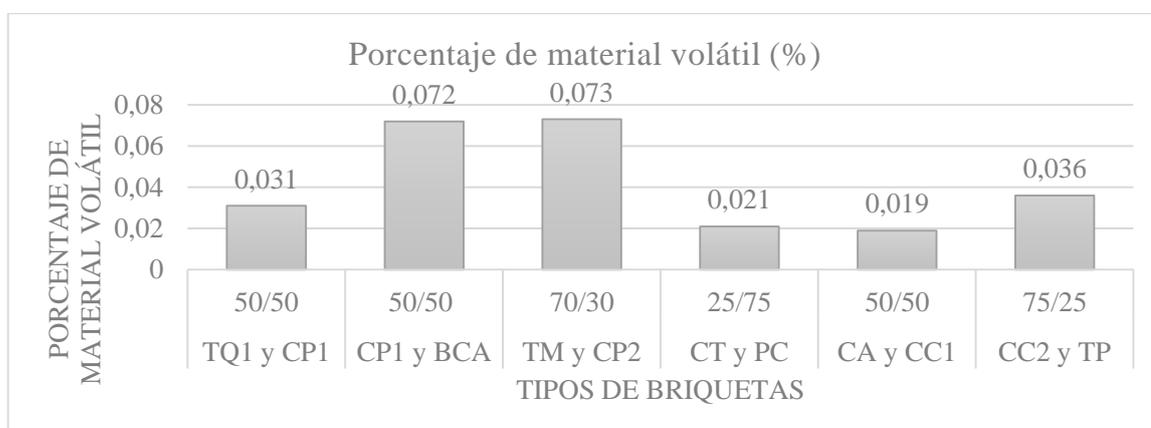
Se llevó a cabo el procedimiento en los 6 tipos de briquetas utilizando la Ecuación 3-6 mencionada en la parte experimental del trabajo. Esta fórmula permitió calcular el porcentaje de material volátil en cada briqueta, conforme se indica en el ejemplo de cálculo mostrado a continuación. Se tomó como referencia la muestra de tallos de quinoa y cáscara de piña. Es importante destacar que se utilizó el mismo cálculo para cada briqueta y se detalla en la Tabla 4-23.

$$\%MV = \frac{85.0577 - 85.0292}{85.0577} \times 100$$
$$\%MV = 0.039$$

**Tabla 4-23:** Resultados del porcentaje de material volátil obtenido de cada muestra

| Tipo de briqueta | Relación de biomasa | Porcentaje del material volátil (%) | Promedio del porcentaje de material volátil (%) |
|------------------|---------------------|-------------------------------------|---|
| TQ1 y CP1        | 50/50               | Muestra 1= 0.039                    | 0.031   |
|                  |                     | Muestra 2= 0.036                    |   |
|                  |                     | Muestra 3= 0.029                    |   |
|                  |                     | Muestra 4= 0.024                    |   |
|                  |                     | Muestra 5= 0.025                    |   |
| CP1 y BCA        | 50/50               | Muestra 1= 0.068                    | 0.072   |
|                  |                     | Muestra 2= 0.061                    |   |
|                  |                     | Muestra 3= 0.075                    |   |
|                  |                     | Muestra 4= 0.071                    |   |
|                  |                     | Muestra 5= 0.085                    |   |
| TM y CP2         | 70/30               | Muestra 1= 0.088                    | 0.073   |
|                  |                     | Muestra 2= 0.068                    |   |
|                  |                     | Muestra 3= 0.059                    |   |
|                  |                     | Muestra 4= 0.069                    |   |
|                  |                     | Muestra 5= 0.081                    |   |
| CT y PC          | 25/75               | Muestra 1= 0.015                    | 0.021   |
|                  |                     | Muestra 2= 0.022                    |   |
|                  |                     | Muestra 3= 0.018                    |   |
|                  |                     | Muestra 4= 0.021                    |   |
|                  |                     | Muestra 5= 0.029                    |   |
| CA y CC1         | 50/50               | Muestra 1= 0.011                    | 0.019   |
|                  |                     | Muestra 2= 0.017                    |   |
|                  |                     | Muestra 3= 0.025                    |   |
|                  |                     | Muestra 4= 0.028                    |   |
|                  |                     | Muestra 5= 0.016                    |   |
| CC2 y TP         | 75/25               | Muestra 1= 0.034                    | 0.036   |
|                  |                     | Muestra 2= 0.035                    |   |
|                  |                     | Muestra 3= 0.041                    |   |
|                  |                     | Muestra 4= 0.037                    |   |
|                  |                     | Muestra 5= 0.031                    |   |

Realizado por: Bernal J., 2023



**Ilustración 4-8:** Porcentaje del material volátil obtenido de cada briqueta elaborada

Realizado por: Bernal J., 2023

Los valores obtenidos para el porcentaje de material volátil en cada tipo de briqueta son: 0.031 % de la briqueta con TQ1 y CP1, 0.072 % de la briqueta con CP1 y BCA, 0.073 % de la briqueta con TM y CP2, 0.021 % de la briqueta con CT y PC, 0.019 % de la briqueta con CA y CC1 y 0.036 % de la briqueta con CC2 y TP. Según la Norma Técnica Colombiana NTC 2060, en la Tabla 2-4 de requisitos de briquetas, el porcentaje máximo permitido de material volátil es del 15 %. En este caso, los valores obtenidos para el porcentaje de material volátil de los 6 tipos de briquetas están significativamente por debajo del límite, cumpliéndose con normativa. En términos generales, tener un porcentaje de material volátil bajo puede ser beneficioso, ya que implica una menor emisión de gases y una mayor estabilidad durante la combustión. Además, puede indicar una mayor densidad y un mayor poder calorífico de las briquetas, lo que las hace más eficientes como combustible.

#### 4.1.5. *Porcentaje de carbono fijo*

Para obtener el porcentaje de carbono que tienen cada tipo de briqueta, se utilizan los cálculos previos de los valores promedios que se obtuvieron del porcentaje de humedad, porcentaje de cenizas y porcentaje de material volátil. Con estos datos en mano, se procede a calcular el porcentaje de carbono fijo utilizando la Ecuación 3-4.

Para este cálculo, se considera un tipo específico de briqueta que contiene residuos agroindustriales de tallos de quinoa y cáscara de piña. Se realiza este cálculo para cada briqueta y se detallan en la Tabla 4-24.

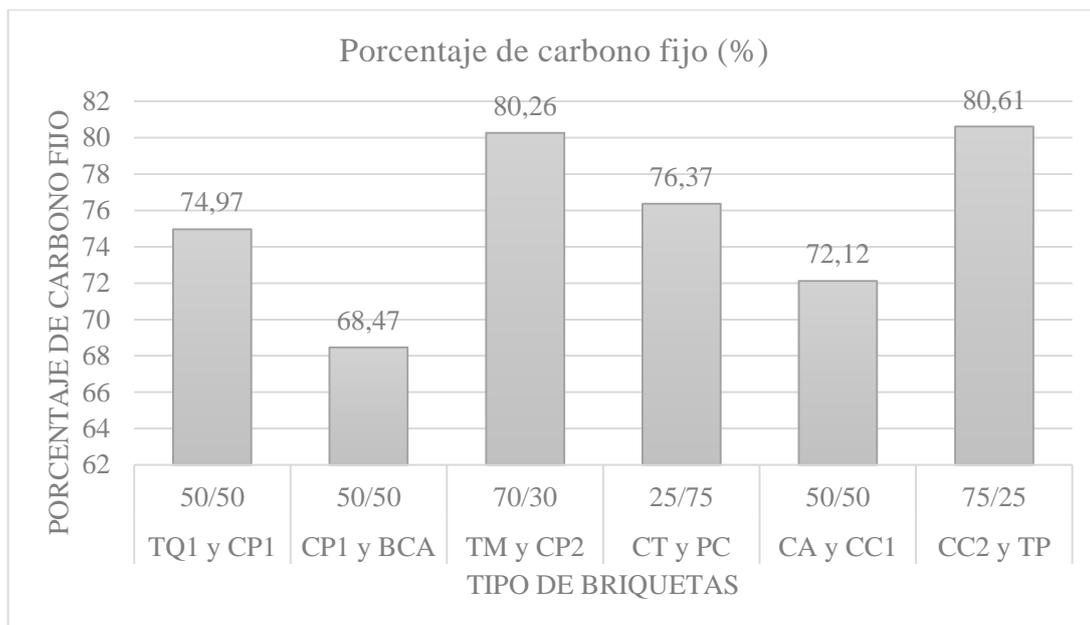
$$\% \text{ de carbono fijo} = 100 - (9.03 + 15.97 + 0.031)$$

$$\% \text{ de carbono fijo} = 74.97$$

**Tabla 4-24:** Resultados del porcentaje de carbono fijo por cada muestra

| <b>Tipo de briqueta</b> | <b>Relación de biomasa</b> | <b>Porcentaje de carbono fijo (%)</b> |
|-------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| TQ1 y CP1               | 50/50                      | 74.97                                 |
| CP1 y BCA               | 50/50                      | 68.47                                 |
| TM y CP2                | 70/30                      | 80.26                                 |
| CT y PC                 | 25/75                      | 76.37                                 |
| CA y CC1                | 50/50                      | 72.12                                 |
| CC2 y TP                | 75/25                      | 80.61                                 |

Realizado por: Bernal J., 2023



**Ilustración 4-9:** Porcentaje del carbono fijo obtenido por briqueta elaborada

**Realizado por:** Bernal J., 2023

Los resultados obtenidos al realizar los cálculos para determinar el porcentaje de carbono fijo de cada briqueta son los siguientes: 74.97 % de la briqueta con TQ1 y CP1, 68.47 % de la briqueta con CP1 y BCA, 80.26 % de la briqueta con TM y CP2, 76.37 % de la briqueta con CT y PC, 72.12 % de la briqueta con CA y CC1 y 80.61% de la briqueta con CC2 y TP. Estos valores fueron comparados con la Norma Técnica Colombiana NTC 2060 para briquetas, la cual establece requisitos específicos en su Tabla 2-4. Según esta norma, el porcentaje mínimo de carbono que deben contener las briquetas es del 50 %.

