

**Evaluación técnico-económica de la producción de pellets elaborados a partir del residuo de la postcosecha del cacao**

**Narda Julieth Caviedes Buyucué  
Juan Diego Gómez Zárate**

**Trabajo de Grado para Optar Título de Ingeniero Mecánico**

**Director  
Yesid Javier Rueda Ordoñez  
PhD en Ingeniería Química**

**Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Bucaramanga  
2021**

### **Dedicatoria**

*A mi madre Sonia Patricia y hermano Pablo Alejandro, a mi familia y a mis amigos (TMC) que, con su apoyo incondicional me han acompañado tanto en momentos buenos como difíciles, me ayudaron a levantar y aprender de cada experiencia, permitiéndome llegar a ser la persona que soy ahora.*

*Juan Diego Gómez Zárate.*

### **Dedicatoria**

*A Jesús Antonio Caviedes y Martha Cecilia Buyucué, mis papás, que siempre me apoyaron y alentaron durante el proceso académico y personal. Y, a mi partido (PCC), porque al servicio de él está y estarán mis conocimientos.*

*Narda Julieth Caviedes Buyucué.*

### **Agradecimientos**

Mis profundos agradecimientos, especialmente a mi madre y mi hermano que, han sido ese apoyo incondicional en cada instante de la vida, que me han enseñado y me han permitido enseñar tras cada experiencia y momento vivido; a mi perro Thor por ser ese amor y ternura reconfortante en los momentos de no refugio.

Agradezco también a mi amiga y compañera Julieth por su apoyo inconmensurable tanto durante la carrera como durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Inmensa gratitud con mi director de proyecto y con los docentes que me acompañaron a lo largo de mis estudios universitarios, brindándome todo el conocimiento que se pudiera transmitir, no solo de academia, sino también de la vida real.

Juan Diego Gómez Zárate.

### **Agradecimientos**

Valoro profundamente el esfuerzo que hicieron mis padres con su paciencia y acompañamiento a todo el proceso de la vida universitaria en otra ciudad y ante las diferentes dificultades que se presentaron.

Agradezco también, a la persona que me guio y ayudó a elegir mi carrera, porque se esforzó por guiarme y ayudarme además a entrar a la universidad; a mi director de proyecto por su acompañamiento académico y pedagógico.

Reconozco la importancia e incidencia que la Juventud Comunista, mi partido, que también me forma y cualifica a diario.

Gracias infinitas a los amigos que me apoyaron y motivaron siempre durante la carrera y el proyecto; sobre todo a Juan Diego que, además, fue mi compañero de proyecto y siempre estuvo presto a trabajar de manera conjunta, responsable y amena.

Narda Julieth Caviedes Buyucué.

## Tabla de contenido

|  |    |
|--|----|
| Introducción   | 13 |
| 1. Planteamiento de la Investigación                         | 15 |
| 1.1 Planteamiento del Problema                               | 15 |
| 1.2 Objetivos de la Investigación                            | 15 |
| 1.2.1 <i>Objetivo General</i>                                | 15 |
| 1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>                           | 16 |
| 1.3 Justificación de la Investigación                        | 16 |
| 2. Marco Teórico   | 18 |
| 2.1 Antecedentes   | 18 |
| 2.1.1 <i>Antecedentes Internacionales</i>                    | 18 |
| 2.1.2 <i>Antecedentes Nacionales</i>                         | 21 |
| 2.1.3 <i>Antecedentes Regionales</i>                         | 23 |
| 2.2 Bases Teóricas   | 24 |
| 2.2.1 <i>Pellets</i>   | 24 |
| 2.2.2 <i>Uso de los Pellets</i>                              | 26 |
| 2.2.3 <i>Tipos de Pellets</i>                                | 26 |
| 2.2.4 <i>Formas de suministro de Pellets</i>                 | 27 |
| 2.2.5 <i>Cacao</i>   | 29 |
| 2.2.6 <i>Cascara de cacao</i>                                | 29 |
| 2.2.7 <i>Composición de la cascara del cacao</i>             | 30 |
| 2.2.8 <i>Carbón vegetal (FAO, 2014)</i>                      | 30 |
| 2.2.9 <i>Análisis Técnico Económico (Computadoras, 2017)</i> | 31 |
| 3. Diseño Metodológico                                       | 33 |
| 4. Resultados  | 38 |
| 5. Discusión   | 57 |
| 6. Conclusiones  | 62 |
| 7. Recomendaciones   | 63 |
| Referencias Bibliográficas                                   | 64 |

Apéndices

### Lista de tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> <i>Composición de los tipos de pellets según la Norma Europea</i>  | 27 |
| <b>Tabla 2.</b> <i>Características fisicoquímicas de la cáscara de cacao del material CCN (Colección Castro Naranjal)</i>  | 30 |
| <b>Tabla 3.</b> <i>Tabla de absorción de humedad correspondiente a cada una de las muestras según su aglomerante y su respectiva proporción</i>  | 40 |
| <b>Tabla 4.</b> <i>Tabla de humedad contenida en los pellets</i>   | 42 |
| <b>Tabla 5.</b> <i>Tabla de pérdida de masa de los pellets luego de la prueba de impacto</i>   | 43 |
| <b>Tabla 6.</b> <i>Tabla de valores calificativos en cuanto a estética</i>   | 44 |
| <b>Tabla 7.</b> <i>Matriz QFD para selección del mejor pellet</i>  | 45 |
| <b>Tabla 8.</b> <i>Tabla de pérdidas de humedad en los pellets antes de escoger el más apto.</i>   | 46 |
| <b>Tabla 9.</b> <i>Tabla de pérdidas de masa correspondiente al material volátil de los Pellets sin torrefactar</i>  | 46 |
| <b>Tabla 10.</b> <i>Tabla de valores correspondientes a la masa de la ceniza de los pellets sin torrefactar</i>  | 47 |
| <b>Tabla 11.</b> <i>Tabla de variaciones de masa antes y después de la torrefacción de cada una de las diferentes muestras</i>   | 48 |
| <b>Tabla 12.</b> <i>Tabla de pérdidas de humedad en la biomasa torrefactada</i>  | 49 |
| <b>Tabla 13.</b> <i>Tabla de pérdidas de masa correspondiente al material volátil de los Pellets torrefactados</i>   | 50 |
| <b>Tabla 14.</b> <i>Tabla de valores correspondientes a la masa de la ceniza de los pellets torrefactados</i>  | 50 |
| <b>Tabla 15.</b> <i>Tabla correspondiente a la determinación de los poderes caloríficos (PCS; PCI)</i>   | 51 |
| <b>Tabla 16.</b> <i>Límites máximos de emisión permisibles para vehículos accionados con gasolina y convertidos a gas natural vehicular o GLP en velocidad de crucero y en condición de marcha mínima, ralentí o prueba estática</i>   | 52 |
| <b>Tabla 17.</b> <i>Estimación de costos de transporte, manejo de materia prima y preparación para distribución</i>  | 53 |
| <b>Tabla 18.</b> <i>Propiedades físicas y químicas determinadas en tres secciones del fuste y en ramas de E. camaldulensis, tanto en muestras de la madera como carbón.</i>  | 55 |
| <b>Tabla 19.</b> <i>Propiedades físicas y químicas determinadas en tres secciones del fuste y en ramas de E. camaldulensis, en muestras de carbón y en pellets a partir de biomasa de la postcosecha del cacao con 10% de adición en masa de aglomerante de almidón de yuca.</i> | 56 |

**Lista de figuras**

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> <i>Pellets</i>   | 25 |
| <b>Figura 2.</b> <i>Saco de 15 kg de Pellets</i>  | 28 |
| <b>Figura 3.</b> <i>Saco de 100 kg de Pellets</i>   | 28 |
| <b>Figura 4.</b> <i>Camión cisterna de Pellets</i>  | 29 |
| <b>Figura 5.</b> <i>Comparación de absorción de humedad entre los tres tipos de pellets</i>   | 41 |
| <b>Figura 6.</b> <i>Segmentación del fuste de los árboles de Eucalyptus camaldulensis en los segmentos fuste bajo (FB), fuste medio (FM), fuste superior (FS) y Ramas (RA).</i> | 54 |

### Lista de Apéndices

|   |    |
|---|----|
| <b>Apéndice A.</b> Evidencia fotográfica trituración de materia prima   | 67 |
| <b>Apéndice B.</b> Descripción detallados del procedimiento que se llevó a cabo para determinar el porcentaje de humedad estandarizado para la investigación. | 69 |
| <b>Apéndice C.</b> Evidencia fotográfica sobre determinación del porcentaje de agua a utilizar (sin aglomerante).   | 76 |
| <b>Apéndice D.</b> Tabla fotográfica de pellets de cada mezcla, clasificados según el porcentaje de aglomerante   | 78 |
| <b>Apéndice E.</b> Evidencia fotográfica de prueba de resistencia al impacto  | 80 |
| <b>Apéndice F.</b> Evidencia fotográfica de los pellets torrefactados   | 82 |
| <b>Apéndice G.</b> Evidencia fotográfica de los pellets tras pruebas de secado, de pérdida de material volátil y de ceniza                                    | 82 |
| <b>Apéndice H.</b> Conversión de datos de pérdida de masa (prueba de impacto) a valores entre 1 y 5 para establecer la calificación                           | 84 |

## Resumen

**Título:** Evaluación técnico-económica de la producción de pellets elaborados a partir del residuo de la postcosecha del cacao\*

**Autores:** Juan D. Gómez y Narda J. Caviedes\*\*

**Palabras Claves:** Carbón vegetal, biomasa, eucalipto, pellets, postcosecha del cacao, carbón vegetal

### Descripción

La producción de carbón vegetal representa una problemática ambiental si se tiene en cuenta que esta forma de biomasa proviene, en su mayoría, de plantaciones de eucalipto, la cual se ha evidenciado que es una especie invasora e infertilizante que trae consigo consecuencias para los ecosistemas cuando se planta en terrenos donde no es nativa. Lo anterior mencionado es razón por la cual, este proyecto pretende realizar el análisis técnico, económico y ambiental de pellets a partir de biomasa de la postcosecha del cacao (que se conoce en la práctica como cáscara de cacao o cacota) para determinar la viabilidad de reemplazar, con esta, el carbón vegetal. De manera que, mediante el estudio de la mezcla de esta biomasa tanto solo con agua como con esta y un agente aglomerante para determinar las proporciones adecuadas para una consistencia óptima y así producir los pellets. Con el objetivo de que a estos se les pueda estimar el poder calorífico, como principal factor, y demás propiedades mecánicas y fisicoquímicas; las cuales al ser comparadas con las propiedades del carbón vegetal develaron una deficiencia bastante considerable para su uso como agente combustible, con un valor de aproximadamente 15,77 MJ/Kg contra 24,24MJ/Kg del carbón vegetal.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director PhD. Yesid Javier Rueda Ordoñez

## Abstract

**Title:** Technical-economic evaluation of the production of pellets made from the postharvest residue of cocoa\*

**Authors:** Juan D. Gómez and Narda J. Caviedes\*\*

**Key Words:** Charcoal, biomass, eucalyptus, pellets, cocoa postharvest, charcoal

### Description

The production of charcoal represents an environmental problem if it is taken into account that this form of biomass comes mostly from eucalyptus plantations, which has been shown to be an invasive and infertilizing species that has consequences for ecosystems when planted in lands where it is not native. The aforementioned is the reason why this project aims to perform the technical, economic and environmental analysis of pellets from post-harvest cocoa biomass (known in practice as cocoa husk or cocoa pod) to determine the feasibility of replacing charcoal with it. So, by studying the mixture of this biomass with water alone or with water and a binding agent to determine the appropriate proportions for optimum consistency and thus produce pellets. With the objective of estimating the calorific value, as the main factor, and other mechanical and physicochemical properties, which when compared with the properties of charcoal revealed a considerable deficiency for its use as a fuel agent, with a value of approximately 15.77 MJ/Kg against 24.24 MJ/Kg of charcoal.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director PhD. Yesid Javier Rueda Ordoñez

## Introducción

A nivel mundial, Colombia tiene el tercer lugar de especies de animales vivas que habitan en ella, y, tiene el primer lugar en diversidad en especies encontradas por hectárea cuadrada. Más del 20% de las especies de aves del mundo se encuentran en Colombia, lo que representa la mayor cantidad en cualquier país (Colombia-Co, 2019). Situación que se ve afectada en gran medida por los vastos monocultivos de la industria maderera y más específicamente por los de eucalipto que son aproximadamente 16.000 hectáreas con miras a duplicarse.

Teniendo en cuenta que uno de los principales objetivos de la madera extraída de dichas plantaciones recurre en la producción de carbón vegetal, para el cual se requieren al menos 5 toneladas de madera para producir, apenas, 1 ton de esta biomasa (FAO, 2014) y, que según el Instituto Alexander Von Humboldt (2016), los monocultivos causan efectos nocivos como la alteración del ciclo hidrológico en los territorios, la transformación de la abundancia y composición de especies de fauna y flora, la erosión de la tierra, la modificación de la estructura y composición de los suelos; con lo cual, se entiende que la producción masiva de árboles de eucalipto es necesaria para los fines que busca la industria y que, siendo una de las especies forestales más cultivadas en varios departamentos tales como Cauca, Valle del Cauca, Caldas, Risaralda y Antioquia se convierte en un gran atentado contra la fauna y flora nacional.