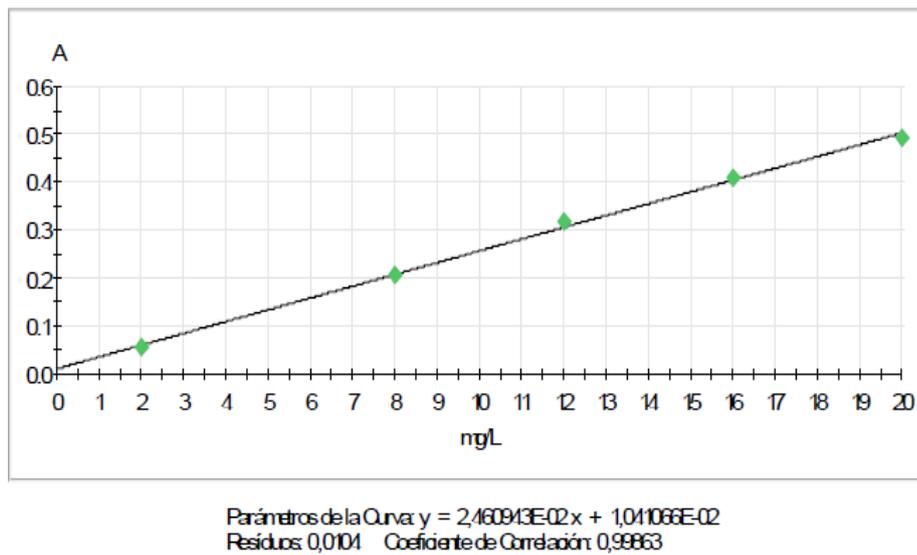
Al analizar los datos obtenidos, se concluye que todas las briquetas cumplen satisfactoriamente con la normativa establecida. Los valores registrados superan ampliamente el porcentaje mínimo requerido, lo que indica que las briquetas son de alta calidad en términos de contenido de carbono fijo, garantizándose una mayor densidad energética, lo que significa que las briquetas tienen un mayor poder calorífico y pueden generar más calor durante la combustión.

#### **4.1.6. Porcentaje de azufre**

Se comenzó realizando una curva de calibración con la metodología indicada en el procedimiento. Luego, se procedió a preparar las muestras de cada tipo de briqueta, utilizando un mortero para pulverizar las briquetas y considerando al menos 10 g de cada tipo de briqueta. Posteriormente, se agitaron durante 30 minutos en un equipo específico. Luego de la agitación, se utilizó una

centrifuga para separar la muestra líquida del sólido. Finalmente, se prepararon soluciones en diferentes concentraciones para realizar la curva de calibración y determinar el porcentaje de azufre presente en las briquetas analizadas.

Una vez realizado el proceso de preparación de las muestras utilizando el mortero y la centrifuga, se procedió a realizar la medición del porcentaje de azufre utilizando el espectrofotómetro *UV-VISIBLE*. En este equipo, se colocaron inicialmente las muestras siguiendo el procedimiento establecido para calcular la curva de calibración que se indica en la Ilustración 4-10. Para ello, se utilizaron soluciones patrón y el programa Visionlite proporcionó la curva correspondiente.



**Ilustración 4-10:** Porcentaje del carbono fijo obtenido de cada briketa elaborada

Realizado por: Bernal J., 2023

Posteriormente, se procedió a utilizar las soluciones preparadas a partir de las briquetas analizadas. El espectrofotómetro permitió obtener el valor de la concentración esperada de azufre y la concentración teórica. Para este cálculo, se considera la solución de briketa que contiene residuos agroindustriales de tallos de quinoa y cáscara de piña. Se realiza este cálculo para cada briketa y se detallan en la Tabla 4-25.

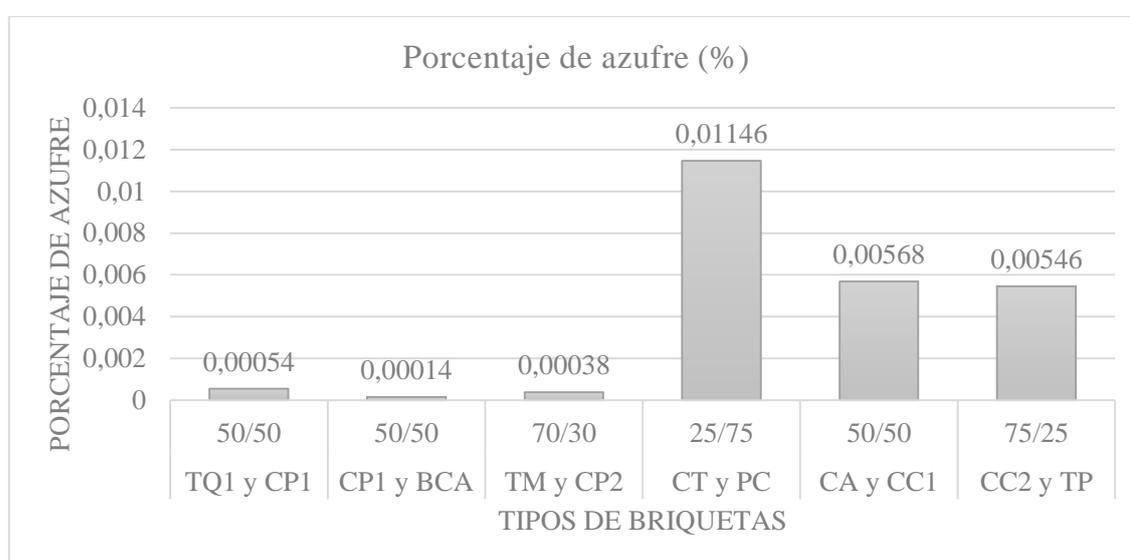
$$\%S = \left( \frac{27}{5} \times 100 \right) / 10000$$

$$\%S = 0.00054$$

**Tabla 4-25:** Resultados del porcentaje de azufre obtenido de cada muestra

| Tipo de briqueta | Relación de biomasa | Porcentaje de azufre (%) |
|------------------|---------------------|--------------------------|
| TQ1 y CP1        | 50/50               | 0.00054                  |
| CP1 y BCA        | 50/50               | 0.00014                  |
| TM y CP2         | 70/30               | 0.00038                  |
| CT y PC          | 25/75               | 0.01146                  |
| CA y CC1         | 50/50               | 0.00568                  |
| CC2 y TP         | 75/25               | 0.00546                  |

Realizado por: Bernal J., 2023



**Ilustración 4-11:** Porcentaje de azufre obtenido por briqueta elaborada

Realizado por: Bernal J., 2023

En los resultados obtenidos del porcentaje de azufre, como se observa en la Tabla 4-25 e Ilustración 4-11, se registraron los siguientes valores: 0.00054 % de la briqueta con TQ1 y CP1, 0.00014 % de la briqueta con CP1 y BCA, 0.00038 % de la briqueta con TM y CP2, 0.01146 % de la briqueta con CT y PC, 0.00568 de la briqueta con CA y CC1 % y 0.00546 % de la briqueta con CC2 y TP. Al comparar estos resultados con los requisitos establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 2060, específicamente en la Tabla 2-4 que establece los límites de azufre para las briquetas, se puede apreciar que el porcentaje máximo permitido es de 1 %.

Es importante destacar que, aunque los valores obtenidos se encuentran por debajo del límite máximo permitido, es crucial considerar el impacto del azufre en el medio ambiente. Sabemos que el azufre puede tener efectos negativos en el entorno natural y, por lo tanto, mientras menor sea el contenido de azufre en las briquetas, mejor será para el medio ambiente.

Es necesario evaluar y considerar si los resultados obtenidos cumplen con los estándares establecidos por la normativa, pero también es importante tener en cuenta la importancia de reducir la presencia de azufre en aras de preservar y proteger el medio ambiente.

## 4.2. Resultados de la caracterización fisicomecánica

### 4.2.1. Resistencia a la compresión

La caracterización fisicomecánica se llevó a cabo en la Universidad Técnica de Ambato (UTA), ubicada en la ciudad de Ambato, bajo la supervisión de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. La metodología adoptada se adhirió estrictamente al procedimiento estipulado por la normativa ASTM-D695, asegurando así la precisión y la uniformidad de los resultados. Para la implementación de este protocolo, se empleó la máquina universal de polímeros (Ver Ilustración 2-3), la cual permitió la aplicación de cargas graduales sobre las muestras, posibilitando el registro meticuloso de los parámetros clave de resistencia mecánica.

**Tabla 4-26:** Parámetros aplicados en la maquina universal de polímeros

| Tipo de briqueta | Relación de biomasa | Temperatura (C) | Humedad relativa (%) | Dimensiones (mm) |        |
|------------------|---------------------|-----------------|----------------------|------------------|--------|
|                  |                     |                 |                      | Diámetro         | Altura |
| TQ1 y CP1        | 50/50               | 21.3            | 57.1                 | 33.00            | 57.00  |
| CP1 y BCA        | 50/50               |                 |                      | 33.00            | 56.00  |
| TM y CP2         | 70/30               |                 |                      | 31.50            | 52.00  |
| CT y PC          | 25/75               |                 |                      | 33.00            | 51.00  |
| CA y CC1         | 50/50               |                 |                      | 31.00            | 51.00  |
| CC2 y TP         | 75/25               |                 |                      | 33.00            | 49.00  |

Realizado por: Bernal Jonathan., 2023

Mediante la utilización de la máquina universal de polímeros, cuyo funcionamiento se basa en los parámetros detallados en la Tabla 4-26, se llevó a cabo el estudio de las propiedades fisicomecánicas de las muestras de briquetas. Para este propósito, se empleó el software *Shimadzu Trapezium*, que permitió la introducción precisa de las especificaciones individuales de cada muestra.

Inicialmente, se aplicó una carga mínima a cada muestra, desencadenando un desplazamiento controlado por la máquina. Posteriormente, se obtuvieron y registraron meticulosamente una serie de propiedades fisicomecánicas específicas, que se detallan en la Tabla 4-27.

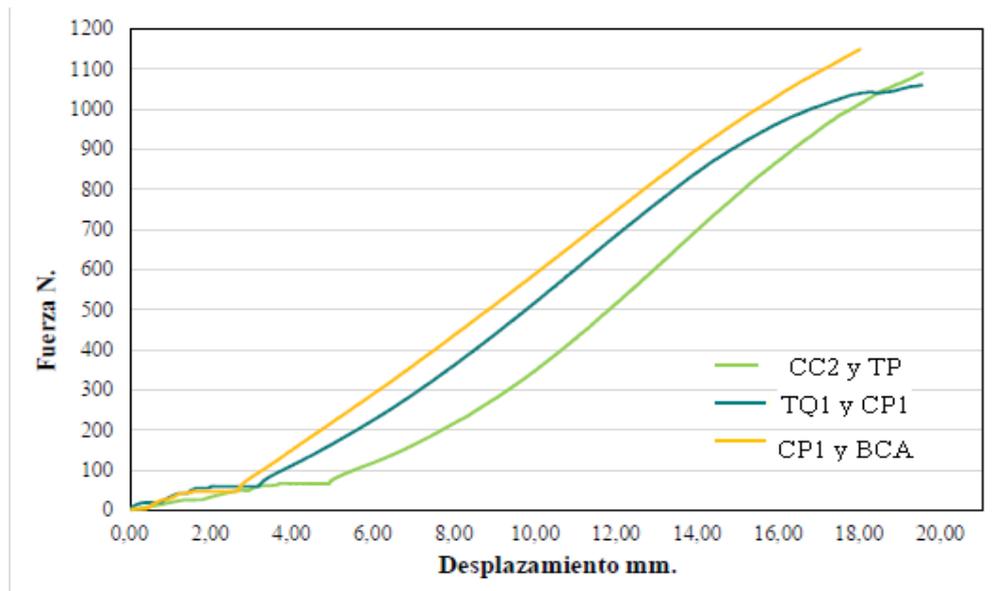
**Tabla 4-27:** Resultados de la resistencia máxima

| <b>Tipo de briqueta</b> | <b>Relación de biomasa</b> | <b>Desplazamiento (mm)</b> | <b>Resistencia máxima (N)</b> |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| TQ1 y CP1               | 50/50                      | 19.53                      | 1060.90                       |
| CP1 y BCA               | 50/50                      | 17.96                      | 1149.56                       |
| TM y CP2                | 70/30                      | 6.53                       | 232.43                        |
| CT y PC                 | 25/75                      | 7.60                       | 72.81                         |
| CA y CC1                | 50/50                      | 8.23                       | 280.68                        |
| CC2 y TP                | 75/25                      | 21.55                      | 1156.59                       |

Realizado por: Bernal J., 2023

En la Tabla 4-27, se presentan los resultados obtenidos mediante el ensayo de resistencia a la compresión de las briquetas. Los valores de resistencia máxima obtenidos para cada muestra se indican en Newtons (N). Posteriormente, estos valores se compararon con los requisitos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 2060, que especifica los estándares para la resistencia al aplastamiento.

De acuerdo con la Tabla 2-5 de la NTC 2060, se establece un requisito mínimo de resistencia al aplastamiento de 392.15 N para una masa de 20 g en cada tipo de briqueta. Tras realizar la comparación, se constató que únicamente 3 de las 6 briquetas sometidas al ensayo cumplieron con los criterios de resistencia establecidos por la normativa. A continuación, se realizó las Ilustraciones 4-12 y 4-13 en las cuales se separaron las briquetas que no cumplen con la norma y las briquetas que cumplieron con la Norma Técnica Colombiana NTC 2060.

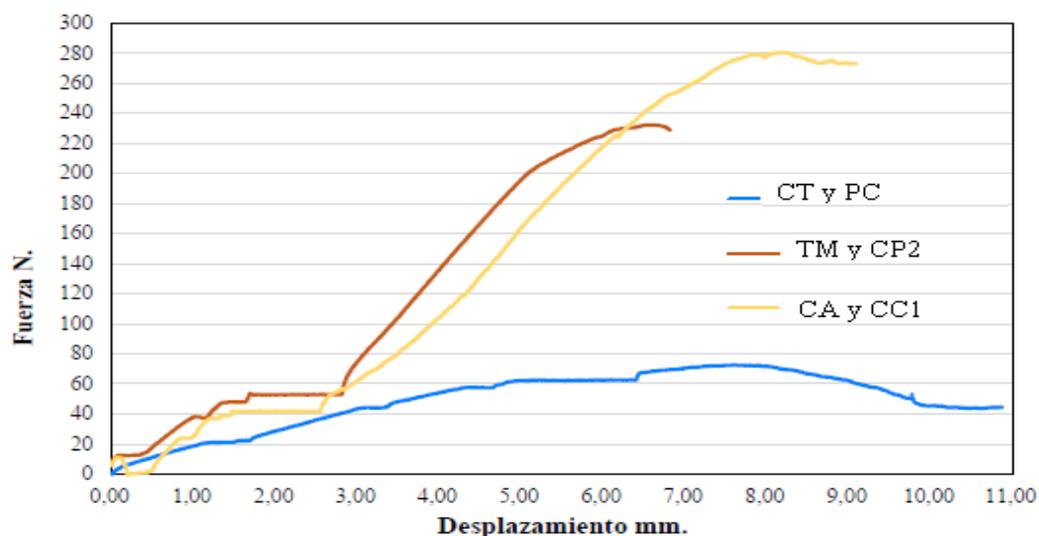


**Ilustración 4-12:** Briquetas que aprobaron las pruebas fisicomecánicas

Realizado por: Bernal J., 2023

Entre los residuos agroindustriales evaluados, se destacaron aquellas briquetas que cumplían con los estrictos requisitos estipulados por la Norma Técnica Colombiana NTC 2060. En particular, las briquetas elaboradas con la combinación de biomasa de residuos agroindustriales de TQ1 y CP1 exhibieron una impresionante resistencia máxima de 1060.90 N, mientras que la briqueta compuesta por CP1 y BCA mostró una notable resistencia de 1149.56 N. Así mismo, se observó que la briqueta derivada de la combinación de CC2 y TP alcanzó un valor máximo de resistencia de 1156.59 N. Estos resultados resaltan la eficiencia del proceso de fabricación al utilizar combinaciones específicas de residuos agroindustriales para producir briquetas que superan los estándares normativos de 392.15 N para una masa de 20 g en cada tipo de briqueta.

El cumplimiento de la normativa no solo demuestra la capacidad de las briquetas para resistir cargas significativas, sino también refleja la importancia de optimizar las técnicas de producción y de selección de materiales para garantizar la calidad y la fiabilidad de los productos resultantes. Este logro subraya la viabilidad y el potencial prometedor de la implementación de residuos agroindustriales en la producción de briquetas como una alternativa sostenible.



**Ilustración 4-13:** Briquetas que no aprobaron las pruebas fisicomecánicas

Realizado por: Bernal J., 2023

Entre las muestras evaluadas, se identificaron ciertas briquetas que no lograron cumplir con los criterios establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 2060 en términos de resistencia máxima. La briqueta elaborada con la combinación de TM y CP2 exhibió una resistencia máxima de 232.43 N, seguida por la briqueta de CT y PC, que registró un valor de 72.81 N. Además, la briqueta formada a partir de la combinación de CA y CC1 mostró una resistencia máxima de 280.68 N. Estos resultados revelan claramente que estas briquetas no cumplieron con el requisito mínimo de resistencia establecido por la normativa, fijado en 392.15 N para una masa de 20 g.

La falta de conformidad con los estándares normativos resalta la importancia de mejorar los procesos de fabricación y la selección de materiales para garantizar una mayor robustez y consistencia en las propiedades fisicomecánicas de las briquetas. Estos hallazgos enfatizan la necesidad de una cuidadosa optimización de las técnicas de producción y la elección de los materiales adecuados para asegurar la conformidad con las normativas industriales y, en última instancia, mejorar la calidad y la fiabilidad de los productos. Estos resultados también subrayan la relevancia crítica de cumplir con los estándares para garantizar la seguridad y la funcionalidad de las aplicaciones en diversas industrias.

#### 4.2.2. Tensión máxima

El procedimiento empleado para el ensayo de la tensión máxima se llevó a cabo utilizando la misma configuración y equipo utilizado en el ensayo de resistencia a la compresión, que se detalla en la Ilustración 2-3. Para este propósito, se empleó la máquina universal de polímeros junto con

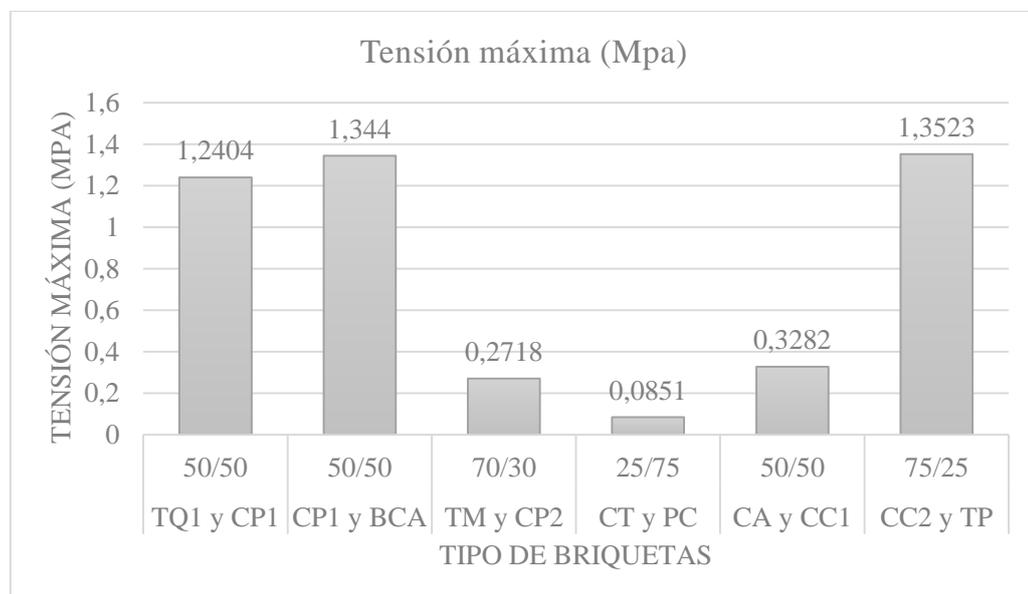
el software de análisis *Shimadzu Trapezium*, el cual permitió la introducción precisa de todas las especificaciones relevantes de las muestras.