Resaltando también, que no solamente la flora y fauna resultan afectadas por monocultivos como éste, pues en el marco del llamado “capitalismo verde” se afectan poblaciones y comunidades por problemas tales como: desplazamientos forzados; conflictos sobre la propiedad de los terrenos entre entes empresariales y pobladores; daños a las culturas indígenas y tradicionales; y la pérdida del sustento de la población nativa. Problemas que, son apenas algunos de los más relevantes en las regiones y cuyos rastros se evidencian tras proyectos como el Plan Colombia que, en 2001, se desarrolló en los departamentos de Cundinamarca, Santander, Caquetá, La Guajira, Casanare, Bolívar y Nariño; marcado como uno de los más relevantes en la historia de los monocultivos colombiana (Ospina et al, 2006).

Además, el país es uno de los mayores productores de cacao en el mundo con un índice de 63.416 toneladas producidas solo en 2020 (Organización Internacional de Cacao, 2020), ubicando a Colombia en el décimo lugar a nivel mundial y en el quinto en América Latina, a lo cual, el departamento de Santander aporta cerca del 49% de la producción total de estos cultivos en el país (Federación Nacional de Cacaoteros, 2020).

Es de pleno conocimiento que existen formas de biomasa que en sí no tienen mayor afectación sobre el ambiente, sin embargo, la producción de estas sí llega a ser bastante nociva. Un claro caso de esto es la producción del carbón vegetal, pues para ello se parte del eucalipto como principal materia prima.

Ahora bien, al evidenciar una gran producción de cacao en el país, se hace plausible la consideración de entrar en el estudio los productos de la postcosecha de la mencionada materia prima, de la que se puede obtener la comúnmente denominada “mazorca” del cacao; lo cual tendría incidencia en la disminución y erradicación de dichos monocultivos de eucalipto destinados a la producción de carbón vegetal de tal manera que se supla el producto por pellets obtenidos de la materia prima para que cumplan con la misma función.

Con el objetivo de llevar a cabo la elaboración y estudio de diferentes pellets a partir de la biomasa en cuestión y con unos tipos y porcentajes de aglomerantes diferentes, se estima que podrían tener un poder calorífico y una eficiencia tanto iguales como probablemente superiores a las del carbón vegetal.

De manera que sería más rentable y beneficioso (en términos técnico-económicos), tanto para la industria santandereana al crear un producto que no se comercializa en Colombia, como para el medio ambiente y el país.

## **1. Planteamiento de la Investigación**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

Uno de los casos más claros de monocultivos en el país es el de eucalipto, pues son especies que tienen hojas más pequeñas, lo cual implica que ocupan una mayor superficie, tanto para la evapotranspiración como para la fotosíntesis (EUMED, 2017). Es decir, al tiempo que pierden gran cantidad de agua, requieren más agua para llevar a cabo sus procesos de fotosíntesis. En adición, las copas de los árboles de estos bosques son lo suficientemente pequeñas como para dejar pasar más cantidades de agua lluvia, generando un mayor desperdicio del líquido y desprotegiendo el suelo de las afluencias, viento y erosión (Infertilización). Lo anterior sin dejar de tener en cuenta que, para poder sostener unas buenas plantaciones de estos bosques, se utilizan fungicidas e insecticidas en grandes proporciones, con el fin de evitar que se pudra la madera, contaminando las aguas y los suelos; por lo tanto, y, debido a la rápida deforestación de dichas plantaciones, no se logra desarrollar un ecosistema sostenible. De manera que, desde diferentes puntos de vista, los cultivos de estos bosques exóticos representan un peligro para las diferentes especies y ecosistemas de las regiones donde se ubiquen.

Basados en ésta problemática ambiental y social que generan los monocultivos, la producción y consumo de carbón vegetal, se ha pensado en una alternativa en lo que concierne al uso de la madera destinada a la producción de carbón vegetal (obtenido de las plantaciones de eucalipto), y aprovechando el potencial del departamento de Santander en el sector cacaotero, pues representa el 38% de la cosecha nacional de cacao y, según el gerente técnico de la Federación Nacional de Cacaoteros, sigue siendo el mayor productor en Colombia (Contexto Ganadero, 2019).

Con base en el problema anterior, ¿es viable sustituir el carbón vegetal de eucalipto por carbón vegetal derivado de residuos agrícolas?

### **1.2 Objetivos de la Investigación**

#### ***1.2.1 Objetivo General***

Analizar la viabilidad técnico-económica de la producción y el desempeño de pellets elaborados a partir del residuo de la postcosecha de cacao, proveniente de San Vicente de Chucurí, con el propósito de reemplazar el carbón vegetal de eucalipto (comercial).

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

- Determinar el porcentaje de humedad y de agente aglomerante requeridos para la fabricación de los pellets.
- Seleccionar el pellet que brinde las mejores condiciones energéticas y de resistencia mecánica a partir del estudio de las propiedades mecánicas (durabilidad mecánica, dureza) y fisicoquímicas (humedad, densidad aparente, análisis de compuestos, poder calorífico).
- Evaluar técnica, económica y ambientalmente los procesos obtención y producción de los pellets para una adecuada selección de los equipos.
- Comparar el desempeño energético de los pellets elaborados a partir del residuo de la postcosecha de cacao con el carbón comercial proveniente del eucalipto en términos de costos de energía por unidad de masa.

### **1.3 Justificación de la Investigación**

Mediante el presente proyecto de investigación se busca generar aportes a la ingeniería mecánica, en los análisis físicos asociados al aprovechamiento de nuevas materias primas presentes en la región que hasta la fecha han sido tenidas sólo como residuos de la postcosecha de cacao, en aras de cuantificar sus propiedades termodinámicas como poder calorífico y el resultado de la evaluación de la combustión, sin dejar de lado el análisis técnico de los procesos de manufactura para la obtención de pellets con los estándares de calidad necesarios para su producción y uso a nivel industrial a modo de combustible sólido capaz de reemplazar al carbón vegetal, derivado del eucalipto, en las prácticas industriales que actualmente se llevan a cabo con este.

En cuanto a un impacto socioeconómico, se pretende que al darle un uso a lo que sería biomasa proveniente de residuos, sea mucho más barata la adquisición de esta para producir el biocombustible contra lo que sería el costo del eucalipto para producir carbón, beneficiando entonces al agricultor generando un ingreso extra por una materia a la que en la gran mayoría de casos no se le da ningún provecho. De igual manera, teniendo en cuenta que el gasto energético para la producción del biocombustible es considerablemente menor que el del carbón vegetal.

De la misma manera, en un ámbito bioético, es claro que el desarrollo de este proyecto tendría un impacto a simple vista “negativo” sobre quienes dedican su vida laboral al cultivo de eucalipto y producción de carbón vegetal pues se verían amenazados por una nueva propuesta, alterna a la biomasa tradicional. Sin embargo, lejos de ser de esa manera y en aras de tener una cierta alternativa al daño producido por los monocultivos como el del eucalipto, dicho impacto podría realmente significar una oportunidad para una

evolución en estas industrias en pro de salvaguardar el cuidado tanto de los ecosistemas, que ya están como los que en el futuro estarían afectados por las ya nombradas prácticas, como de las comunidades que también han sido víctimas de estas.

Es por lo anterior que se considera que el desarrollo de este proyecto de investigación podría tener efectos positivos tanto en el área de la ingeniería mecánica, como en los ambientales y socioeconómicos partiendo del solo hecho de plantear un uso para los residuos de la postcosecha de cacao, inicialmente en Santander, pero sin dejar de lado las demás regiones del país donde se sabe que las comunidades viven principalmente de aquellos recursos.

## **2. Marco Teórico**

Tanto en diferentes partes de la región y del país, como en otros lugares del mundo se han desarrollado distintos estudios sobre la producción, implementación y caracterización de pellets analizando sus diferentes efectos, ventajas y desventajas con respecto a otros combustibles y biomásas existentes en la industria y en el mercado. Con lo cual, este proyecto toma como puntos de referencia los antecedentes mencionados en el estado del arte. Sin dejar de lado la contextualización del lector en los referentes teóricos con respecto a la explicación de qué son los pellets y la biomasa en cuestión de este proyecto.

### **2.1 Antecedentes**

#### ***2.1.1 Antecedentes Internacionales***

De acuerdo con la tesis doctoral de la Universidad de Brasilia (Marie Queno, 2015) enfocada en la “producción de pellets de madera en Brasil: estrategia, costo y riesgo de inversión”, cuyo objetivo general consistió en identificar los principales obstáculos que aún no han permitido que Brasil tome un papel importante en el mercado internacional de pellets y para el cual su respectivo estudio se llevó a cabo describiendo la situación estratégica de las empresas brasileñas productoras frente al mercado internacional trayendo informaciones sobre las dificultades en producir y comercializar pellets en el contexto brasileño; investigando el costo general de pellets en Brasil, a fin de determinar las condiciones económicas necesarias para viabilizar una cadena productiva enfocada al comercio internacional; y evaluando el riesgo financiero de un emprendimiento de producción de pellets en Brasil mediante la simulación de Monte Carlo.

Se encontró que en ese país la industria de pellets es reciente y en expansión por el hecho de nuevas unidades de producción, cuyo motor principal es la convicción de competitividad en el mercado de energía en Brasil. Se observó que la calidad de producción de estos productos se rige de acuerdo al estándar internacional, por lo que si las empresas no están presentes en el mercado externo es por el hecho del “costo de Brasil” que por la falta de posibilidades de exportación. Se observó que allá la materia prima a base de madera de pino ofrece varias ventajas en el proceso de producción, especialmente a partir de la viruta que es un residuo seco de la industria maderera, por lo tanto, la dificultad de la industria para controlar los costos en una coyuntura inflacionaria lleva a las empresas a privilegiar el mercado de exportación que está, en el momento, extremadamente favorable por causa del cambio. En conclusión, la industria de pellets debe verse privilegiada en cuanto a que la producción de estos proporciona una de las fuentes de energía más sustentables.

Por lo tanto, con base en el estudio anterior, se aprecian ciertos factores que como aporte al anteproyecto propuesto generan una noción de la visión de la industria en ese país sobre la producción de los pellets de biomasa y lo competitivos que estos pudieran ser, por lo menos hace 5 años, cuya relevancia se destaca en que es una gran ventaja la que nos llevan economías como la de Brasil y solamente teniendo en cuenta ese aspecto, lo que permite dimensionar la importancia de empezar a competir con formas de energía sustentable como la estudiada y el estado actual en el que un mercado así debe encontrarse en la actualidad.

Según un estudio de la Università degli Studi di Padova (Santi, 2013), cuyo tema se centró en el “análisis de la calidad del pellet producido de la madera de usos forestales” y cuyo objetivo general se enfocó en estudiar la factibilidad técnica de una cadena de producción de pellets basada en el surtido de residuos forestales. El cual se llevó a cabo mediante la evaluación de las características de las astillas de madera obtenidas a partir de surtidos de bosques de baja calidad y determinar si es técnicamente factible producir pellets de calidad a partir de materia prima como plantas todavía con corteza o sus ramas, donde para tal efecto han sido empleados los procedimientos y clasificaciones previstos de la norma europea implementados por el Ente Nacional de Unificación (UNI EN) en materia de biocombustibles.

Se encontró que los pellets obtenidos podían clasificarse en diferentes categorías, con base en la norma europea UNI EN 14961-2:2011, de acuerdo con la calidad de los mismos. Donde el mejor era el producido de madera procesada (descortezada), seguido de los elaborados con madera con corteza y luego aquellos que fueron hechos con madera sin ningún tipo de modificación. Tal que es posible concluir entre otras cosas que, de acuerdo a las tres clasificaciones, todos pueden ser dispuestos en mercados diferentes, pero posiblemente condicionando un mejoramiento de los pellets de menor calidad ejerciendo un control sobre las cenizas que estos poseen. Sin embargo, también se observó que hace falta una clasificación un más precisa del pellet en cuanto a la fusibilidad de las cenizas que determinan la cantidad de microelementos como azufre, nitrógeno y cloro que serían responsables de emisiones nocivas producidas durante la combustión. Si los requisitos de calidad dictados por la autoridad pertinente fueran plenamente respetados, podría existir la posibilidad concreta de proporcionar un valor adicional más alto y un interés renovado en surtidos de baja calidad, realizándose como recurso de materia prima en la cadena de producción del pellet.

De acuerdo con lo anterior, los aportes de este estudio al anteproyecto propuesto se aprecian en cuanto a los estándares de calidad que pueden obtener los pellets finalizado su respectivo proceso de producción, pues bien es cierto que no basta con hacer la forma cilindrada que los caracteriza, sino someterlos a un proceso térmico donde podría estar produciéndose ceniza o una serie de cambios en la estructura molecular del mismo que termine siendo responsable de emisiones no deseadas al ambiente. A

pesar de ser un estudio realizado hacia la fecha mencionada, es uno de los más asociados a lo que se desea lograr con esta propuesta en materia de análisis de calidad de pellets.

Según una tesis de grado en ingeniería mecánica con rama industrial en la universidad de Extremadura (Cancho Franco, 2015), la cual consiste en el “estudio de los parámetros de peletizado de residuos biomásicos en peletizadora semiindustrial” y cuyo objetivo principal se basa en determinar cómo afectan las variables del proceso de peletizado, susceptibles de control, a las características mecánicas de los densificados y de su ajuste a la normativa vigente. Para tal objetivo se estudió cómo afecta la cantidad de residuo introducido, por segundo, a la longitud de los pellets y se determinó la proporción en que afecta la humedad a las propiedades mecánicas de este tales como densidad aparente, durabilidad y resistencia mecánica.