Como resultado de este proceso, se obtuvieron valores específicos de tensión máxima, que complementan los datos obtenidos previamente en el ensayo de resistencia a la compresión. Estos valores se detallarán minuciosamente en la siguiente Tabla 4-28, y se acompañarán de una Ilustración 4-14, la cual que ofrecerá una visión más clara de las variaciones y tendencias observadas en los resultados de la tensión máxima.

**Tabla 4-28:** Resultados obtenidos de la tensión máxima

| Tipo de briqueta | Relación de biomasa | Tensión máxima (Mpa) |
|------------------|---------------------|----------------------|
| TQ1 y CP1        | 50/50               | 1.2404               |
| CP1 y BCA        | 50/50               | 1.3440               |
| TM y CP2         | 70/30               | 0.2718               |
| CT y PC          | 25/75               | 0.0851               |
| CA y CC1         | 50/50               | 0.3282               |
| CC2 y TP         | 75/25               | 1.3523               |

Realizado por: Bernal J., 2023



**Ilustración 4-14:** Resultados de la tensión máxima de cada briqueta

Realizado por: Bernal J., 2023

En la evaluación de los resultados de la prueba de resistencia a la compresión, se observa que varias de las briquetas analizadas cumplen con los requisitos fundamentales estipulados por la Norma Técnica Colombiana NTC 2060. Las briquetas TQ1 y CP1 exhibieron valores de tensión máxima de 1.2404 MPa, indicando una resistencia satisfactoria y cumplimiento con los estándares requeridos. Además, la biqueta compuesta por CP1 y BCA demostró una resistencia aún mayor, con una tensión máxima registrada de 1.3440 MPa, y la biqueta formada por CC2 y TP exhibió un valor aún más alto de 1.3523 MPa.

Este cumplimiento con los estándares normativos es un indicador alentador de la calidad y la resistencia de estas muestras en particular, lo que sugiere que están aptas para su implementación en aplicaciones estructurales según lo establecido por la normativa colombiana. La consistencia en el rendimiento sugiere la implementación adecuada de prácticas de fabricación y control de calidad que contribuyen a la integridad y la durabilidad del producto final.

Las briquetas TM y CP2, CT y PC y CA y CC1, presentaron resultados que no alcanzaron los estándares requeridos por la normativa, al registrar valores de tensión máxima de 0.2718 MPa, 0.0851 MPa y 0.3282 MPa, respectivamente, que están significativamente por debajo del umbral mínimo para una masa de 20 g. Esta discrepancia revela posibles deficiencias en la composición, la preparación o el manejo de estas muestras específicas durante el proceso de fabricación y ensayo. Es esencial investigar a fondo la calidad de los materiales utilizados, así como los métodos de mezclado.

#### **4.2.3. *Módulo elasticidad***

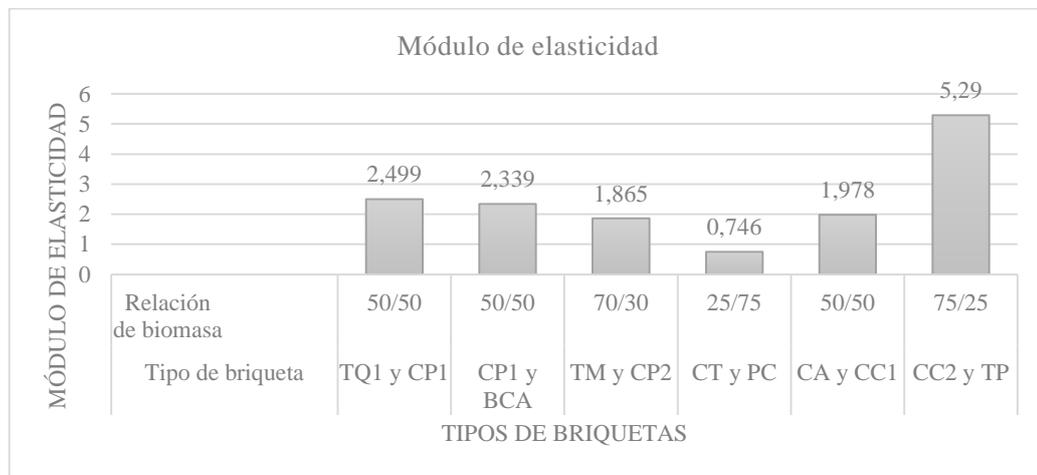
El ensayo del módulo de elasticidad se llevó a cabo utilizando la misma configuración y equipo empleado en la prueba de resistencia a la compresión, cuyos detalles se encuentran descritos en la Tabla 4-27. Para este propósito, se utilizó la máquina universal de polímeros en combinación con el software de análisis Shimadzu Trapezium, el cual permitió una introducción precisa de todas las especificaciones relevantes de las muestras en consideración.

Como resultado de este proceso, se lograron obtener valores específicos del módulo de elasticidad, los cuales complementan y enriquecen los datos previamente recopilados durante el ensayo de resistencia a la compresión. Estos valores se presentarán de manera detallada en la Tabla 4-29, acompañados de la Ilustración 4-15, la cual proporcionará una comprensión más clara de las variaciones y tendencias observadas en los resultados del módulo de elasticidad.

**Tabla 4-29:** Resultados obtenidos del módulo elasticidad

| Tipo de briqueta | Relación de biomasa | Módulo elástico $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$ |
|------------------|---------------------|---|
| TQ1 y CP1        | 50/50               | 2.499   |
| CP1 y BCA        | 50/50               | 2.339   |
| TM y CP2         | 70/30               | 1.865   |
| CT y PC          | 25/75               | 0.746   |
| CA y CC1         | 50/50               | 1.978   |
| CC2 y TP         | 75/25               | 5.290   |

Realizado por: Bernal J., 2023



**Ilustración 4-15:** Resultados del módulo de elasticidad de cada briqueta

Realizado por: Bernal J., 2023

En la evaluación de los resultados del módulo de elasticidad, es alentador observar que varias de las briquetas analizadas cumplen con los rigurosos estándares establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 2060. Tanto las briquetas TQ1y CP1 revelaron valores del módulo de elasticidad de 2.499 N/mm<sup>2</sup>, lo que indica una capacidad satisfactoria para resistir la deformación elástica bajo carga. Además, la briqueta compuesta por CP1 y BCA exhibió un módulo de elasticidad registrado de 2.339 N/mm<sup>2</sup>, demostrando una resistencia notable y coherente con los estándares de calidad requeridos. De manera similar, la briqueta formada por CC2 y TP demostró un rendimiento excepcional con un valor de módulo de elasticidad de 5.290 N/mm<sup>2</sup>, destacando su capacidad superior para resistir la deformación bajo carga, lo que sugiere un potencial prometedor para aplicaciones estructurales más exigentes.

Las briquetas que no cumplen con la normativa mostraron una discrepancia significativa en comparación con el umbral mínimo estipulado por la normativa para una masa de 20 g, lo que indica una clara falta de conformidad en la resistencia estructural de las briquetas TM y CP2 con

valores de 1.865 N/mm<sup>2</sup>, CT y PC un módulo de elasticidad de 0.746 N/mm<sup>2</sup> y CA y CC1 se obtuvo un valor de 1.978 N/mm<sup>2</sup>. Este bajo rendimiento sugiere posibles deficiencias en la composición de la mezcla utilizada, así como posibles incongruencias en los procesos de preparación y manipulación durante la fabricación y el ensayo. Un enfoque riguroso en la mejora de los procesos de fabricación y el control de calidad será crucial para garantizar un rendimiento más consistente y confiable en futuros análisis del módulo de elasticidad.

#### 4.2.4. Deformación máxima

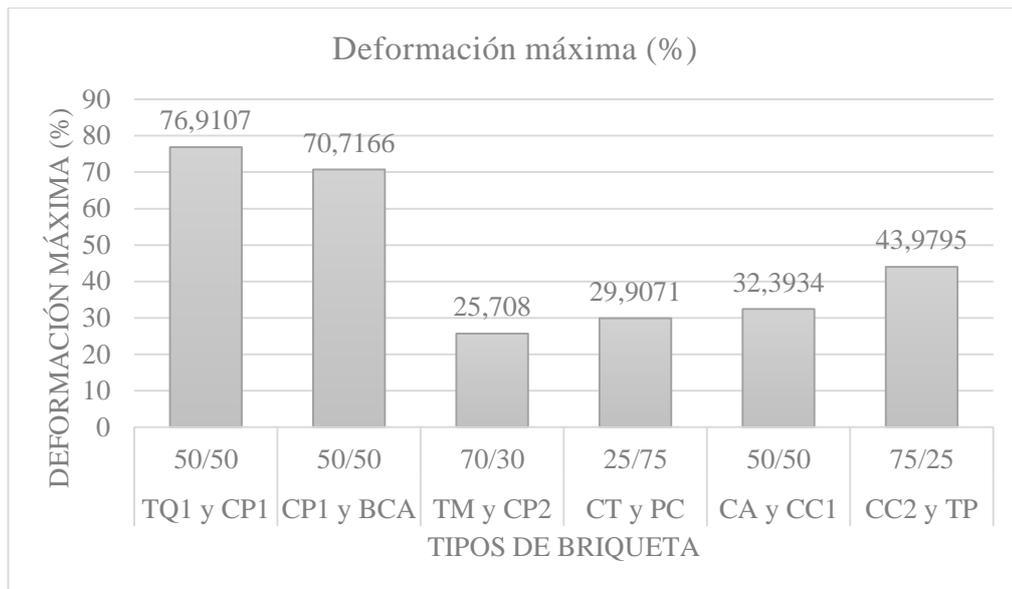
El ensayo de la resistencia a la compresión se realizó utilizando idéntica configuración y equipo destinado a la medición de la deformación máxima, según se detalla en la Tabla 4-27. La máquina universal de polímeros fue empleada en combinación con el software de análisis *Shimadzu Trapezium*, permitiendo una introducción precisa de todas las especificaciones relevantes de las muestras en consideración.

Fruto de este proceso, se obtuvieron valores específicos que cuantifican la magnitud de la deformación experimentada por las briquetas, complementando así y enriqueciendo los datos recopilados durante el ensayo de resistencia a la compresión. Estos valores se expondrán detalladamente en la Tabla 4-30 y se acompañan de la Ilustración 4-16, cuya representación gráfica permitirá una comprensión más clara de las variaciones y tendencias observadas en los resultados del porcentaje de deformación máxima.