Se encontró que un caudal de alimentación pequeño no permite la peletización, lo que básicamente incide en la longitud de estos elementos; si se tiene un caudal de humectación, este afecta en el aumento de la humedad de los pellets, cambiando su densidad aparente y generando variaciones en la longitud y resistencia a la compresión; regulando la presión de los rodillos se observó que existen variaciones en la humedad (si existe caudal de humectación) y en cuanto a la densidad, si se ponen los rodillos a una presión mayor, se van a generar valores inferiores de esta.

De modo que, del estudio anterior, los resultados que se obtuvieron son de gran aporte para el anteproyecto propuesto dado que, uno de los principales objetos de estudio consiste en la determinación del pellet más óptimo mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas, tales como su humedad y densidad aparente además de su resistencia a la compresión. Aun sabiendo que la biomasa es el fruto de la postcosecha del cacao, esta también debe pasar por un proceso de secado, peletización y humectación y así saber cuál es el que debería someterse a procesos térmicos con el fin de determinar su respectivo poder calorífico.

La tesis doctoral de la Universidad Autónoma de Barcelona (Hernández Espinoza, 2019), que concierne al Estudio de los procesos de almacenaje, secado y peletización de desechos del procesado de la oliva para su reutilización como bio-combustible de uso industrial y domiciliario de Marzo del 2019, basó su propósito de fue estudiar en el tiempo los cambios en las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, además de las emisiones odorantes que se generaron en el almacén y secado del alperujo y orujo, dado que una vez secos estos desechos puedan ser reutilizados como biomasa para la fabricación de pellets para uso domiciliario o industrial, al ser mezclados con desechos de la industria forestal; el cual se llevó a cabo mediante el análisis y evaluación de las características fisicoquímicas, microbiológicas, generación de COVs y ambientales antes, durante y después del proceso de peletización para así caracterizar y cuantificar

los diferentes tipos de pellets producidos y así determinar el comportamiento de los mismos respecto a la producción tradicional de pellets.

Por lo anterior, se dio a conocer la forma de almacenaje de los desechos de alperujo y orujo la cual depende del periodo de tiempo a la intemperie, temperatura, humedad (época del año); así como también se demostró que, en los desechos existe crecimiento de hongos y bacterias en el tiempo, lo que puede ser objeto de estudio hacia otras investigaciones en demostrar si estos microorganismos generan daños a otras especies.

Otro dato interesante de destacar fue que uno de los parámetros que no cambia en el tiempo es el poder calorífico, lo que significa que energéticamente se mantiene estable y puede ser utilizado como biomasa. Así mismo, cabe agregar que los residuos de aceite de oliva son desechos de un proceso industrial, pero no por ello se deben despreciar, pues aún poseen un valor potencial, sólo que deben ser llevados a cabo los procesos y seguimientos adecuados.

### ***2.1.2 Antecedentes Nacionales***

El objetivo de esta investigación realizado en la Universidad Distrital (González Hassig, 2015) se centró en comparar el desempeño energético y ambiental de dos combustibles sólidos de biomasa elaborados a partir de desechos de la producción de muebles, aglomerados, aserrín y residuos de podas de césped, arbustos y árboles respectivamente. A dichas biomásas se le aplicó un pretratamiento con una chipeadora, un molino de martillos y finalmente una peletizadora, posteriormente se evaluaron sus propiedades fisicoquímicas (composición, dureza y propiedades termodinámicas). A si mismo se evaluaron los posibles costos de producción de ambas biomásas y finalmente se probaron en hornos para la cocción de ladrillos mezclando carbón y biomasa en una proporción de 80% y 20% respectivamente, para evaluar la efectividad de estos materiales en una producción real de la planta, obteniendo resultados satisfactorios para los parámetros de operación, siendo el aserrín el material más apropiado para el estudio, al presentar las mejores características y menores costos de manufactura.

Sin embargo, el uso de estos biomateriales registró un incremento en la formación de óxidos de nitrógeno, pero que para el caso de Colombia son niveles que se encuentran por debajo del nivel máximo permitido (resolución 909 de 2008), también cabe destacar que, a pesar de necesitar más combustible para mantener los niveles de operación, los costos siguen manteniéndose muy cercanos a los del uso exclusivo de carbón y que las emisiones de estos son menores.

Los pellets obtenidos en este trabajo de investigación se compararon con dos normas internacionales (DIN 51731 y CI R04/05) cumpliendo con algunos parámetros como las dimensiones, pero incumpliendo algunos como el contenido de cenizas y el porcentaje de N o el porcentaje de durabilidad.

En este proyecto de grado elaborado en la Universidad Nacional (Vargas Lazo, 2018) se pretendió estudiar el proceso de peletización de la borra de café para la producción de biocombustibles sólidos, tomando 3 muestras de diferentes tiendas de café (Juan Valdez ®, Starbucks ® y Oma ®) cada una de las borras recolectadas en estos establecimientos fue sometida a diferentes pruebas con el fin de obtener la materia prima que más se acerque a la de los parámetros establecidos por la normatividad austriaca, alemana y estadounidense (humedad, cenizas y poder calorífico), para la caracterización de las biomásas se realizó el análisis próximo (norma ASM D-482), el análisis último y el tamaño de partícula (empleando equipos disponibles en el campus de la UN). Debido a que la biomasa presentaba un gran contenido de humedad esta se sometió a un protocolo de secado. Dando como resultado que la borra de la tienda Oma ®, sea la más apropiada para el propósito del proyecto presentando el mayor poder calorífico superior y un contenido de cenizas relativamente pequeño. Posterior a estos estudios también se quiso implementar el uso de aglomerantes disponibles en el panorama nacional, como lo son el biodiesel (soja), la glicerina y el aceite de palma, para aprovechar de manera transversal estos elementos, se procede a realizar un diseño experimental para probar los diferentes parámetros a evaluar como lo son el tipo de aglomerante, la concentración del aglomerante y el porcentaje de humedad, estos parámetros también influyeron a la hora de realizar los pellets, presentando variaciones significativas en la presión de extrusión de los mismos.

Finalmente evaluando las características de los pellets fabricados se tomaron los que presentaban las mejores características de cada uno de los aglomerantes y se comparó con las tres normas internacionales NORM M7135 (Austria), DIN 51731 (Alemania) y ASTM (Estados Unidos); en los tres casos coincidió que el porcentaje de aglomerante y el porcentaje de humedad más óptimo fue del 2 y 4 por ciento respectivamente, es de resaltar que los tres casos cumplen con las características pedidas por las tres normas demostrando que la borra de café posee un gran potencial como biomasa para combustible sólido, sin embargo al final se dan algunas recomendaciones para el procedimiento, como un método energéticamente más efectivo para el secado de la biomasa, el sistema de almacenamiento que le impida a los pellets absorber humedad, mejorar las técnicas de extracción de los pellets y ampliar el estudio de aglomerantes que puedan mejorar las características del combustible.

Este trabajo de investigación desarrollado en la Universidad del Valle (Romo Ortega et al, 2011) se centró en la evaluación técnico-económica de la utilización de biomasa procedente de los tallos de café como fuente de combustible sólido. El principal problema que presenta este material es que después de la “soca” estos tallos de cafeto son abandonados en laderas formando pilas de varias toneladas, que solo

generan contaminación, los análisis físicos y termogravimétricos se llevaron a cabo en el laboratorio de combustión y combustibles de la universidad de valle en Cali (Colombia), las muestras se tomaron de zonas rurales del departamento del valle del cauca seleccionando muestras aleatorias de las plantas de café en un área de aproximadamente 60 metros cuadrados.

Basados en las normas ASTM se establecieron la humedad, el análisis aproximado, el análisis elemental, la determinación del poder calorífico y la prueba termogravimétrica, además se realizó un análisis económico a escala para máquinas con una capacidad de toneladas por hora, las muestras anteriormente mencionadas se clasificaron por su tiempo de extracción 3 días, 1 mes y 9 meses, de allí se determina que después del primer mes la madera alcanza un porcentaje de humedad óptimo para el proceso que es alrededor del 10% según la norma.

Se procedió a trabajar en una planta piloto ubicada en Cartago valle del cauca, por su cercanía a varias fincas cafeteras, los resultados arrojaron, que comparado con el carbón comercial estos pellets poseen menor poder calorífico, pero su elaboración resulta más económica, por lo que para compensar el menor poder calorífico se emplea más biomasa, pero a menor costo representando en ahorro significativo para empresas que trabajen con el carbón como fuente principal de combustible. También se comparó con otro producto muy utilizado para la región como lo es el bagazo de la caña de azúcar en la industria azucarera, pero por la abundancia y bajo costo de esta materia prima, no es factible como sustituto los pellets a base de cafeto, sin embargo, podría ser una opción viable en temporadas de escasez del bagazo de caña.

### ***2.1.3 Antecedentes Regionales***

El proyecto de grado de la Universidad Industrial de Santander (Bernal Condia, 2013) consiste en realizar un plan de negocios para la creación de una empresa dedicada a la producción y comercialización de pellets y briquetas de aserrín se propuso realizar una investigación de mercados teniendo en cuenta la necesidad de caracterizar el mercado potencial de briquetas y pellets de aserrín en los municipios de Sogamoso, Duitama, Tunja y la ciudad de Bogotá haciendo uso de fuentes primarias de información. Para lo cual se diseñó en detalle las características técnicas, se evaluó el impacto social y ambiental a la hora de producir pellets y briquetas, para así construir un plan a partir de la matriz DOFA y posteriormente estructuras y elaborar el prototipo.

Con esto, se llegó a que la fabricación de pellets y briquetas a partir de aserrín se proyecta como una importante fuente energética y además contribuye positivamente al cuidado del medio ambiente y desarrollos sostenibles de las diferentes regiones. Dados dichos resultados, y del análisis financiero, se destaca el atractivo del proyecto, ya que bajo las condiciones establecidas cuenta con una amplia demanda,

con la cual se puede lograr excelentes utilidades y ser un proyecto de inversión atractivo para los inversionistas

De acuerdo con la tesis de maestría de la Universidad de Santander (Patiño Martínez, 2014) sobre “Biomasa: Estudio de factibilidad para implementar un sistema de generación de energía a partir de residuos vegetales” cuyo objetivo es realizar un estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de generación de energía auxiliar a partir de fuentes renovables, mediante la selección de una tecnología de conversión de biomasa residual, con el fin de cubrir la demanda energética para un edificio educativo del campus Lagos del Cacique de la Universidad de Santander UDES sede Bucaramanga; dicho proyecto se llevó a cabo estimando los recursos energéticos del campus, seleccionando tecnología de conversión de biomasa residual para la generación de energía mediante la comparación de los diferentes procesos de transformación y así estimar y caracterizar la biomasa residual vegetal del campus universitario y posteriormente dimensionar globalmente los componentes que hacen parte del sistema de generación de energía.

Así pues, se determinó que la tecnología más factible es la digestión anaerobia, ya que es ambientalmente equilibrada además de tener un costo de implementación y mantenimiento más bajo; como también se obtuvo un 100% de cobertura de la demanda de gas del campus contando con los residuos de biomasa del mismo.

En conclusión, la universidad estaría aprovechando unos recursos renovables para disminuir los costos en consumo energético, y además la conversión permite obtener residuos sólidos que pueden ser utilizados para la fertilización de las plantas ornamentales que rodean toda la planta física de la universidad.

## **2.2 Bases Teóricas**

### ***2.2.1 Pellets***

Los pellets son un tipo de biomasa comprimida y alargada, con una forma semejante a la que tendría una píldora convencional (cilindro pequeño), generalmente fabricados a partir de los residuos de la industria maderera como el aserrín (Biomasa, 2019). Siendo un producto totalmente natural, catalogado como biomasa sólida de dimensiones de tan solo unos pocos milímetros.

**Figura 1.**  
*Pellets*



Nota: Las Provincias, qué son los pellets y para qué se usan (2018)

### ***2.2.2 Uso de los Pellets***

Se pueden usar para la calefacción y agua caliente de cualquier recinto, ya sea de una vivienda unifamiliar, una comunidad de vecinos, una empresa, un hotel, una piscina, un edificio o de forma industrial (Biomasa, 2019). Para lo anterior se requieren estufas o calderas especiales para pellets, las cuales son muy cómodas y fáciles de usar ya que los pellets pueden transportarse y utilizarse como cualquier combustible líquido, pero con más versatilidad.

Un claro ejemplo de lo ya mencionado es el hecho de que actualmente varias centrales eléctricas en Europa han comenzado ya a incorporar pellets de madera en sus procesos de producción debido, principalmente, a las nuevas regulaciones de contaminación y emisiones de efecto invernadero. Lo que indica una nueva forma de creación de energía limpia y sostenible.

### ***2.2.3 Tipos de Pellets***

Actualmente, en el mercado se pueden encontrar diferentes clases de pellets, teniendo en cuenta que el estándar internacional (Norma Europea sobre la calidad del pellet N-14961-2 y UNE-EN ISO 17225-2:2014 Biocombustibles sólidos) clasifica solamente a los que están hechos de madera según el estado de esta y el tratamiento químico que hayan recibido o no, además del porcentaje de cenizas que puedan presentar (IDAE, 2016).

De acuerdo a la calidad de la madera se pueden encontrar:

- Tipo A1: son los pellets hechos con la madera del tronco y residuos de la industria maderera no tratados químicamente
- Tipo A2: están hechos de árboles enteros sin raíces, madera del tronco, residuos de tala, corteza y residuos y subproductos de la industria maderera no tratados químicamente
- Tipo B: de origen forestal, plantaciones y otras maderas no usadas ni tratadas, residuos y subproductos de la industria maderera no tratados químicamente y de la madera reciclada no tratada químicamente.

En la siguiente tabla se observa en detalle la composición de las 3 categorías:

**Tabla 1.***Composición de los tipos de pellets según la Norma Europea*

|                                  | A1                     | A2                                    | B                        |
|----------------------------------|------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| <b>Diámetro en mm</b>            |                        | 6 u8                                  |                          |
| <b>Longitud en mm</b>            |                        | entre 3,15 y 40                       |                          |
| <b>Humedad</b>                   |                        | menor o igual a 10%                   |                          |
| <b>Cenizas</b>                   | menor o igual a 0,7%   | menor o igual a 1,5%                  | menor o igual a 3%       |
| <b>Durabilidad mecánica</b>      | mayor o igual a 97,5%  |                                       | mayor o igual a 96,5%    |
| <b>Finos</b>                     |                        | menor de 1%                           |                          |
| <b>Poder calorífico inferior</b> | entre 16,5% y 19MJ/kg  | entre 16,3MJ/kg y 19MJ/kg             | entre 16 MJ/kg y 19MJ/kg |
| <b>Densidad aparente</b>         |                        | mayor o igual a 600 kg/m <sup>3</sup> |                          |
| <b>Nitrógeno</b>                 | menor o igual a 0,03%  | menor o igual a 0,05%                 | menor o igual a 1%       |
| <b>Sulfuro</b>                   | menor o igual a 0,03%  |                                       | menor o igual a 0,04%    |
| <b>Cloro</b>                     | menor o igual a 0,02%  |                                       | menor o igual a 0,03%    |
| <b>Fusibilidad cenizas</b>       | mayor o igual a 1200°C | mayor o igual a 1100°C                |                          |

Nota: IDAE (2016)

Sin embargo, pueden existir pellets de diferente biomasa, tal como de la cascarilla de café, de oliva, de coraza de palma, de trigo, cáscara de arroz, entre otras materias primas aún sujetas a investigación como la del presente proyecto. Y, a pesar de que la anterior tabla muestra datos solamente correspondientes a los pellets de madera, es claro que representa una adecuada estructura de referencia para los fabricados a partir del cacao que se quieren analizar en este proyecto.

#### **2.2.4 Formas de suministro de Pellets**

En el mercado, las formas más comunes de suministro de pellets se pueden encontrar como:

- **Sacos (Biomasa, 2019)**. Es la forma más común de comercializar los pellets, pues se suministran con un peso aproximado de 15 kg, lo cual es bastante versátil para usuarios de bajo consumo, pues por su bajo peso son manejables, de tal manera que se hace práctico depositar estos en la caldera o estufa donde se vayan a utilizar.

**Figura 2.**

*Saco de 15 kg de Pellets*



Nota: Tienda Biomasa

- **Big Bags (Biomasa, 2019).** El suministro de pellets por este método es semejante al anterior, con la variante de que los “sacos” no llevan 15 sino 1000 kg de estos, para un usuario de mediano consumo esta forma puede resultar más económica que el ya mencionado.

**Figura 3.**

*Saco de 100 kg de Pellets*



Nota: Tienda Biomasa

- **Camión Cisterna (Biomasa, 2019).** Para los grandes consumidores, esta es la forma más práctica y económica ya que se suministran los pellets directamente desde el camión hasta la cámara de

combustión donde vayan a ser utilizados, haciendo que todo el proceso quede automatizado y evitando el manejo manual, por parte del usuario, de los pellets en cualquier momento.

**Figura 4.**

*Camión cisterna de Pellets*



*Nota: Tienda Biomasa (2019)*

### **2.2.5 Cacao**

Con el premio ‘Cocoa Of Excellence’, el cacao que se produce en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander, fue reconocido como uno de los mejores del mundo.

La producción y exportación de cacao en Colombia ha crecido considerablemente en los últimos años. Según la Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao, 2018) el país exportó unas 7 mil toneladas de cacao en grano y al menos 13 mil toneladas en productos semielaborados y finalizados a base de este producto. El crecimiento del sector se ve evidenciado en que hace más de una década el país producía 33 mil toneladas de cacao, importaba 12 mil toneladas y exporta alrededor de mil toneladas de cacao en grano, únicamente. Además, en los últimos cinco años la producción ha alcanzado entre 55 mil y 60 mil toneladas.

“El cacao de Colombia es potente, con un punto de vinagre, tostado y preserva un gran aroma floral”, dice Jordi Roca, proclamado como el mejor pastelero del mundo en 2014 por la revista Restaurant Magazine.

### **2.2.6 Cascara de cacao**

(Cáscara de cacao fuente de polifenoles y fibra: simulación de una planta piloto para su extracción, 2017)

Las cáscaras de cacao se obtienen cuando los granos son separados de la vaina. El grano de cacao es utilizado principalmente para la fabricación del chocolate; sin embargo, en el beneficio y procesamiento del grano se generan residuos tales como cáscaras, cascarillas, y efluentes de fermentación que presentan hasta el 74 – 86% (en peso) de la mazorca.

Las cascara de cacao son ricas en carbohidratos, fibra, proteínas, pectina y compuestos bioactivos (por ejemplo, los polifenoles y carotenoides). El alto porcentaje de residuos de cacao, hace de estos un problema ambiental y fitosanitario en las plantaciones de cacao, pero teniendo en cuenta sus niveles nutricionales estos residuos pueden ser empleados para obtener productos con un alto valor agregado; entre los que se destacan los polifenoles y la fibra que se posicionan muy bien en los mercados actuales.

### 2.2.7 Composición de la cascara del cacao

(Cáscara de cacao fuente de polifenoles y fibra: simulación de una planta piloto para su extracción, 2017)

A continuación, se muestra de manera agrupada y ordenada la información de los componentes que se encuentran en la cascara del cacao según estudios y pruebas realizadas a varias muestras del mismo:

**Tabla 2.**

*Características fisicoquímicas de la cáscara de cacao del material CCN (Colección Castro Naranjal)*

| <b>Molécula Simulada</b> | <b>Característica Fisicoquímica</b> | <b>Resultado [%]</b> |
|--------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Agua                     | Humedad                             | 6,7 ± 0,3            |
| Celulosa                 | Fibra dietaria total                | 56,8 ± 4,0           |
| Ácido gálico             | Polifenoles totales                 | 6,1 ± 1,8            |
| Ácido D-galacturónico    | Pectinas                            | 1,0 ± 0,1            |
|                          | Ceniza                              | 11,4 ± 0,1           |
|                          | Grasa                               | 0,7 ± 0,1            |
| Matriz                   | Proteína                            | 6,3 ± 0,1            |
|                          | Azúcares                            | 11,0 ± 0,1           |
|                          | <b>Total</b>                        | <b>29,4 ± 0,1</b>    |

*Nota.* La cáscara fue secada a 50 °C y el material fue molido para obtener la harina de cáscara de cacao. Las condiciones óptimas para la extracción son 60 °C, relación etanol: agua 50:50 v/v, relación cáscara: solvente 1:60 p/v y pH 5.

### 2.2.8 Carbón vegetal (FAO, 2014)

El carbón vegetal es un producto obtenido del calentamiento de residuos vegetales en una combustión anaeróbica a temperaturas que van desde los 280 a 700 grados Celsius (°C), a este proceso se

le conoce como pirolisis y se realiza en hornos especiales, donde se controlan la entrada de aire buscando que el material se descomponga químicamente en forma de carbón vegetal. Cuando este es derivado de la madera se definen ciertas propiedades que permiten evaluar la calidad del producto, estas propiedades están ligadas entre sí, pero se miden por separado, dichas propiedades se describen a continuación:

- **Contenido de humedad:** Cuando el carbón recién sale del horno llega a tener una humedad del 1%, pero al estar en contacto con el aire empieza a absorber la humedad del ambiente subiendo este porcentaje de 5 a 10 %, en un carbón bien quemado adecuadamente. Si el carbón llega a tener contacto con el agua de lluvia o en casos en los que el carbón absorbe ácidos piroleñosos y alquitranes se aumenta su higroscopicidad y el contenido de humedad puede llegar al 15 %.

- **Volátiles:** este parámetro se refiere al contenido de residuos líquidos y alquitranos que no fueron eliminados completamente en el proceso de carbonización, cuando este proceso se hace con un tiempo prolongado y a alta temperatura el contenido de volátiles es muy bajo, por el contrario, cuando se hace a bajas temperaturas y en un periodo de tiempo más corto aumenta la cantidad de estas sustancias.

- **Carbono fijo:** es uno de los indicadores más importantes para clasificar el carbón a nivel industrial, se define como el residuo sólido que queda una vez se separa la humedad, las cenizas y las materias volátiles, se ha comprobado que a mayores temperaturas se mejora la conversión de carbono fijo.

- **Cenizas:** son sustancias minerales como la arcilla, la sílice, los óxidos de calcio y de magnesio, que se encuentran en la madera original y que son recogidos como contaminaciones del suelo. Estos minerales son el material que queda como residuo luego de quemar el combustible.

Es importante resaltar que el contenido de lignina tiene un efecto positivo en el rendimiento del carbón vegetal y que la friabilidad que es una característica del carbón cuando está muy quebradizo y desmenuzable también juega un papel importante en la calidad del mismo.

Los productos de la carbonización (pirólisis) se pueden dividir en tres partes, los productos de fase sólida que son el carbón vegetal, el cisco o carbonilla (carbón con un tamaño menor a 1 cm) y a la brea solidificada, luego están los productos de fase gaseosa (producto de las reacciones pirolíticas de la madera) que se puede dividir en dos fracciones, las de gases no condensables a las condiciones ambientales, formada por gases no combustibles ( $\text{CO}_2$ ) y combustibles ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ) y la fracción de los gases condensables a condiciones ambientales, de allí se obtiene el licor piroleñoso o ácido piroleñoso por su bajo pH.

### ***2.2.9 Análisis Técnico Económico (Computadoras, 2017)***

En el Análisis Técnico, el Analista evalúa los principios técnicos del Sistema y al mismo tiempo recoge información adicional sobre el rendimiento, fiabilidad, características de mantenimiento y productividad.

Los resultados obtenidos del análisis técnico son la base para determinar sobre si continuar o abandonar el proyecto, si hay riesgos de que no funcione, no tenga el rendimiento deseado, o si las piezas no encajan perfectamente unas con otras.

El análisis económico incluye lo que llamamos, el análisis de costos – beneficios, significa una valoración de la inversión económica comparado con los beneficios que se obtendrán en la comercialización y utilidad del producto o sistema.

### 3. Diseño Metodológico

Este proyecto se llevó a cabo siguiendo diferentes lineamientos respondiendo así a los diferentes objetivos específicos, establecidos en el Capítulo I de este documento y definidos nuevamente a continuación mediante las actividades requeridas para dar cumplimiento a cada uno de estos, expresando qué equipos y métodos fueron empleados para el desarrollo de las mismas y, por lo tanto, sus respectivos entregables. Tal que, de forma global, cada uno de estos procesos contribuye al cumplimiento del Objetivo General planteado en la primera sección de la investigación haciendo el análisis y proceso de la materia prima en cuestión (postcosecha de cacao) y los aglomerantes escogidos (Fécula de maíz, almidón de yuca y almidón de plátano).

**Objetivo 1:** Determinación del porcentaje de humedad, tamaño de partícula y agente aglomerante requeridos para la fabricación de los pellets.

**Actividad 1:** Trituración de materia prima y separación por lotes.

- **Equipo:** Molino tradicional manual Corona. Ref. L14200.

- **Método:** Por medio de la herramienta de corte manual se reduce el tamaño de la materia prima, la molienda obtenida se separa por lotes en diferentes contenedores para la preparación de las mezclas en la posterior actividad.

- **Entregable:** Evidencia fotográfica en Apendice1.

**Actividad 2:** Determinación de porcentaje de humedad.

- **Equipo:** Personal de trabajo (Inspección visual). Materia prima molida, agua, almidón de yuca, almidón de plátano y fécula de maíz.

- **Método:** Se tomó una muestra de la materia prima triturada y se agregó agua en porcentajes de la masa seca observando cambios en la consistencia de ésta hasta llegar a un grado de firmeza estable por medio de inspección visual.

De forma consecutiva, cada una de estas mezclas de materia prima y agua (con los porcentajes de cada una establecidos), se introdujo en la máquina peletizadora, aumentando el porcentaje de humedad hasta encontrar alguna forma (mínima) de pellet en el producto extraído de la máquina y así establecer el porcentaje de humedad para el total de las mezclas siguientes.

Posteriormente se procedió a añadir aglomerante en tres porcentajes diferentes de la masa de la materia prima (sin mezclar), ya estipulados como 10, 20 y 30%. Además de la adición y variación de los porcentajes de agua hasta conseguir el nivel de humedad óptimo para continuar con el siguiente proceso.

- **Entregable:** descripción detallada del procedimiento en Apendice2. Evidencia fotográfica sobre determinación del porcentaje de agua a utilizar (sin aglomerante) en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

### **Actividad 3:** Peletización

- **Equipo:** Máquina peletizadora de motor 1LA7 093-2YB60 IE1 de 3HP de potencia.

- **Método:** Introducción por lotes de cada tipo de mezcla (diferentes porcentajes y tipo de aglomerante) en la máquina peletizadora donde por medio de prensado se transforman en los respectivos pellets. Producción en masa.

- **Entregable:** Tabla fotográfica de pellets de cada mezcla, clasificados según el porcentaje de aglomerante. Apéndice **D**.

**Objetivo 2:** Selección del pellet que brindara las mejores condiciones energéticas y mecánicas a partir del estudio de las propiedades correspondientes a humedad, resistencia mecánica y estética mediante una matriz QFD y, a partir de esto, se analizó el poder calorífico.

### **Actividad 1:** Medición de absorción de humedad.

- **Equipo:** Agua, placas Petri, muestra de pellets de cada tipo de mezcla.