**Tabla 4-30:** Resultados obtenidos de la deformación máxima

| Tipo de briketa | Relación de biomasa | Deformación máxima (%) |
|-----------------|---------------------|------------------------|
| TQ1 y CP1       | 50/50               | 76.91070               |
| CP1 y BCA       | 50/50               | 70.71660               |
| TM y CP2        | 70/30               | 25.70800               |
| CT y PC         | 25/75               | 29.90710               |
| CA y CC1        | 50/50               | 32.39340               |
| CC2 y TP        | 75/25               | 43.97950               |

Realizado por: Bernal J., 2023



**Ilustración 4-16:** Porcentaje de deformación máxima de cada briqueta

**Realizado por:** Bernal J., 2023

En la evaluación de los resultados del porcentaje de deformación máxima, es alentador constatar que varias de las briquetas analizadas cumplen rigurosamente con los estándares establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 2060. Tanto las briquetas TQ1 como CP1 revelaron un porcentaje de deformación máxima de 76.91070 %, destacando su notable capacidad para resistir la deformación bajo carga. Del mismo modo, la briqueta compuesta por CP1 y BCA exhibió un porcentaje de deformación máxima de 70.71660 %, mientras que la briqueta formada por CC2 y TP demostró un valor de deformación máxima de 43.97950 %. Estos resultados indican una resistencia satisfactoria y sugieren una notable aptitud para aplicaciones estructurales de exigencia.

En contraste, las briquetas que no cumplen con los estándares establecidos revelaron una discrepancia significativa en comparación con el umbral mínimo establecido por la normativa NTC 2060 para una masa de 20 g. Esto indica una clara falta de conformidad en la deformación máxima de las briquetas TM y CP2, con valores de 25.70800 %; CT y PC, con un porcentaje de deformación máxima de 29.90710 %; y CA y CC1, que obtuvieron un valor de 32.39340 %. Estos resultados plantean interrogantes sobre la calidad y la integridad estructural de estas muestras específicas. Es esencial implementar prácticas de fabricación más rigurosas y controles de calidad más estrictos en todas las fases del proceso de producción para garantizar la conformidad con las normativas específicas y mejorar la fiabilidad y la integridad estructural de las briquetas.

### 4.3. Resultados obtenidos del proceso óptimo de elaboración briquetas

En la determinación del proceso óptimo para la elaboración de briquetas como fuente de bioenergía, nuestro análisis comparativo se ha enfocado en tres pilares esenciales: la cuidadosa elección del residuo agroindustrial, la cantidad del aglutinante y la precisa aplicación de temperatura y presión en la máquina briquetadora. Al abordar estos aspectos cruciales, no solo delineamos un camino hacia la eficiencia y sostenibilidad en la generación de bioenergía, sino que también esculpimos un proceso de elaboración que optimiza cada etapa, transformando desafíos en oportunidades para alcanzar la excelencia en cada briqueta producida.

**Tabla 4-31:** Aspectos considerados en el proceso de elaboración

| Consideraciones  | Aspectos evaluables   |
|--|---|
| <p style="text-align: center;"><b>Selección del residuo agroindustrial</b></p> | <p>Tallos de quinoa, cáscara de piña, bagazo de caña de azúcar, cáscara de café y tallos de plátano se destacaron como los residuos agroindustriales más eficaces para la elaboración de briquetas.</p> |
|  | <p>Al realizar la caracterización estos residuos demostraron propiedades químicas y físicas superiores, contribuyendo significativamente al éxito del proceso.</p>                                      |
|  | <p>Al cumplir con todas las pruebas y demostrar el mayor poder calorífico, estos residuos se posicionan como la opción óptima para asegurar calidad y eficiencia en la producción de briquetas.</p>     |
| <p style="text-align: center;"><b>Aglutinante</b></p>                          | <p>Se empleó almidón de yuca como aglutinante en todas las briquetas, con una relación de aglutinante en la briqueta de 8 al 10%.</p>   |
|  | <p>Normativas como ONORM-7135 y DIN PLUS establecen que la cantidad de aglutinante agregado debe ser menor al 2%.</p>   |
|  | <p>La cantidad excesiva de aglutinante, fuera de los límites normativos, resultó en un elevado porcentaje de humedad en las briquetas elaboradas.</p>   |

|  |   |
|--|---|
| <b>Parámetros de temperatura y presión</b> | Se determinó que la temperatura de compactación óptima para la máquina briquetadora de tipo tornillo sin fin con extrusor y carcaza es de 40-70°C.      |
|  | La presión de compactación ideal se sitúa en el rango de 85 a 100 KPa.  |
|  | Estos parámetros fueron identificados como cruciales para lograr una óptima resistencia en las briquetas, asegurando así la calidad del producto final. |

**Realizado por:** Bernal J., 2023

Al estudiar el proceso de elaboración de briquetas, la selección precisa del residuo agroindustrial emerge como un componente esencial para los residuos orgánicos como son: tallos de quinoa, cáscara de piña, bagazo de caña de azúcar, tusa de maíz y cáscara de papa se destacan. Estos residuos, tras una detallada caracterización, no solo exhibieron propiedades químicas y físicas superiores, sino que al superar las pruebas establecidas y demostrar el mayor poder calorífico, se consolidan como la elección óptima para garantizar calidad y eficiencia en la producción de briquetas.

En el ámbito del aglutinante, la elección del almidón de yuca en proporciones del 8 al 10% en las briquetas desafía normativas como ONORM-7135 y DIN PLUS, indicando un límite de aglutinante inferior al 2 %. Este exceso de aglutinante resultó en un contenido de humedad elevado en las briquetas finales, subrayando la necesidad de seguir las directrices normativas para asegurar la calidad del producto.

En el cierre de nuestro análisis, la temperatura de compactación ideal entre 40 – 70 °C y la presión óptima en el rango de 85- 100 KPa, se revelan como pilares fundamentales. Estos parámetros críticos, identificados en la Tabla 4-31, son esenciales para lograr la densidad y resistencia óptimas en las briquetas, consolidando la calidad del producto final. Estos descubrimientos, plasmados, no solo proporcionan una visión completa del proceso de elaboración de briquetas, sino que también sirven como guía crucial para alcanzar la eficiencia y sostenibilidad en la generación de bioenergía.

#### 4.4. Resultados de costos de producción de las briquetas

##### 4.4.1. Costos variables

La generación de los resultados de los costos de producción de las briquetas fue llevada a cabo meticulosamente a través de una serie de cálculos exhaustivos realizados utilizando la plataforma de Excel. La presente sección exhibe los frutos de este proceso analítico y revela los resultados destacados, respaldados por los cálculos precisos y rigurosos efectuados en esta herramienta. En la Tabla 4-32 se presentan cada uno de los detalles para obtener el costo variable.

**Tabla 4-32:** Resultados obtenidos de los costos variables

| <b>Materia Prima</b>                 |                 |                        |                                    |                    |
|--------------------------------------|-----------------|------------------------|------------------------------------|--------------------|
| <b>Rubros</b>                        | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b>          | <b>Precio Unitario</b>             | <b>Total (USD)</b> |
| Briquetas                            | 1               | Paquete de 3kg         | 0.8                                | 0.8                |
| Funda de papel                       | 1               | Unidad                 | 0.2                                | 0.2                |
| Etiquetas para la funda              | 1               | Pliego                 | 0.3                                | 0.3                |
| <b>Total</b>                         |                 |                        |                                    | 1.3                |
| <b>Mano de obra directa mensual</b>  |                 |                        |                                    |                    |
| <b>Rubros</b>                        | <b>Cantidad</b> | <b>Total (USD)</b>     |                                    |                    |
| Operario                             | 2               | 450                    |                                    |                    |
| <b>Materia prima directa mensual</b> |                 |                        |                                    |                    |
| <b>Rubros</b>                        | <b>Cantidad</b> | <b>Total (USD)</b>     |                                    |                    |
| Funda de briquetas de 3kg            | 20000           | 26000                  |                                    |                    |
| <b>Mano de obra directa</b>          |                 |                        |                                    |                    |
| <b>Rubros</b>                        | <b>Cantidad</b> | <b>Total (USD)</b>     |                                    |                    |
| Operarios                            | 2               | 0.023                  |                                    |                    |
| <b>Subtotal</b>                      |                 |                        |                                    | 0.05               |
| <b>Producción</b>                    |                 |                        |                                    |                    |
| <b>Detalle</b>                       | <b>Diario</b>   | <b>Días trabajados</b> | <b>Producción mensual esperada</b> |                    |
| Unidades a producir                  | 1000            | 20                     | 20000                              |                    |

Realizado por: Bernal J., 2023

Es fundamental empezar con los cálculos de los costos variables, que se obtienen a partir de la suma de la materia prima y la mano de obra directa, como se indica en la Ecuación 3-9.

$$C_V = 1.3 + 0.05$$

$$C_V = \$1.35$$

El valor de \$1.3 representa la suma de toda la materia prima para la producción de briquetas. Para calcular el costo de mano de obra directo necesitamos primero determinar la producción mensual tanto de materia prima como de mano de obra. El costo mensual de la materia prima se determina multiplicando el valor mensual de la materia prima por la cantidad de fundas que se producirán al mes, siendo 20000 fundas de briquetas de 3 kg. Este cálculo nos proporciona un valor mensual de materia prima de \$26000. En cuanto al cálculo del valor mensual de la mano de obra, se multiplica el sueldo del operario, que es de \$450, por el número de unidades producidas mensualmente, que es de 20000 briquetas, y luego se multiplica por el número de operarios, que en este caso son 2. Este proceso nos da un valor de mano de obra directa de \$0.05. Sumando los valores de la materia prima y la mano de obra directa, obtenemos un costo variable unitario de \$1.35.

#### **4.4.2. Costos fijos**

La determinación del valor del costo fijo se sustenta en la obtención precisa de los valores correspondientes a la materia prima indirecta, la mano de obra indirecta y otros gastos fijos. Estos datos son cruciales para el análisis, han sido minuciosamente recopilados en la Tabla 4-33.