- **Método:** La prueba se aplicó siguiendo el procedimiento de la American Society of Agricultural Engineers, ASAE según lo refieren los autores (Lindley and Vossoughi, 1989), pues en el momento no existe ninguna prueba normalizada. Cada muestra se sumergió en agua a 27 °C (temperatura ambiente) durante 1 min en las placas Petri, el valor de la absorción de humedad se tomó como el porcentaje en peso de agua absorbida por la muestra.

- **Entregable:** Tabla con los diferentes porcentajes de absorción de humedad para cada una de las muestras en el tiempo equivalente a 1 min dentro de la placa Petri; Como se evidencia en la Tabla 3 y la Figura 5.

### **Actividad 2:** Medición de humedad.

- **Equipo:** Horno Mufla Terrígeno D8 serie 2254 (norma de medición de humedad D5142 – 02a).

- **Métodos:** La muestra pesada, se introdujo en un horno a temperatura entre 100 – 105°C durante un tiempo no superior a 24 h para evitar la pérdida de materia volátil. Se obtuvieron registros del contenido de humedad mediante pesaje hasta alcanzar un peso constante. El resultado se expresó en porcentaje de humedad, comparando la cantidad de masa perdida con respecto a la masa inicial registrada. (Norma ASTM D5142-02a)

- **Entregable:** Tabla de valores de humedad obtenidos para los ensayos de los diferentes tipos de pellets y gráfica de comparación de la humedad y el tipo de pellet; como se evidencia en la Tabla 4.

### **Actividad 3:** Prueba de impacto

- **Equipo:** Personal de trabajo bajo norma ASTM D440-86

- **Métodos:** Las muestras se dejaron caer 4 veces desde una altura igual a 1,85 m a una placa de metal. El peso retenido por las muestras se considera la resistencia de las muestras de acuerdo a la NORMA ASTM D440-86.

- **Entregable:** Registro de la masa antes y después, de las muestras; como también los respectivos porcentajes de pérdida de masa evidenciado en la Tabla 5. Evidencia de los pellets fracturados en Apendice5.

### **Actividad 4:** Prueba visual de pellets

- **Equipo:** Personal de trabajo

- **Métodos:** Por medio de un análisis visual de la consistencia y estética de las muestras, se evalúa cuál de éstas es más apta para la torrefacción según la homogeneidad a lo largo del cuerpo del pellet.

- **Entregable:** Tabla de valores asignados al calificativo visual estipulado; estipulado en la Tabla 6.

### **Actividad 5:** Selección de la mejor muestra

- **Equipo:** Personal de trabajo.

- **Método:** Mediante una matriz QFD y bajo los criterios anteriormente mencionados, se selecciona la muestra que mejor cumpla con esas 3 condiciones; dicha muestra es a la que se le realizan los procesos térmicos de torrefacción.

- **Entregable:** Matriz QFD con la muestra seleccionada, evidenciada en la Tabla 7.

### **Actividad 6:** Determinación de Poder calorífico de la muestra seleccionada

- **Equipo:** Horno Mufla Terrígeno D8 serie 2254. Personal de trabajo.

- **Método:** Según el estudio de Özyuguran, Yaman (2017) en donde se en valores de poder calorífico superior y se comparan los cálculos experimentales de ese y otros estudios al respecto teniendo en cuenta las desviaciones estándar y los márgenes de error; se elige la ecuación número 4; remitiéndonos así mismo a la norma ASTM D5142-02a para determinar los valores necesarios de humedad, masa volatilizada, carbón fijo y cenizas necesarios para determinar los valores de poder calorífico superior correspondientes.

- **Entregable:** Registro de valores de porcentaje de la masa perdida por humedad (tabla 8), valores de porcentaje de material volátil perdido (Tabla 9), valores de porcentaje de masa correspondiente a ceniza posterior a la torrefacción (Tabla 10), valore del poder calorífico superior e inferior del tipo de pellet seleccionado.

#### **Actividad 7:** Torrefacción

- **Equipo:** Horno Mufla Terrígeno D8 serie 2254. Crisoles.

- **Métodos:** Para la mezcla seleccionada mediante la matriz QFD se tomaron veintisiete muestras, tal que se separaron en grupos de tres pares a los cuales se les asignó una combinación entre el tiempo y la temperatura a la que estarían en el horno Mufla para la torrefacción. Con tiempos de 10, 20 y 30 minutos y temperaturas de 200, 225 y 250 °C. Por lo que, al combinar dos grupos de tres variables se tuvo que contar con las nueve muestras que se mencionaron al principio.

- **Entregable:** Tabla de variaciones de masa de cada muestra y determinación de la pérdida de masa por humedad y cuánto a pérdida de Biomasa volatilizada de los pellets; como se evidencia en la Tabla 11. Evidencia fotográfica en Apéndice F

#### **Actividad 8:** Estimación del poder calorífico de los pellets.

- **Equipo:** Horno Mufla Terrígeno D8 serie 2254. Personal de trabajo.

- **Método:** Según el estudio de Nitipong Soponpongpipat, et al. (2015) en donde se predicen valores de poder calorífico superior y se comparan los cálculos experimentales de ese y otros estudios al respecto teniendo en cuenta las desviaciones estándar y los márgenes de error; se elige la ecuación elaborada por T. Cordero, et al. (2001) la cual desarrollan en el artículo; remitiéndonos así mismo a la norma ASTM D5142-02a para determinar los valores necesarios de humedad, masa volatilizada, carbón fijo y cenizas necesarios para determinar los valores de poder calorífico superior correspondientes.

- **Entregable:** Registro de valores de porcentaje de la masa perdida por humedad (tabla 12), valores de porcentaje de material volátil perdido (Tabla 13), valores de porcentaje de masa correspondiente a ceniza

posterior a la torrefacción (Tabla 14), valores de poderes caloríficos superior e inferior de los diferentes tipos de pellet (Tabla 15). Evidencias de este proceso en

**Objetivo 3:** Evaluación técnico, económica y ambiental de los procesos de obtención y producción de los pellets para una adecuada selección de los equipos.

**Actividad 1:** Estimación de niveles de contaminantes en el aire a causa del transporte de la materia prima.

- **Métodos:** Recolección de información por medio de normativas nacionales alrededor de la permisibilidad máxima de emisión de contaminantes en el aire.

- **Entregable:** Ficha técnica de niveles de contaminantes (Tabla 16).

**Actividad 2:** Estimación de costos de transporte, manejo de materia prima y preparación para distribución

- **Equipo:** Personal de trabajo

- **Métodos:** Mediante priorización, tabulación y distribución en hojas de cálculo.

- **Entregable:** Tabla organizada de datos de costos de transporte y de manejo de la materia prima y producto final (Tabla 17).

**Objetivo 4:** Comparar el desempeño energético de los pellets elaborados a partir del residuo de la post cosecha de cacao con el carbón comercial proveniente del eucalipto en términos de costos de energía por unidad de masa.

**Actividad 1:** Tabulación de las propiedades mecánicas y físico-químicas del carbón comercial proveniente del eucalipto

- **Métodos:** Mediante lectura y distribución de datos en hoja de cálculo

- **Entregable:** Tabla de datos de propiedades mecánicas y tabla de datos de propiedades físicoquímicas.

**Actividad 2:** Construcción de tabla comparativa de las dos biomásas en cuestión.

- **Método:** Mediante clasificación de propiedades mecánicas y físicoquímicas se distribuyen los datos en una tabla separados por una columna para cada biomasa.

- **Entregable:** Tabla comparativa de datos entre las biomásas en cuestión.

#### **4. Resultados**

A partir de la información recolectada, producto de las pruebas de carácter tanto cualitativo como cuantitativo, en el desarrollo pleno de la metodología establecida para evaluar la viabilidad técnico-económica de la producción y el desempeño de pellets elaborados a partir del residuo de la postcosecha de cacao con el propósito de reemplazar el carbón vegetal de eucalipto (comercial); cada una de las actividades allí planteadas y desarrolladas arrojan un o unos entregables que develarán el análisis de los procedimientos del proyecto de investigación, así:

##### **Entregable de la actividad 1**

**Objetivo 1:** se realiza la trituración por medio de un molino manual Corona. Ref. L14200 después de intentar hacer uso de otros equipos de corte, pero sin obtener un resultado de materia triturada óptimo. La evidencia fotográfica es consignada en Anexo1.

##### **Entregable de la actividad 2**

**Objetivo 1:** después de hacer varias veces el mismo procedimiento, bajo el método de prueba y error, en donde se adicionó agua a la materia prima triturada, se realizó inspección visual seguido de un proceso de Peletización para determinar si su consistencia era o no resistente, se logró determinar que el porcentaje de humedad estándar de la materia prima triturada obtenida corresponde al 40,5% de la masa total de la mezcla, independientemente del tipo de aglomerante y de su proporción. Dicho procedimiento está expresamente detallado en el Apendice2 y la evidencia fotográfica se encuentra en el Apendice3.

##### **Entregable de la actividad 3**

**Objetivo 1:** para poder llevar a cabo esta actividad fue pertinente continuar con la determinación del porcentaje de agua estándar adecuado ya que, se encontró que al adicionar aglomerante en cualquier proporción la materia prima comenzó a presentar diferentes características tal como se expresa en el detallado del Apendice2. Dichas características se vieron reflejadas en los pellets producidos, en primera instancia, en textura, densidad, tamaño y estética. Ya que las propiedades mecánicas y fisicoquímicas fueron evaluadas posteriormente. Evidencia de este procedimiento se encuentra adjunta en el Apendice4.

### **Entregable de la actividad 1**

**Objetivo 2:** luego de llevar a cabo el proceso anunciado para esta actividad, en el capítulo anterior, a cada una de las muestras correspondientes a las nueve diferentes variaciones, tanto de aglomerante como de sus respectivas proporciones, se registraron los datos obtenidos en la tabla presente a continuación.

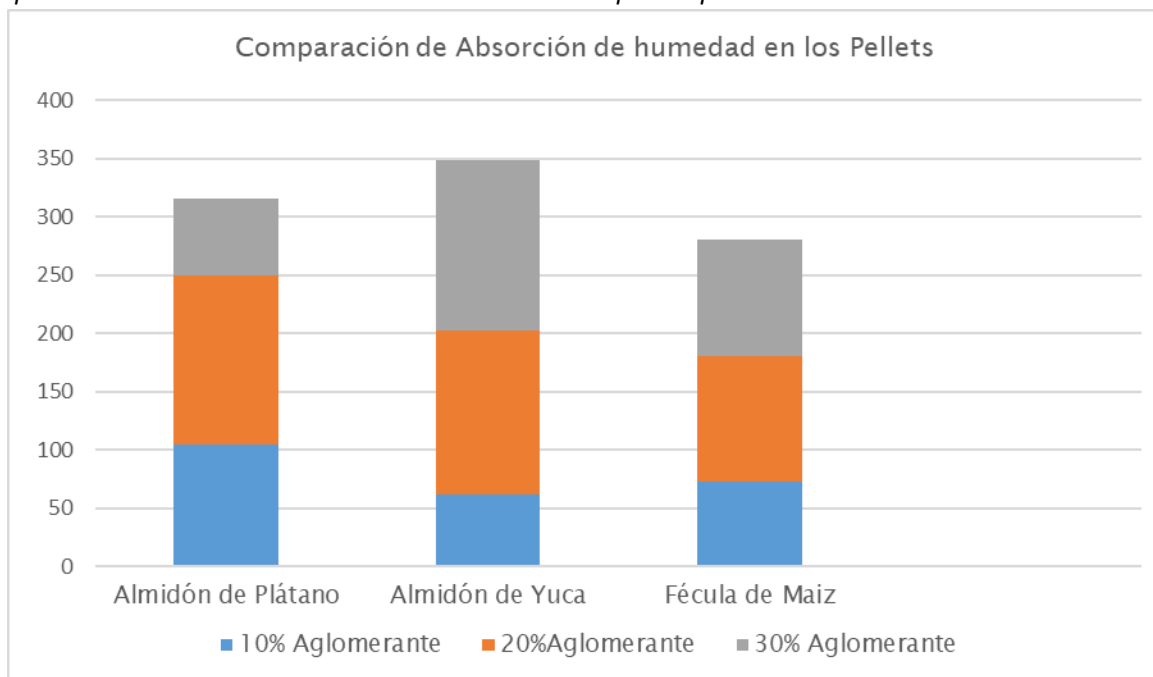
**Tabla 3.**

*Tabla de absorción de humedad correspondiente a cada una de las muestras según su aglomerante y su respectiva proporción*

|                      | ABSORCIÓN DE HUMEDAD |               |            |               |
|----------------------|----------------------|---------------|------------|---------------|
|                      | % Aglomerante        | m [g] Inicial | m[g] final | % masa ganada |
| <b>A. de Plátano</b> | 10                   | 0,3947        | 0,8075     | 104,5         |
|                      | 20                   | 0.4494        | 11.024     | 145,3         |
|                      | 30                   | 0.5278        | 0.8762     | 66            |
| <b>A. de Yuca</b>    | 10                   | 0.5068        | 0.8201     | 61,8          |
|                      | 20                   | 0.4779        | 1.149      | 140,4         |
|                      | 30                   | 0.4350        | 1,0738     | 146,9         |
| <b>F. de Maíz</b>    | 10                   | 0.5081        | 0,8764     | 72,5          |
|                      | 20                   | 0.4466        | 0,9292     | 108           |
|                      | 30                   | 0.4604        | 0,9191     | 99,6          |

*Nota.* La masa de cada muestra corresponde a la registrada por un solo pellet en cada ocasión.

Así mismo, los datos registrados en la tabla anterior se expresaron gráficamente con el fin de apreciar más fácilmente quiénes presentaron una mayor y menor cantidad de absorción con respecto a los demás.

**Figura 5.***Comparación de absorción de humedad entre los tres tipos de pellets*

*Nota.* La gráfica permite comparar el comportamiento entre los tres aglomerantes, así como entre sus respectivas proporciones.

### **Entregable de la actividad 2**

**Objetivo 2:** tal como se mencionó, esta actividad se desarrolló registrando los datos correspondientes al peso antes y después del secado a muestras de diferentes cantidades de pellets tomadas de cada una de las clasificaciones según el tipo de aglomerante y sus diferentes proporciones.

**Tabla 4.***Tabla de humedad contenida en los pellets*

|                           | <b>HUMEDAD (Secado en horno)</b> |                      |                   |                       |
|---------------------------|----------------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|
|                           | <b>% Aglomerante</b>             | <b>m [g] Inicial</b> | <b>m[g] final</b> | <b>% masa perdida</b> |
| <b>Almidón de Plátano</b> | 10                               | 21,2                 | 20,5              | 3,302                 |
|                           | 20                               | 12,76                | 12                | 4,389                 |
|                           | 30                               | 109,494              | 105,655           | 3,506                 |
| <b>Almidón de Yuca</b>    | 10                               | 25,398               | 24,475            | 3,634                 |
|                           | 20                               | 24,93                | 24                | 4,128                 |
|                           | 30                               | 24,354               | 23,416            | 3,852                 |
| <b>Fécula de Maíz</b>     | 10                               | 61,194               | 57,959            | 5,286                 |
|                           | 20                               | 63,004               | 60,123            | 4,573                 |
|                           | 30                               | 63,588               | 61,14             | 3,850                 |

*Nota.* La diferencia presente entre el peso de un tipo de pellet y otro corresponde a la cantidad de pellets dispuestos según cada recipiente utilizado (placa Petri). El peso de estas placas fue tarado en la balanza, de manera que se contó con el peso propio de la biomasa.

### **Entregable de la actividad 3**

**Objetivo 2:** luego de realizar esta actividad tal y como lo describe la norma ASTM D440-86, se evidenció que, en el segundo o tercer lanzamiento, cada pellet iba a fracturarse en dos o tres partes de diferente tamaño, por lo tanto, la masa que se registró como “después” en la Tabla 5, corresponde a la porción más grande de pellet.

**Tabla 5.***Tabla de pérdida de masa de los pellets luego de la prueba de impacto*

| <b>Aglomerante</b>        | <b>% aglomerante</b> | <b>m[g] antes</b> | <b>m[g] después</b> | <b>% masa perdida</b> |
|---------------------------|----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| <b>Almidón de Yuca</b>    | 10                   | 0.4929            | 0.2676              | 45.71                 |
|                           | 20                   | 0.5054            | 0.2611              | 48.34                 |
|                           | 30                   | 0.3878            | 0.3464              | 10.67                 |
| <b>Fècula de Maiz</b>     | 10                   | 0.5776            | 0.2240              | 61.22                 |
|                           | 20                   | 0.4872            | 0.3947              | 18.99                 |
|                           | 30                   | 0.4787            | 0.2758              | 42.38                 |
| <b>Almidón de Plátano</b> | 10                   | 0.4194            | 0.2613              | 37.7                  |
|                           | 20                   | 0.4507            | 0.2370              | 47.41                 |
|                           | 30                   | 0.5181            | 0.3465              | 33.12                 |

*Nota.* Aunque un pellet pudiese fracturarse en más partes que otro, finalmente lo importante era la cantidad de masa de la porción más grande al concluir la prueba.

#### **Entregable de la actividad 4**

**Objetivo 2:** en la tabla que se presenta a continuación, se registraron valores que corresponden a una calificación meramente cualitativa, basados en uniformidad de color, homogeneidad, rugosidad de su superficie y tamaño, considerando estos como criterios principales para una valoración cuantitativa (de 1 a 5, siendo la nota más alta la mejor) de la estética de los pellets.

**Tabla 6.***Tabla de valores calificativos en cuanto a estética*

| <b>Aglomerante</b>        | <b>% en masa</b> | <b>Estética</b> |
|---------------------------|------------------|-----------------|
| <b>Almidón de Yuca</b>    | 10               | 3.5             |
|                           | 20               | 3.4             |
|                           | 30               | 3.2             |
| <b>Fècula de Maiz</b>     | 10               | 4.5             |
|                           | 20               | 3.8             |
|                           | 30               | 4.1             |
| <b>Almidón de Plátano</b> | 10               | 1               |
|                           | 20               | 3               |
|                           | 30               | 1.8             |

*Nota.* El registro fotográfico a partir del cual se determinaron las anteriores calificaciones se encuentra en la tabla de figuras correspondiente al Apéndice 4.

### **Entregable de la actividad 5**

**Objetivo 2:** con el fin de utilizar los resultados previamente expresados correspondientes a absorción de humedad, resistencia al impacto y estética, para saber cuál sería el tipo de pellet más adecuado para continuar con el proceso de torrefacción, se realizó la siguiente matriz QFD dispuesta en la Tabla 7. Como se aprecia, se dieron criterios de importancia, a cada una de las propiedades a evaluar, entre 1 y 5 yendo de menos a más importante, respectivamente.

Para establecer los valores determinantes dentro de la matriz, se decidió que también oscilarían de 1 a 5, tal como los criterios de importancia y siendo consecuentes con los valores correspondientes a la calificación de la estética de los pellets; para la absorción de humedad, se determinó que solo tendrían calificación de 5 aquellos que aumentaron su masa en una proporción menor a 70%; en cuanto a la masa perdida por la prueba de resistencia al impacto, se dio la calificación más alta a quien hubiese perdido la menor cantidad de masa mediante una regla de tres, expresada en detalle en el Apéndice .

**Tabla 7.***Matriz QFD para selección del mejor pellet*

|                                       | Importancia | Aglomerantes - % masa |      |      |                |      |      |                    |      |     |
|---------------------------------------|-------------|-----------------------|------|------|----------------|------|------|--------------------|------|-----|
|                                       |             | Almidón de Yuca       |      |      | Fécula de Maíz |      |      | Almidón de Plátano |      |     |
|                                       |             | 10                    | 20   | 30   | 10             | 20   | 30   | 10                 | 20   | 30  |
| Estética                              | 1           | <b>3,5</b>            | 3,4  | 3,2  | 4,5            | 3,8  | 4,1  | 1                  | 3    | 1,8 |
| Absorción de Humedad                  | 3           | <b>5</b>              | 1    | 1    | 3              | 1    | 1    | 1                  | 1    | 5   |
| Masa perdida (resistencia al impacto) | 5           | <b>2,7</b>            | 2,6  | 4,5  | 1,9            | 4,1  | 2,9  | 3,1                | 2,6  | 3,3 |
| <b>Importancia de la muestra</b>      |             | <b>32</b>             | 23,9 | 23,6 | 26             | 27,9 | 28,5 | 14,1               | 12,1 | 19  |
| <b>Importancia relativa (%)</b>       |             | <b>15,5</b>           | 11,6 | 11,4 | 12,5           | 13,5 | 13,8 | 6,8                | 5,8  | 9,2 |

*Nota.* La columna sombreada denota el que representa el mejor tipo de pellet según los criterios establecidos y desarrollados previamente.

### Entregable de la actividad 6

**Objetivo 2:** se determinó cuánta humedad habían adquirido los pellets de la atmósfera alrededor, tal y como se aprecia en la Tabla 8; cuánto porcentaje de la masa del pellet correspondió a material volátil, tal como se registró en la Tabla 9; y cuánta masa correspondiente a cenizas quedó para cada pellet, expresado en la Tabla 10. Luego de realizar las pruebas indicadas por la norma ASTM D5142-02a, y así mismo, con los datos encontrados se determinó el poder calorífico del pellet seleccionado.

**Tabla 8.**

*Tabla de pérdidas de humedad en los pellets antes de escoger el más apto.*

|                      | <b>HUMEDAD (Secado en horno)</b> |                      |                   |                       |
|----------------------|----------------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|
|                      | <b>% Aglomerante</b>             | <b>m [g] Inicial</b> | <b>m[g] final</b> | <b>% masa perdida</b> |
| <b>A. de Plátano</b> | 10                               | 21,2                 | 20,5              | 3,302                 |
|                      | 20                               | 12,76                | 12                | 4,389                 |
|                      | 30                               | 109,494              | 105,655           | 3,506                 |
| <b>A. de Yuca</b>    | 10                               | 25,398               | 24,475            | 3,634                 |
|                      | 20                               | 24,93                | 24                | 4,128                 |
|                      | 30                               | 24,354               | 23,416            | 3,852                 |
| <b>F. de Maiz</b>    | 10                               | 61,194               | 57,959            | 5,286                 |
|                      | 20                               | 63,004               | 60,123            | 4,573                 |
|                      | 30                               | 63,588               | 61,14             | 3,850                 |

*Nota.* Las muestras fueron sometidas a 105°C durante una hora según la norma.

**Tabla 9.**

*Tabla de pérdidas de masa correspondiente al material volátil de los Pellets sin torrefactar*

| <b>Medición de Volátiles en la Biomasa de 10% Yuca</b> |                     |                    |                     |                            |                           |
|--|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------|
|  | <b>m[g] inicial</b> | <b>m [g] final</b> | <b>m[g] perdida</b> | <b>% masa perdida (%D)</b> | <b>% material volátil</b> |
| <b>Muestra #1</b>                                      | 0,9857              | 0,2663             | 0,7194              | 72,9837                    | 69,6818                   |
| <b>Muestra #2</b>                                      | 1,0288              | 0,2833             | 0,7455              | 72,4631                    | 69,1612                   |
| <b>Muestra #3</b>                                      | 0,9803              | 0,2715             | 0,7088              | 72,3044                    | 69,0025                   |
| <b>Promedio</b>  |                     |                    |                     |                            | 69,2818                   |

**Tabla 10.**

*Tabla de valores correspondientes a la masa de la ceniza de los pellets sin torrefactar*

| <b>Medición de Cenizas en la Biomasa de 10% Yuca</b> |                     |                    |                     |                        |
|--|---------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
|  | <b>m[g] inicial</b> | <b>m [g] final</b> | <b>m[g] perdida</b> | <b>% masa restante</b> |
| <b>Muestra #1</b>                                    | 1,0516              | 0,1299             | 0,9217              | 12,3526                |
| <b>Muestra #2</b>                                    | 1,0018              | 0,1156             | 0,8862              | 11,5392                |
| <b>Muestra #3</b>                                    | 1,0169              | 0,1237             | 0,8932              | 12,1644                |
| <b>Promedio</b>                                      |                     |                    |                     | 12,0188                |

Siendo así, que los valores promediados en las tablas 9 y 10 fueron los que se usaron para determinar el poder calorífico según el estudio ya mencionado, así:

$$PCS = 10,982 + 0,1136\text{Volátiles} - 0,2848\text{Cenizas} \quad (\text{Ec } 1)$$

$$PCS = 15,42947 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad \text{Antes de la torrefacción}$$

### **Entregable de la actividad 7**

**Objetivo 2:** hasta este punto, para cada uno de los experimentos desarrollados, se clasificaron los pellets por tipo de aglomerante y la proporción del mismo. Teniendo en cuenta que para la torrefacción y pruebas posteriores solo se trabajó con el pellet seleccionado anteriormente, se estableció un nuevo orden de clasificación basado en las variables correspondientes al propio proceso de torrefacción, es decir, ya que parte del estudio es también conocer las propiedades energéticas del pellet y estas pueden variar si se someten o no a una torrefacción y de ser así, también pueden variar dependiendo de la temperatura y el tiempo durante el cual las muestras sean sometidas a este proceso. En ese orden de ideas, se tienen entonces nueve variables pues, se manejaron tres valores de tiempo (10; 20; 30 minutos) y tres valores de temperatura los cuales fueron 200, 225 y 250°C. Por lo tanto, al diseñar el experimento, se organizaron los datos de manera tal que se clasificaron por valor de tiempo y para cada uno, un valor diferente de temperatura, tal como se aprecia en la Tabla 11, a continuación.

**Tabla 11.**

*Tabla de variaciones de masa antes y después de la torrefacción de cada una de las diferentes muestras*

| <b>TORREFACCIÓN 10% YUCA</b> |                             |                    |                      |                                  |                                |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|
|                              | <b>Temperatura<br/>[°C]</b> | <b>m [g] antes</b> | <b>m [g] después</b> | <b><math>\Delta</math> masas</b> | <b>%masa total<br/>perdida</b> |
| <b>10 min</b>                | <b>200</b>                  | 1,411              | 1,216                | 0,195                            | 13,801                         |
|                              | <b>225</b>                  | 1,443              | 1,233                | 0,209                            | 14,519                         |
|                              | <b>250</b>                  | 1,360              | 1,152                | 0,208                            | 15,275                         |
| <b>20 min</b>                | <b>200</b>                  | 1,390              | 1,132                | 0,258                            | 18,581                         |
|                              | <b>225</b>                  | 1,187              | 1,006                | 0,181                            | 15,222                         |
|                              | <b>250</b>                  | 1,377              | 1,047                | 0,330                            | 23,983                         |
| <b>30 min</b>                | <b>200</b>                  | 1,349              | 1,135                | 0,214                            | 15,869                         |
|                              | <b>225</b>                  | 1,391              | 1,129                | 0,261                            | 18,783                         |
|                              | <b>250</b>                  | 1,345              | 0,970                | 0,375                            | 27,877                         |

*Nota.* Se denota “masa total perdida” ya que esta comprende tanto masa propia del pellet como humedad y en los siguientes apéndices y tablas se especifica cuánto de este porcentaje corresponde a pérdida de humedad y cuánto a biomasa volatilizada.