**Tabla 4-33:** Resultados obtenidos de los costos fijos

| <b>Materia prima indirecta</b>           |                              |
|--|------------------------------|
| <b>Rubros</b>                            | <b>Valores por mes (USD)</b> |
| Cajas, cartones                          | 40                           |
| Distribución (combustible)               | 70                           |
| Total                                    | 110                          |
| <b>Mano de obra indirecta</b>            |                              |
| <b>Rubros</b>                            | <b>Valores por mes (USD)</b> |
| Contadora                                | 100                          |
| Controlador de calidad                   | 600                          |
| Secretaria                               | 450                          |
| Total                                    | 1150                         |
| <b>Otros gastos fijos</b>                |                              |
| <b>Rubros</b>                            | <b>Valores por mes (USD)</b> |
| Servicios básicos (Agua, luz y teléfono) | 450                          |
| Publicidad                               | 75                           |
| Reparaciones y mantenimiento             | 75                           |
| Suministros de oficina (Papel, esferos)  | 10                           |
| Total                                    | 610                          |

**Realizado por:** Bernal J., 2023

La determinación del total de costos fijos se ha abordado minuciosamente a través del análisis exhaustivo de los datos contenidos en la Tabla 4-33. Mediante la aplicación precisa de la Ecuación 3-11, se han revelado y detallado meticulosamente los valores correspondientes a la materia prima directa, la mano de obra indirecta y otros gastos fijos. Este proceso de análisis es importante para obtener el costo de producción final.

$$C_F = 110 + 1150 + 610$$

$$C_F = \$1870$$

El valor obtenido de costos de producción es de \$1870 el cual representa todo el gasto que se necesita indirectamente de los costos variables.

#### 4.4.3. Costos de producción

Para alcanzar una comprensión integral de la producción de costos finales, resulta imperativo contar con los valores previamente obtenidos de los costos variables y costos fijos. El proceso de cálculo se inicia aplicando la Ecuación 3-9, la cual establece las bases para este análisis fundamental. Es importante señalar que la variable  $P_E$  representa la producción esperada mensualmente para elaborar briquetas que es de 20000 fundas de briquetas de 3 kg.

$$C_p = 1.35 + \frac{1870}{20000}$$
$$C_p = \$1.44$$

Los resultados finales del análisis de costos de producción han revelado un valor excepcionalmente competitivo de \$1.44 por cada funda de 3 kg de briquetas, representando un hito significativo en la evaluación de la viabilidad económica del proceso. Considerando la producción estimada de 1000 fundas diarias de 3 kg, se generan 3000 kg, equivalentes a 3 toneladas de briquetas por día.

Se destaca que el valor estimado de \$460 por cada tonelada de briquetas refleja una relación favorable en comparación con los precios actuales en el mercado, los cuales oscilan entre \$300 a y \$400, dependiendo del contexto nacional. Esta evaluación revela la fortaleza económica y la prometedora perspectiva de rentabilidad que subraya la viabilidad y el potencial lucrativo de la producción de briquetas.

La adaptación flexible de la producción diaria de briquetas evidencia un impacto directo en la reducción de los costos, fortaleciendo aún más la sólida viabilidad económica de este proceso productivo. Estos hallazgos representan un paso significativo hacia la consolidación de estrategias sostenibles y rentables en el ámbito de la producción de briquetas, en sintonía con las demandas del mercado y las perspectivas financieras a largo plazo.

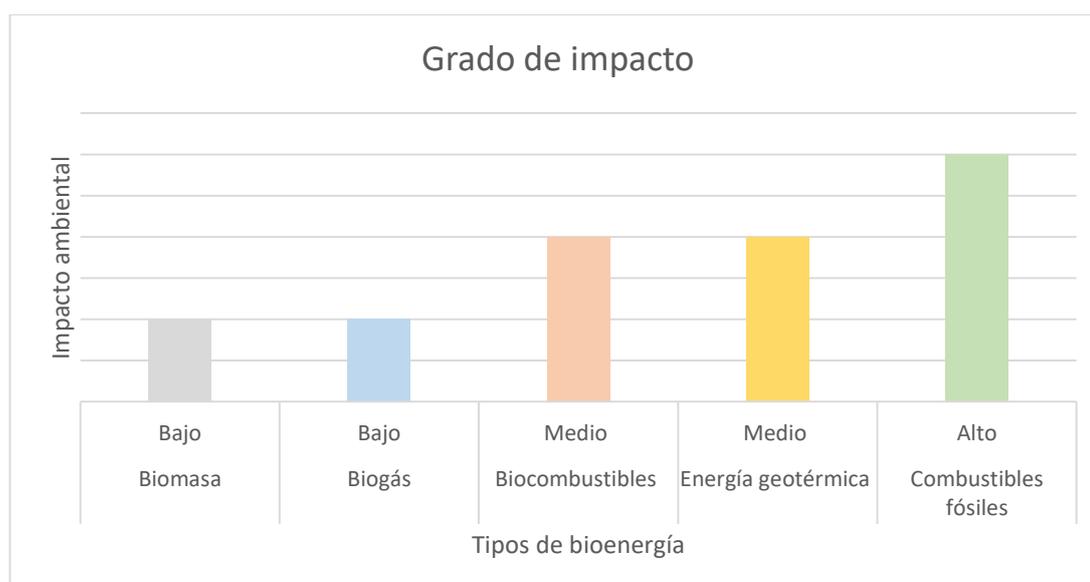
#### 4.5. Impacto ambiental

La culminación de este análisis comparativo se refleja de manera concisa en la siguiente Tabla 4-34, donde se detallan de forma resumida los resultados obtenidos de las diferentes fuentes de energía. Este resumen no solo arroja luz sobre la eficiencia en la producción de energía, sino que también destaca de manera clara y cuantificada el impacto medioambiental inherente a cada alternativa. A través de esta herramienta visual, se pretende proporcionar una visión rápida y clara que guiará nuestras conclusiones respecto a la elección más sostenible y eficaz para la generación de bioenergía."

**Tabla 4-34:** Análisis general

| Tipo de bioenergía   | Proceso de obtención   | Impacto ambiental |
|----------------------|--|-------------------|
| Biomasa              | Conversión de residuos y biomasa en briquetas.   | Bajo              |
| Biogás               | Digestión anaeróbica de residuos orgánicos.  | Bajo              |
| Biocombustibles      | Producción de biodiesel y bioetanol a partir de cultivos o residuos.                                       | Medio             |
| Energía geotérmica   | Extracción de calor natural de la Tierra, ya sea vapor o agua caliente.                                    | Medio             |
| Combustibles fósiles | Producción de petróleo, el carbón y el gas natural a partir de plantas, animales y extracción subterránea. | Alto              |

Realizado por: Bernal J., 2023



**Ilustración 4-17:** Impacto ambiental según los tipos de bioenergía

Realizado por: Bernal J., 2023

Al examinar las distintas fuentes de energía, como el biogás, los biocombustibles y la energía geotérmica, surge una conclusión clara en favor de la biomasa, especialmente cuando se utiliza en combinación con residuos agroindustriales.

El biogás, generado a partir de la descomposición de materia orgánica, presenta beneficios ambientales al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, su producción a menudo involucra el uso de tierras cultivables y puede competir con la producción de alimentos. Los biocombustibles, presentados como alternativa a los combustibles fósiles, no se revelan como la elección más óptima. La producción masiva de biocombustibles conlleva el riesgo de deforestación y competencia con la agricultura alimentaria, generando desafíos sustanciales para la sostenibilidad. La energía geotérmica, aunque una fuente renovable, está limitada geográficamente y no es aplicable universalmente.

En contraste, la utilización de biomasa a partir de residuos agroindustriales no solo aborda la gestión responsable de desechos, sino que también evita la deforestación al no depender de la tala de árboles para obtener materia prima. Esta estrategia se destaca por su versatilidad, al poder aprovechar una amplia gama de residuos orgánicos, y contribuye a la economía circular al transformar desechos en recursos valiosos.

En conclusión, la combinación de biomasa y residuos agroindustriales emerge como una de las mejores alternativas para la generación de bioenergía, al abordar de manera efectiva los desafíos ambientales y sociales asociados con otras fuentes de energía. Esta opción no solo es sostenible desde el punto de vista medioambiental, sino que también tiene un impacto positivo en la gestión de residuos y la conservación de los recursos naturales, consolidándose como una elección responsable y eficaz en la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- Se realizó el análisis técnico de briquetas obtenidas de residuos agroindustriales determinando que bajo condiciones adecuadas en el proceso de elaboración y cumpliendo estándares de calidad basados en la Norma Técnica Colombiana NTC 2060, se proyecta como la solución más sobresaliente y sostenible para la generación de biocombustibles amigables con el medio ambiente.
- Se realizó la caracterización de briquetas elaboradas a partir de residuos agroindustriales, teniendo como resultado que la cáscara de piña/tallo de quinoa (50/50), la cáscara de piña/bagazo de caña de azúcar (50/50) y cáscara de café/tallo de plátano (75/25), cumplen con los requisitos fisicoquímicos y fisicomecánicos establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 2060, exceptuando el porcentaje de humedad que supera el límite establecido.
- Se determinó que el proceso de elaboración de briquetas alcanzará su óptimo potencial con ajustes considerados para futuras investigaciones. Para lograrlo, es esencial garantizar que la selección del residuo agroindustrial presente propiedades similares a los residuos de tallos de quinoa, cáscara de piña, bagazo de caña de azúcar, cáscara de café y tallos de plátano. Además, es importante limitar la cantidad de aglutinante agregado a un máximo del 2%, dado su impacto significativo en la humedad. Finalmente, enfocarse en el control preciso de la temperatura (40-70°C) y la presión de compactación de la máquina briquetadora (75-100 KPa).
- Se analizó que los costos de producción de briquetas son una alternativa viable económicamente al implementar en el mercado. Se proyecta un costo de \$1.44 por funda de 3 kg, considerando una producción diaria de 1000 fundas de briquetas y en respuesta al aumento sustancial en los precios de los biocombustibles fósiles debidos a la situación geopolítica de diferentes países, con un incremento de \$300 a \$400 por tonelada en 2023, se calculó que el valor por tonelada de briquetas es de \$460 el cual es un precio que se adapta al mercado actual y desempeñaría un papel determinante en el ámbito competitivo.

- Se estimó que el uso de briquetas como fuente de bioenergía presenta beneficios ambientales positivos al reducir el impacto ambiental y las emisiones de gases de efecto invernadero. Lo cual es el resultado de la utilización de biomasa renovable que contribuyen activamente a mitigar el cambio climático, mejorar la calidad del aire y reducir la dependencia de los combustibles fósiles al tener una menor huella de carbono y azufre.