### Entregable de la actividad 8

**Objetivo 2:** posterior al enfriamiento de los pellets a temperatura ambiente luego de la torrefacción, se procedió a determinar cuánta humedad habían adquirido de la atmósfera alrededor, tal y como se aprecia en la Tabla 12; cuánto porcentaje de la masa del pellet correspondió a material volátil, tal como se registró en la Tabla 13; y cuánta masa correspondiente a cenizas quedó para cada pellet, expresado en la Tabla 14. Luego de realizar las pruebas indicadas por la norma ASTM D5142-02a, ya que, como se mencionó en el método correspondiente a esta actividad en el capítulo anterior, con los datos encontrados se determinaron los poderes caloríficos de cada tipo de pellet, tal y como se aprecia en los datos registrados en la Tabla 15.

**Tabla 12.**

*Tabla de pérdidas de humedad en la biomasa torrefactada*

| <b>HUMEDAD (Secado en horno) Torrefacción 10% Yuca</b> |                             |                      |                   |                           |
|--|-----------------------------|----------------------|-------------------|---------------------------|
|  | <b>Temperatura<br/>[°C]</b> | <b>m [g] Inicial</b> | <b>m[g] final</b> | <b>% masa<br/>perdida</b> |
| <b>10 min</b>  | 200                         | 0,43                 | 0,3927            | 8,674                     |
|  | 225                         | 0,4194               | 0,3874            | 7,630                     |
|  | 250                         | 0,3549               | 0,3305            | 6,875                     |
| <b>20 min</b>  | 200                         | 0,4385               | 0,3767            | 14,094                    |
|  | 225                         | 0,3393               | 0,2893            | 14,736                    |
|  | 250                         | 0,4048               | 0,3562            | 12,006                    |
| <b>30 min</b>  | 200                         | 0,4156               | 0,3603            | 13,306                    |
|  | 225                         | 0,3811               | 0,3319            | 12,910                    |
|  | 250                         | 0,331                | 0,2919            | 11,813                    |

*Nota.* En este apartado se aprecia una pérdida de masa mayor a la que presentaron los pellets sin torrefactar, cuestión que se llevó a discusión en el próximo capítulo.

**Tabla 13.***Tabla de pérdidas de masa correspondiente al material volátil de los Pellets torrefactados*

| <b>Medición de Volátiles en la Biomasa Torrefactada de 10% Yuca</b> |                             |                     |                   |                                   |                               |
|---|-----------------------------|---------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|   | <b>Temperatura<br/>[°C]</b> | <b>m[g] inicial</b> | <b>m[g] final</b> | <b>% masa perdida<br/>(total)</b> | <b>% Material<br/>Volátil</b> |
| <b>10 min</b>   | 200                         | 0,42                | 0,0672            | 84                                | 75,3256                       |
|   | 225                         | 0,4592              | 0,0679            | 85,2134                           | 77,5835                       |
|   | 250                         | 0,3918              | 0,0716            | 81,7254                           | 74,8502                       |
| <b>20 min</b>   | 200                         | 0,4033              | 0,0767            | 80,9819                           | 66,8884                       |
|   | 225                         | 0,4267              | 0,0621            | 85,4464                           | 70,7102                       |
|   | 250                         | 0,4094              | 0,0981            | 76,0381                           | 64,0322                       |
| <b>30 min</b>   | 200                         | 0,4005              | 0,0653            | 83,6954                           | 70,3893                       |
|   | 225                         | 0,3694              | 0,0514            | 86,0855                           | 73,1755                       |
|   | 250                         | 0,2669              | 0,0795            | 70,2136                           | 58,4009                       |

*Nota.* Para obtener los valores correspondientes al material volátil, se sustrajo el diferencial de masas correspondiente a la pérdida de humedad a la masa total perdida en este ítem.

**Tabla 14.***Tabla de valores correspondientes a la masa de la ceniza de los pellets torrefactados*

| <b>Medición de Cenizas en la Biomasa Torrefactada de 10% Yuca</b> |                             |                     |                   |                           |                            |
|---|-----------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|
|   | <b>Temperatura<br/>[°C]</b> | <b>m[g] inicial</b> | <b>m[g] final</b> | <b>% masa<br/>perdida</b> | <b>% masa<br/>restante</b> |
| <b>10 min</b>   | 200                         | 0,5098              | 0,0651            | 87,2303                   | 12,7697                    |
|   | 225                         | 0,4969              | 0,0646            | 86,9994                   | 13,0006                    |
|   | 250                         | 0,533               | 0,0741            | 86,0976                   | 13,9024                    |
| <b>20 min</b>   | 200                         | 0,4477              | 0,0296            | 93,3884                   | 6,6116                     |
|   | 225                         | 0,4148              | 0,0253            | 93,9007                   | 6,0993                     |
|   | 250                         | 0,385               | 0,046             | 88,0519                   | 11,9481                    |
| <b>30 min</b>   | 200                         | 0,4677              | 0,0675            | 85,5677                   | 14,4323                    |
|   | 225                         | 0,5213              | 0,0648            | 87,5695                   | 12,4305                    |
|   | 250                         | 0,3885              | 0,0717            | 81,5444                   | 18,4556                    |

**Tabla 15.**

*Tabla correspondiente a la determinación de los poderes caloríficos (PCS; PCI)*

| Cálculo de Poder Calorífico en la Biomasa Torrefactada de 10% Yuca |                  |         |           |         |             |                                   |                                   |
|--|------------------|---------|-----------|---------|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|  | Temperatura [°C] | Humedad | Volátiles | Cenizas | Carbón Fijo | Poder Calorífico Superior [MJ/Kg] | Poder Calorífico Inferior [MJ/Kg] |
| <b>10 min</b>  | 200              | 8,6744  | 75,3256   | 12,7697 | 3,2303      | 13,9559                           | 13,8662                           |
|  | 225              | 7,6299  | 77,5835   | 13,0006 | 1,7860      | 13,8282                           | 13,7512                           |
|  | 250              | 6,8752  | 74,8502   | 13,9024 | 4,3722      | 14,2796                           | 14,2209                           |
| <b>20 min</b>  | 200              | 14,0935 | 66,8884   | 6,6116  | 12,4065     | 15,7720                           | 15,6234                           |
|  | 225              | 14,7362 | 70,7102   | 6,0993  | 8,4542      | 15,0217                           | 14,9015                           |
|  | 250              | 12,0059 | 64,0322   | 11,9481 | 12,0138     | 15,1471                           | 15,0303                           |
| <b>30 min</b>  | 200              | 13,3061 | 70,3893   | 14,4323 | 1,8723      | 12,6352                           | 12,5022                           |
|  | 225              | 12,9100 | 73,1755   | 12,4305 | 1,4840      | 12,9715                           | 12,8532                           |
|  | 250              | 11,8127 | 58,4009   | 18,4556 | 11,3308     | 13,9473                           | 13,8533                           |

*Nota.* Los valores trabajados dentro de la tabla correspondiente a Humedad, Volátil y a Cenizas, equivalen enteramente a porcentajes. Los valores dentro de la columna de Carbón Fijo fueron determinados bajo el método que indica la norma mediante la cual se llevó a cabo toda la actividad.

### **Entregable de la actividad 1**

**Objetivo 3:** se estiman los niveles de contaminantes en el aire a causa del transporte de la materia prima teniendo en cuenta la normativa colombiana alrededor de la reglamentación de los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres las cuales deben cumplir todos los vehículos en circulación.

**Tabla 16.**

*Límites máximos de emisión permisibles para vehículos accionados con gasolina y convertidos a gas natural vehicular o GLP en velocidad de crucero y en condición de marcha mínima, ralentí o prueba estática*

| <b>Año modelo</b> | <b>CO(%)</b> | <b>HC (ppm)</b> |
|-------------------|--------------|-----------------|
| 1970 y anterior   | 5,0          | 800             |
| 1971 - 1984       | 4            | 650             |
| 1985 - 1997       | 3            | 400             |
| 1998 y posterior  | 1            | 200             |

*Nota: Resolución 910 del Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial (2008)*

### **Entregable de la actividad 2**

**Objetivo 3:** Se estiman los costos de obtención de la materia prima, como también el transporte de ésta desde el municipio de procedencia (San Vicente de Chucurí) hasta Bucaramanga; como también costos de procesamiento tales como consumo energético de la máquina de trituración, compra del agente aglomerante elegido (Almidón de yuca), consumo energético de la máquina peletizadora, consumo energético del horno pertinente para la torrefacción; y por último los costos de preparación del producto final para su respectiva distribución los cuales implican el embalaje. Así mismo, se desestima la compra u obtención de equipos tales como máquina trituradora, horno y peletizadora.

**Tabla 17.***Estimación de costos de transporte, manejo de materia prima y preparación para distribución*

|                                      | <b>Fase</b>  | <b>Unidad</b>                              | <b>Precio</b>     |
|--------------------------------------|--|--|-------------------|
| <b>Obtención</b>                     | Obtención de materia prima (residuo de la post-cosecha de cacao) | Bulto                                      | \$ 40.000         |
|                                      | Transporte de materia prima                                      | Viaje San vicente de chucuri - Bucaramanga | \$ 50.000         |
| <b>Procesamiento</b>                 | Trituración de Materia Prima                                     | \$/kWh: 628,54                             | \$ 2.700          |
|                                      | Aglomerante (Almidón de yuca)                                    | 5 [Kg]                                     | \$ 40.000         |
|                                      | Peletizado   | \$/kWh: 628,54                             | \$ 6.300          |
|                                      | Torrefactado   | \$/kWh: 628,54                             | \$ 4.500          |
| <b>Preparación para distribución</b> | Embalaje   | Saco de lona                               | \$ 5.000          |
|                                      |  | <b>Precio total:</b>                       | <b>\$ 148.500</b> |

*Nota.* Todos los costos estimados son para la obtención, transporte, procesado y preparación para distribución de 1 bulto (50kg) de materia prima.

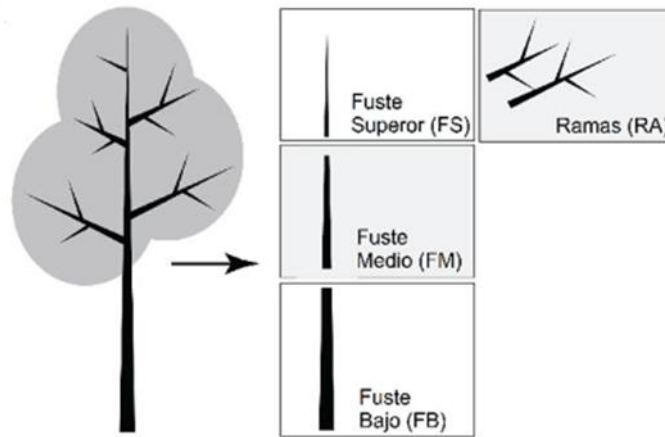
### **Entregable de la actividad 1**

**Objetivo 4:** llevando a cabo una lectura y estudio alrededor del análisis de la producción de carbón a base de eucalipto, encontramos una caracterización física y química muy similar y presta a ser comparada con lo que esta investigación respecta. Valverde et al. (2018)

A sabiendas que el carbón vegetal es producto de la descomposición de la lignina, celulosa, hemicelulosa y de la pérdida de extraíbles producto de la exposición de la madera a altas temperaturas y baja concentración de oxígeno, generando combustión completa; y, que este proceso puede variar según la especie, sección del árbol e inclusive de la técnica de carbonización empleada. Por lo que en este trabajo se valoró el carbón obtenido de tres secciones de fuste (FB, FM y FS), además de las ramas (RA) de árboles juveniles de *Eucalyptus camaldulensis*, como se muestra en la figura a continuación. Valverde et al. (2018)

**Figura 6.**

*Segmentación del fuste de los árboles de Eucalyptus camaldulensis en los segmentos fuste bajo (FB), fuste medio (FM), fuste superior (FS) y Ramas (RA).*



*Nota.* Tomado de *Caracterización física y química del carbón de tres segmentos de fuste y ramas de Eucalyptus camaduleins Dehnh.* (p.3), por Valverde et al, 2018, Revista Forestal Mesoamericana Kurú.

Ahora bien, obtuvieron una diferenciación en los resultados de las pruebas realizadas en los tres segmentos de fuste y ramas de E. Camadulensis, así:

**Tabla 18.**

*Propiedades físicas y químicas determinadas en tres secciones del fuste y en ramas de E. camaldulensis, tanto en muestras de la madera como carbón.*

| Parámetro                     | Sección       |               |               |               |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                               | FB            | FM            | BS            | RA            |
| Densidad [g/cm <sup>3</sup> ] | 0,26 a (0,10) | 0,22 a (0,04) | 0,18 b (0,04) | 0,15 b (0,05) |
| CH(%)                         | 6,1 a (0,9)   | 5,8 a (0,7)   | 5,5 a (0,8)   | 5,0 a (0,8)   |
| Cenizas (%)                   | 7,2 a (0,4)   | 5,5 b (0,7)   | 4,9 c (0,6)   | 4,4 c (0,6)   |
| Volátiles (%)                 | 32,1 a (1,0)  | 32,2 a (1,2)  | 21,1 b (1,4)  | 20,9 b (1,3)  |
| Carbón fijo (%)               | 54,6 c (1,5)  | 56,5 b (1,8)  | 68,5 a (1,5)  | 69,7 a (1,6)  |
| PCS [MJ/Kg]                   | 24,804348     | 25,494526     | 27,858238     | 28,249382     |

*Nota.* Tomado de *Caracterización física y química del carbón de tres segmentos de fuste y ramas de Eucalyptus camaduleins Dehnh.* (p.3), por Valverde et al, 2018, Revista Forestal Mesoamericana Kurú.