## **5.2. Recomendaciones**

- Se recomienda aplicar técnicas de secado como el uso de deshidratadores industriales o el secado al aire hasta que la briqueta alcance un contenido de humedad menor al 2.5%.
- Se recomienda implementar estrategias para mejorar la viabilidad económica, como aumentar la producción diaria de briquetas, respaldada por una implementación eficiente de tecnologías avanzadas de procesamiento de biomasa. Este enfoque no solo garantizará la competitividad de las briquetas, sino que también fomentará la innovación continua y la optimización en los procesos de producción.
- Se recomienda continuar este estudio, abarcando más biomásas residuales haciendo énfasis en las de corte agrícola como cáscara de palma y cáscara de nuez, reconocidos por su capacidad para proporcionar cohesión y resistencia a las briquetas. Esto permitirá una mejor comprensión de sus propiedades y abriría nuevas posibilidades para su uso en la generación de energía renovable mejorando así la gestión de residuos y promoviendo la sostenibilidad energética.

## BIBLIOGRAFÍA

**AGUIAR, Santiago, ARBOLEDA, Luis y UVIDIA, Hernán.** Aprovechamiento de residuos agroindustriales como alternativa en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Alfa*. Vol. 5, número 15 (2021), (Ecuador) págs. 649-660.

**AHUMADA, Luz et al.** Optimización de las Condiciones de Operación de la Microgasificación de Biomasa para Producción de Gas de Síntesis. *Información Tecnológica*. Vol. 27, número 3 (2016), (Colombia) págs. 179-188.

**ARIAS, Rosa y MENESES, Juan.** Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua. 2016. págs. 8-10.

**BASTIDAS, Marlon, VALERA, Robert y SERRANO, Darío.** Producción de briquetas a partir de raquis residual de la palma africana para las comunidades alfareras del norte del Cesar. *Información tecnológica*. Vol. 33, número 1 (2022), (Colombia) págs. 193-202.

**BAYAS, Silvana.** Aprovechamiento de residuos Agroindustriales, cascarilla de arroz (Oriza sativa) y residuos de papa (*Solanum tuberosum*) para la producción de trichoderma (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. 2012. págs. 10-12.

**BELTRÁN, Angie y GUERRERO, Yeimy.** Elaboración de manual y procedimientos de la bomba calorimétrica PARR 6300 para la determinación del poder calorífico de muestras sólidas de interés ambiental (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado), Bogotá. 2018. pág. 1.

**BERMEO, Carlos.** Determinación del tiempo de secado a temperatura ambiente para la elaboración y caracterización de las briquetas de carbón (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Universidad César Vallejo, Piura. (2019). págs. 1-141.

**CAIZA, Robinson.** Determinación del poder calorífico de la biomasa de tallos de quinoa y cáscara de piña con la combinación de nanopartículas de aluminio (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Epoch, Riobamba. 2022. pág. 1.

**CARVAJAL, Yaillet.** Caracterización de residuos agroindustriales con vistas a su aprovechamiento. *Revista centro azúcar*. Vol. 43, numero 1 (2016), (Cuba) págs. 29-31.

**CERVERA RUIZ, Miguel y BLANCO DÍAZ, Elena.** *Resistencia de materiales, Centro Internacional de métodos numéricos en ingeniería. 2ª ed.* Barcelona-España: 2015. ISBN: 978-84-944244-4-1, pág. 3.

**CHAQUILLA-QUILCA, Guadalupe et al.** Propiedades y posibles aplicaciones de las proteínas de salvado de trigo. *Biotecnología y ciencias agropecuarias* [en línea], 2018, (México), 138 (1), págs. 137-147. [accedido 22 junio 2023]. ISSN 2007-7521. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/cuat/v12n2/2007-7858-cuat-12-02-137.pdf>

**CONTRERAS-LÓPEZ, Elizabeth; et al.** Composición química de cebadas cultivadas bajo diferentes condiciones. *Centro de investigaciones químicas*. Vol. 20, número 3 (2008), (Venezuela) págs. 201-208.

**FRÍAS, Jhoseline.** Determinación del poder calorífico de las cáscaras de piña y del bagazo de la caña de azúcar enriquecidos con nanopartículas de aluminio como alternativa de nuevas fuentes de energía (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Espoch, Riobamba. 2022. pág. 1.

**GUEVARA, Melanny.** Determinación del poder calorífico de residuos agroindustriales de tusa de maíz y cáscara de papa enriquecidas con nanoesferas de celulosa como opción viable en procesos de combustión (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Espoch, Riobamba. 2022. pág. 1.

**HUARACA, Johana.** Determinación del poder calorífico de los residuos agroindustriales de cáscara de trigo y paja de cebada enriquecidos con nanopartículas de celulosa como una alternativa de energía (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Espoch, Riobamba. 2022. pág. 1.

**ICONTEC, NTC-2060.** *Briquetas combustibles para uso doméstico. Parte 1: Requisitos de las briquetas. Parte 2: Requisitos de resistencia al aplazamiento.*

**INER.** *Análisis de oportunidades de investigación, desarrollo e innovación en eficiencia energética y energías renovables en Ecuador. Un enfoque desde el sector académico. 4ª ed.* Quito-Ecuador: 2016. ISBN: 978-9942-8620-1-3, pág. 44.

**IZQUIERDO, Raúl.** Evaluación del cultivo de maíz (*Zea mays*), como complemento a la alimentación de bovinos de leche en épocas de escasez de alimento (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Quito. págs. 22-27.

**JAMA, Valeria.** Determinación del poder calorífico de los residuos sólidos agroindustriales de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) y cáscara de coco (*Cocos nucifera*) con nanocristales de celulosa como una nueva alternativa de energía (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Espoch, Riobamba. 2022. pág. 1.

**Emilio, Ruelas.** Maquina Universal Polímeros. *Revista de la facultad de ingeniería*. Vol. 1, número 2 (2013), (México) págs. 1-49.

**LÓPEZ, Juan et al.** Evaluación de los parámetros físicos y químicos de las briquetas obtenidas con la maquina briquetadora. *Revista científica de ciencias ambientales*. Vol. 5, número 4 (2015), (España) págs. 3-15.

**MEDINA, Rosa.** Determinación del poder calorífico de los residuos sólidos agroindustriales de cáscara de café y tallo de plátano combinados con nanocelulosa (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Espoch, Riobamba. 2022. pág. 1.

- MENDOZA, Jorge et al.** Fabricación de biocombustibles sólidos densificados (briquetas) a base de serrín de acacia y estiércol de bovinos en el departamento de Córdoba. *Revista chile de ingeniería*. Vol. 28, número 3 (2020), (Colombia) págs. 448-460.
- BRAVO, Montilla.** *El cultivo de la piña en el manejo de biotecnología vegetal para la obtención de su valor nutritivo*. 1ª ed. Lara-Venezuela: 1997. ISBN: 980-318-104-1, págs. 1-162.
- MOTATO, Karina, LEÓN, Ángela y MEJÍA, Amanda.** Evaluación de los residuos agroindustriales de plátano (*Musa paradisiaca*) y aserrín de abarco (*Cariniana piriformes*) como sustratos para el cultivo del hongo *Pleurotus djamor*. *Revista de la facultad de química farmacéutica*. Vol. 13, número 2 (2005), (Colombia) págs. 24-29.
- MUÑOZ, Deyanira, CUATIN, Milton y ÁLVARO, Javier.** Potencial Energético de residuos agroindustriales, a partir del poder calorífico inferior, *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*. Vol. 11, número 2 (2013), (Cauca) págs. 156-163.
- PELÁEZ, Manuel y ESPINOZA, Juan.** *Energías renovables en el Ecuador. Situación actual, tendencias y perspectivas*. 1ª ed. Cuenca-Ecuador: 2015. ISBN: 978-9978-14-317-9, pp. 29-99.
- PLANEE.** *Plan Nacional de Eficiencia Energética. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*. 1ª ed. Quito-Ecuador: 2017. ISBN: 978-9942-22-148-3, págs. 1-112.
- POTTER, Lesley.** La industria de aceite de palma en Ecuador: Un buen negocio para los pequeños agricultores. *Revista Eutopía*. Vol. 1, número 2 (2011), (Ecuador) págs. 39-54.
- PUMISACHO, Manuel y SHERWOOD, Stephen.** *El cultivo de la papa en Ecuador. El Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, Quito*. 1ª ed. Quito-Ecuador: 2002, págs. 21-28.
- D695 – 15: 2019.** *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. Issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee. Parte 1: Requerimientos de la resistencia.*
- RODRÍGUEZ, Walter Danilo Maradiaga et al.** Producción de briquetas con residuos de cáscara de piñón manso (*Jatropha curcas*) y bagazo de caña de azúcar. *Bosque*. Vol. 38, número 3 (2017), (Brasil) págs. 527-533.
- ROJAS, Wilfredo.** La diversidad genética de la quinua: potenciales usos en el mejoramiento y agroindustria Genetic diversity of quinoa. *Potential uses for breeding and agroindustry*. Vol. 3, numero 2 (2016), (Bolivia) págs. 115-124.
- SANDOVAL, Francisca.** *Análisis de Alimentos Fundamentos y Técnicas. Universidad Nacional Autónoma de México*. 1ª ed. México-Ecuador: 2011, págs. 17-29.
- VARGAS, Alexandra y PÉREZ LILIANA.** Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista facultad de ciencias básicas*, Vol. 14, número 1 (2018), (Colombia) págs. 59-72.

**VERA, David.** Elaboración de las Briquetas de carbón a partir de las hojas del árbol de teca (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil. 2021. págs. 25-42.

**VILLACIS, Joel.** Elaboración de briquetas de carbón, a partir de la carbonilla vegetal de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Espoch, Riobamba. 2023. pág. 63.



## ANEXOS

### ANEXO A: PRUEBAS FISICOQUÍMICA: HUMEDAD



a)



b)



c)

| NOTAS:   | CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:  | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE<br>CHIMBORAZO<br>FACULTAD DE CIENCIAS<br>ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA<br>ELABORADO POR:<br>Bernal Rivera Jonathan Carlos | TEMA:   |               |               |
|--|--|---|---|---------------|---------------|
| a) Tipos de briquetas<br>b) Muestras trituradas<br>c) Prueba de humedad en la termobalanza | <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar<br><input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar<br><input checked="" type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar |   | “ANÁLISIS TÉCNICO DE BRIQUETAS<br>OBTENIDAS A PARTIR DE RESIDUOS<br>AGROINDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN<br>DE BIOENERGÍA” | <b>LÁMINA</b> | <b>ESCALA</b> |
|  |  |   | 1   | 1:1           | 04/09/2023    |

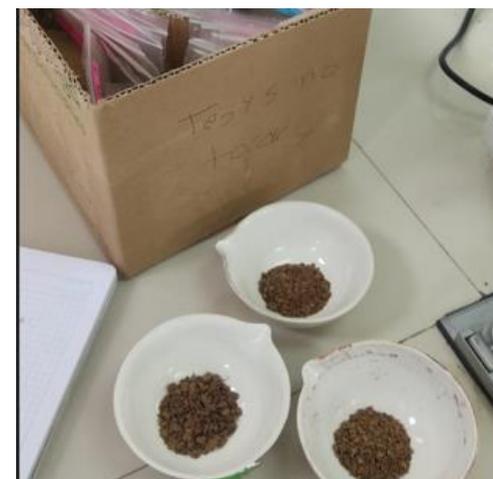
**ANEXO B: PRUEBAS DE CENIZAS Y MATERIAL VOLÁTIL**



d)



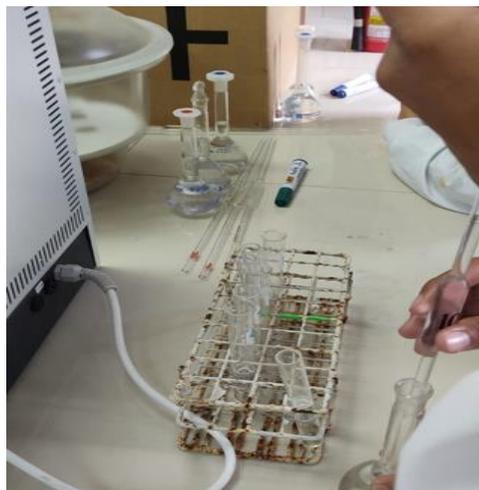
e)



f)

|   |  |   |  |              |  |
|---|--|---|--|--------------|--|
| <b>NOTAS:</b>                                   | <b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:</b>   | <p align="center"> <b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</b><br/> <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b><br/> <b>ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA</b><br/>                 ELABORADO POR:<br/>                 Bernal Rivera Jonathan Carlos             </p> | <b>TEMA:</b>   |              |  |
| d) Crisoles tarados después de estar en la mufa | <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar                  |   | “ANÁLISIS TÉCNICO DE BRIQUETAS OBTENIDAS A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA” |              |  |
| e) Briquetas hechas cenizas                     | <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar              |   |  |              |  |
| f) Preparación de muestras en las cápsulas      | <input checked="" type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar | <b>LÁMINA</b>   | <b>ESCALA</b>  | <b>FECHA</b> |  |
|   |  | 2   | 1:1  | 11/09/2023   |  |

**ANEXO C: PRUEBAS DEL PORCENTAJE DE AZUFRE**



g)



h)



i)

| NOTAS:   | CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:  | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE<br>CHIMBORAZO<br>FACULTAD DE CIENCIAS<br>ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA<br>ELABORADO POR:<br>Bernal Rivera Jonathan Carlos | TEMA:  |               |               |
|--|--|---|--|---------------|---------------|
| g) Soluciones preparadas<br>h) Muestras de briquetas preparadas<br>i) Curva de calibración | <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar<br><input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar<br><input checked="" type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar |   | “ANÁLISIS TÉCNICO DE BRIQUETAS OBTENIDAS A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA” | <b>LÁMINA</b> | <b>ESCALA</b> |
|  |  |   | 3  | 1:1           | 23/09/2023    |

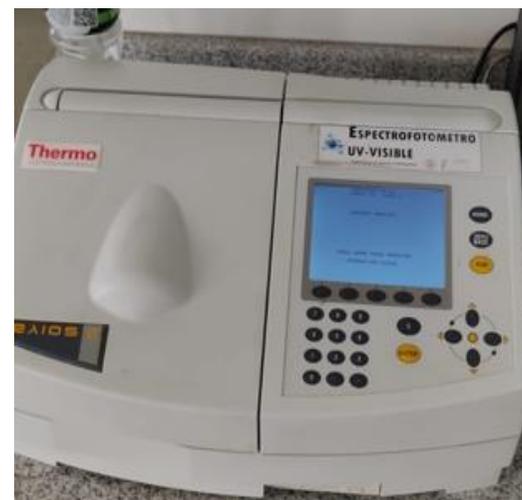
**ANEXO D: EQUIPOS UTILIZADOS**



j)



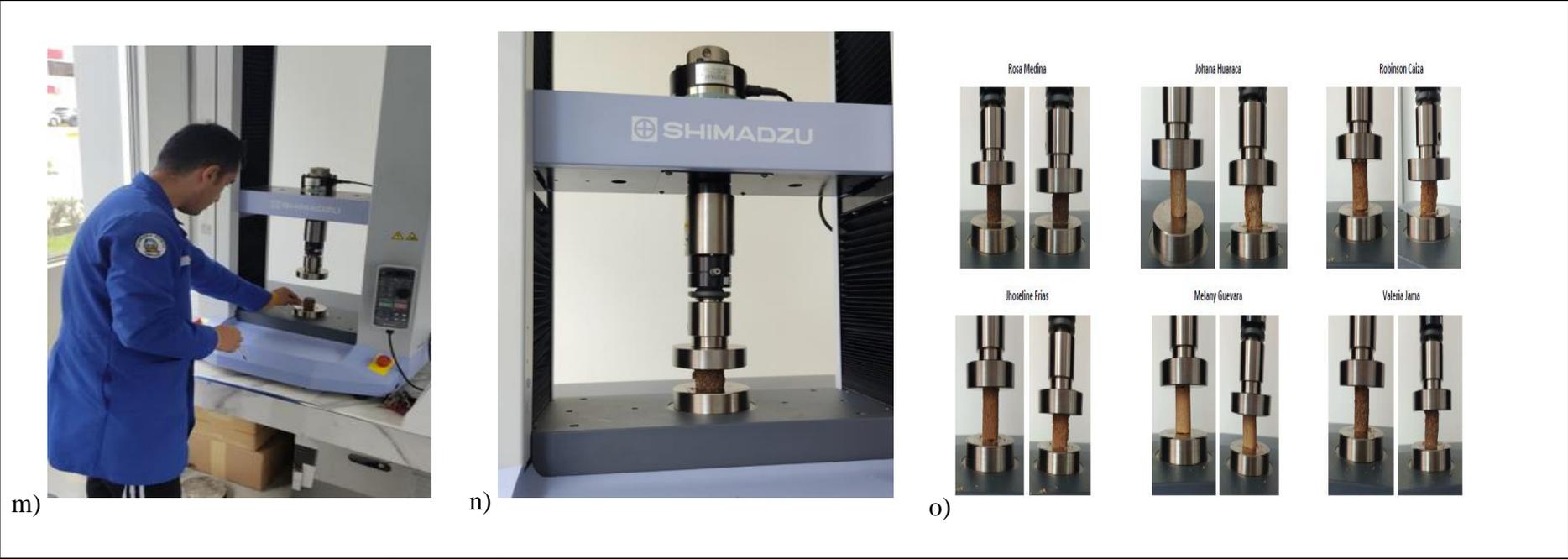
k)



l)

| NOTAS:  | CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:  | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE<br>CHIMBORAZO<br>FACULTAD DE CIENCIAS<br>ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA<br>ELABORADO POR:<br>Bernal Rivera Jonathan Carlos | TEMA:   |               |               |
|---|--|---|---|---------------|---------------|
| j) Equipo de agitación<br>k) Centrífuga<br>l) Espectrofotómetro | <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar<br><input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar<br><input checked="" type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar |   | “ANÁLISIS TÉCNICO DE BRIQUETAS<br>OBTENIDAS A PARTIR DE RESIDUOS<br>AGROINDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN<br>DE BIOENERGÍA” | <b>LÁMINA</b> | <b>ESCALA</b> |
|   |  |   | 4   | 1:1           | 23/10/2023    |

**ANEXO E: PRUEBAS FISICOMECAÑICAS: ENSAYO DE COMPRESI3N**



| <b>NOTAS:</b>                                   | <b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:</b>   | <b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</b><br><b>FACULTAD DE CIENCIAS</b><br><b>ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA</b><br>ELABORADO POR:<br>Bernal Rivera Jonathan Carlos  | <b>TEMA:</b>   |  |        |        |       |   |     |            |
|---|--|--|--|--|--------|--------|-------|---|-----|------------|
| m) Crisoles tarados después de estar en la mufa | <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar                  |  | “ANÁLISIS TÉCNICO DE BRIQUETAS OBTENIDAS A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA” |  |        |        |       |   |     |            |
| n) Briquetas hechas cenizas                     | <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar              |  |  |  |        |        |       |   |     |            |
| o) Preparación de muestras en las cápsulas      | <input checked="" type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar |  |  |  |        |        |       |   |     |            |
|   |  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 33%;">LÁMINA</th> <th style="width: 33%;">ESCALA</th> <th style="width: 33%;">FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">1:1</td> <td style="text-align: center;">10/07/2023</td> </tr> </tbody> </table> |  |  | LÁMINA | ESCALA | FECHA | 5 | 1:1 | 10/07/2023 |
| LÁMINA  | ESCALA   | FECHA  |  |  |        |        |       |   |     |            |
| 5   | 1:1  | 10/07/2023   |  |  |        |        |       |   |     |            |



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA**  
**NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO**

**Fecha de entrega:** 29/ 04 / 2024

|   |
|---|
| <b>INFORMACIÓN DEL AUTOR</b>  |
| Jonathan Carlos Bernal Rivera   |
| <b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>  |
| <b>Facultad:</b> Ciencias   |
| <b>Carrera:</b> Ingeniería Química  |
| <b>Título a optar:</b> Ingeniero Químico  |
| <br><b>Ing. Marlon Ernesto Moscoso Martínez</b><br><b>Director del Trabajo de Integración Curricular</b> |
| <br><b>Ing. Mabel Mariela Parada Rivera</b><br><b>Asesora del Trabajo de Integración Curricular</b>      |