### **Entregable de la actividad 2**

**Objetivo 4:** se clasificaron las propiedades mecánicas y químicas de los pellets a base de biomasa de la post cosecha del cacao como también las de la caracterización del carbón de tres segmentos de fuste y ramas de eucaliptus camaduleins dehnh obteniendo estos datos:

**Tabla 19.**

*Propiedades físicas y químicas determinadas en tres secciones del fuste y en ramas de E. camaldulensis, en muestras de carbón y en pellets a partir de biomasa de la postcosecha del cacao con 10% de adición en masa de aglomerante de almidón de yuca.*

|   | Tipo | Parámetro   |             |               |                 |             |             |
|---|------|-------------|-------------|---------------|-----------------|-------------|-------------|
|   |      | Humedad (%) | Cenizas (%) | Volátiles (%) | Carbón Fijo (%) | PCS [MJ/Kg] | PCI [MJ/Kg] |
| Carbón de tres segmentos de fuste y ramas de Eucalyptus camaduleins Dehnh | FB   | 6,1 a (0,9) | 7,2 a (0,4) | 32,1 a (1,0)  | 54,6 c (1,5)    | 24,80435    |             |
|   | FM   | 5,8 a (0,7) | 5,5 b (0,7) | 32,2 a (1,2)  | 56,5 b (1,8)    | 25,49453    |             |
|   | BS   | 5,5 a (0,8) | 4,9 c (0,6) | 21,1 b (1,4)  | 68,5 a (1,5)    | 27,85824    |             |
|   | RA   | 5,0 a (0,8) | 4,4 c (0,6) | 20,9 b (1,3)  | 69,7 a (1,6)    | 28,24938    |             |
|   | 200  | 8,67442     | 12,76971    | 75,32558      | 3,23029         | 13,95587    | 13,86620    |
| <b>10 min</b>   | 225  | 7,62995     | 13,00060    | 77,58347      | 1,78598         | 13,82817    | 13,75124    |
| <b>Pellets de Biomasa a partir de la post-cosecha de cacao</b>            | 250  | 6,87518     | 13,90244    | 74,85019      | 4,37219         | 14,27959    | 14,22093    |
|   | 200  | 14,09350    | 6,61157     | 66,88840      | 12,40653        | 15,77201    | 15,62345    |
| <b>20 min</b>   | 225  | 14,73622    | 6,09932     | 70,71023      | 8,45423         | 15,02173    | 14,90153    |
|   | 250  | 12,00593    | 11,94805    | 64,03218      | 12,01384        | 15,14710    | 15,03026    |
| <b>30 min</b>   | 200  | 13,30606    | 14,43233    | 70,38932      | 1,87229         | 12,63517    | 12,50223    |
|   | 225  | 12,91000    | 12,43046    | 73,17555      | 1,48399         | 12,97148    | 12,85320    |
|   | 250  | 11,81269    | 18,45560    | 58,40087      | 11,33084        | 13,94734    | 13,85334    |

Nota. Debido a que el artículo base de los datos de Carbón de tres segmentos de fuste y ramas de Eucalyptus no contiene información sobre el poder calorífico inferior y tampoco sobre la masa de agua contenida en ellos, no se pudieron consignar los valores en la tabla.

## 5. Discusión

Volviendo al hecho de que la idea de llevar a cabo este proyecto radica en encontrar una alternativa viable al carbón vegetal con el fin de brindar una solución a la problemática ambiental que suponen los cultivos de eucalipto de donde se produce esta forma de biomasa y que, bajo dicho orden de ideas, se pensó en estudiar la viabilidad del uso de pellets a partir del residuo de la postcosecha del cacao.

Aprovechando el potencial de la región de Santander como zona cacaotera, se consideró utilizar el producto de la postcosecha de cacao como materia prima para la fabricación y producción de dichos pellets. Teniendo en cuenta los estudios y avances en el área alrededor del mundo, en Colombia e incluso en el mismo departamento donde se desarrolló este estudio, se evidenció el potencial económico que refleja el uso de estas formas de biomasa en otros países que, sin ir tan lejos, podemos tener como ejemplo a Brasil.

Sin embargo, en la gran mayoría de casos en los que se pudo indagar, los pellets que actualmente se producen de forma comercial son a base de maderas, aserrín y fuera de estos, algunas investigaciones en donde se estudia la viabilidad de usar la borra de café como materia prima para la producción de biomasa. A pesar de ello, el aprovechamiento del producto de la postcosecha del cacao, o lo que se conoce comúnmente como la cáscara del mismo no se encontró que fuese algo que se hubiese estudiado antes, por lo que se mantuvo la hipótesis de que este tipo de biomasa podría contener propiedades energéticas ciertamente aprovechables.

Es por lo anterior que procede a analizarse cada uno de los resultados correspondientes a los objetivos planteados para este proyecto.

En primera instancia, al determinar el porcentaje de agua a utilizar, se evidenció que la materia prima molida por sí sola no contenía las propiedades físicas apropiadas para mezclarse con el agua ni ser lo suficientemente consistente a la hora de producir pellets, con lo que se determina que, no es viable si quiera, seguir agregando más agua pues, aunque la consistencia va aumentando progresivamente, y de llegar a tener la posibilidad de convertirse en pellets al introducirse en la máquina, al secarse esta biomasa a temperatura ambiente, volvería a sus condiciones iniciales, siendo nuevamente solo materia prima molida. Por lo tanto, se decidió descartar esta opción de mezcla dentro de las alternativas a evaluar.

Por otra parte, al continuar las pruebas adicionando aglomerante a cada mezcla en, aproximadamente, un 10% (cantidad mínima planteada para la evaluación) sobre el total de la mezcla húmeda, se encontró que el porcentaje final de agua a adicionar corresponde aproximadamente al 40,5% del total de la masa. Con lo cual se estableció ésta como la cantidad de agua estándar para el resto de las muestras con el fin de poder concentrar el objeto de estudio en el análisis energético de los pellets y trabajar solamente con las tres proporciones diferentes de cada uno de los aglomerantes (10; 20; 30%). Así, se

procedió a realizar el mismo proceso en una mayor magnitud, obteniendo así cantidades considerables de cada tipo de pellet, expuestos a condiciones atmosféricas, teniendo en cuenta que las condiciones en Bucaramanga corresponden a aproximadamente 22,6°C de temperatura y a un 80% de humedad relativa en promedio (Ideam, 2021).

Corresponde a los autores mencionar que el desarrollo de este proyecto de investigación tuvo inicio en la segunda mitad del año 2020, donde apenas se estaba comenzando a regular la reactivación en las ciudades debido a la crisis sanitaria por el Covid-19 en ese momento. Se hace la anterior aclaración con el fin de expresar que, debido a aquella situación, por obvias razones los laboratorios estuvieron en desuso durante lo que duró la crisis, por lo que los equipos se encontraron descompuestos debido a tanto tiempo sin un respectivo mantenimiento.

Al retomar actividades, se observó que los pellets efectivamente se habían secado con el ambiente y, aparentemente, con el papel servilleta sobre el cual fueron dispuestos en un primer momento. Se observó que sus propiedades físicas eran notablemente diferentes a como cuando se extrajeron de la máquina pelletizadora pues, se percibieron secos al tacto y con una estructura rígida (recién producidos eran blandos). Con lo cual, al realizar el proceso de secado en el Horno Mufla a una temperatura de 105°C durante no más de 24 horas, se apreció que la cantidad de masa perdida osciló apenas entre 3 y 5% según los valores registrados para cada una de las muestras. Sin embargo, dichos valores de pérdida de humedad son inquietantes, pues al compararlos con las pérdidas de humedad en el secado de la biomasa torrefactada, se observó un rango más alto, pues estas pérdidas oscilaron entre 6 y 14% de pérdida de masa. Dichas diferencias pueden atribuirse a las condiciones del aire dentro del laboratorio que, pudieron permitir un mayor secado de los pellets durante el tiempo en que este se encontró cerrado, mismo que en el caso de la biomasa torrefactada, al enfriarse junto con el laboratorio ventilado y teniendo en cuenta los cambios dentro de la estructura del pellet pudieron ser factores que reflejaran un mayor contenido de humedad dentro de los mismos.

Por otra parte, previo al proceso de torrefacción y, con el fin de disminuir el número de experimentos, fue necesaria una evaluación de diferentes aspectos del pellet para definir cuál era el más óptimo y a este someterlo al proceso ya mencionado y observar si al ser torrefactado podrían mejorar sus propiedades termoquímicas. Para dicha evaluación se tuvieron en cuenta tres aspectos, los cuales fueron la absorción de humedad, la resistencia al impacto y la estética. Es claro que, para una selección más precisa, lo más óptimo hubiese sido tener en cuenta como otro criterio, el poder calorífico de cada una de las muestras correspondientes a cada una de las diferentes mezclas con las que se trabajó, sin embargo, la evaluación de esta propiedad de obvió debido a que se trató de un proceso muy tedioso a causa de las dificultades del laboratorio, además del largo número de pruebas que debían llevarse a cabo. Así mismo,

teniendo en cuenta que las variaciones del estudio estaban dadas por el tipo de aglomerante y sus diferentes proporciones, se estimó que ninguno iba a cambiar ciertamente las propiedades termoquímicas del pellet, con lo cual, se asumió que en general todos tendrían un comportamiento semejante al pellet correspondiente a 10% de aglomerante de almidón de yuca, que fue el finalmente seleccionado.

Dentro de lo que corresponde al segundo objetivo planteado como tal, se enuncian diferentes propiedades a tener en cuenta como criterios para la selección del mejor pellet y, sobre este realizar el análisis técnico económico y comparación con respecto a las propiedades del carbón vegetal, sin embargo, hay características definidas en este objetivo que no pudieron tenerse en cuenta durante la investigación debido a la inaccesibilidad a los equipos necesarios para realizar tanto las diferentes pruebas como los diferentes estudios, tales como una máquina centrífuga o un durómetro que, corresponden a durabilidad mecánica y dureza respectivamente. En sus lugares, tomó puesto la resistencia al impacto que se llevó a cabo mediante la norma ASTM D440-86.

En cuanto a las propiedades fisicoquímicas, de cuyo análisis se debió prescindir, se comprende la densidad aparente y el análisis de compuestos que, en el caso de la primera es debido a que se considera que no es un factor influyente en el desempeño energético de la biomasa y en cuando a la segunda, se debió a la misma razón del difícil acceso a los equipos necesarios, solo se tuvieron en cuenta otros dos además de la resistencia al impacto, que como se observó durante el desarrollo de esta tesis, fueron la absorción de humedad y el componente estético pues, se sabe que este último puede tener un valor influyente comercialmente hablando.

Haciendo énfasis en el proceso de torrefacción de las muestras correspondientes a la mezcla de 10% de aglomerante de Yuca, se encontró un punto óptimo de desarrollo de este procedimiento dentro de las nueve variables planteadas. Para ello debió analizarse el poder calorífico de cada una de las muestras torrefactadas. Para llegar a ello, primero se introdujeron en el horno mufla lotes correspondientes a cada variable combinada, es decir, un lote durante 10 minutos a una temperatura de 200°C, el siguiente también durante el mismo tiempo, pero a 225°C y el próximo con una misma duración, pero a 250°C. Lo anterior mencionado se repitió para tiempos correspondientes a 20 y 30 minutos, tal como se observó durante las actividades correspondientes en esta investigación. Con lo anterior, se observó lo esperado, “ligeros” cambios visibles en los pellets, que corresponden a cambios en sus estructuras químicas, reflejados en leves cambios de tono, más oscuros a mayor tiempo y temperatura.

Teniendo las muestras torrefactadas, se había dispuesto como parte del plan de estudio el uso de una bomba calorimétrica y otros equipos para tener acceso a datos más precisos de los poderes caloríficos de cada uno de los tipos de torrefacción y sus diferentes propiedades físico-químicas, sin embargo, se aclara que dicho procedimiento tampoco pudo realizarse debido a que los equipos dentro de las instalaciones de

la Universidad Industrial de Santander se encontraban intervenidos por mantenimiento. Por lo que se optó por llevar a cabo un análisis próximo a las muestras, como método alternativo para conocer los poderes caloríficos correspondientes; no obstante, debido a los factores aleatorios como el margen de error que pueda tener el horno mufla en cuanto a la exactitud de temperatura de trabajo con respecto a la mostrada por el medidor, la humedad presente en el ambiente ventilado dentro del laboratorio y la exactitud del tiempo de las muestras dentro del horno pudieron generar un margen de error considerable pero difícil de determinar sin tener la posibilidad de contar con un objeto confiable de comparación como debió ser la bomba calorimétrica.

A pesar de lo anterior expresado, se encontraron datos coherentes entre los resultados finales de los poderes caloríficos y los resultados internos dentro de cada actividad del proceso llevado a cabo bajo la norma ASTM D5142-02a. Con ello se apreció que la mejor opción de torrefacción dentro de las variables establecidas para el estudio corresponde a un proceso de 20 minutos a una temperatura de 200°C, pues allí se encontró el mayor poder calorífico de todas las muestras y, contrario a lo que se esperaba, esta propiedad termoquímica arrojó resultados significativamente más pequeños en las pruebas de 30 minutos y aún más a mayor temperatura.

Paralelo al proceso de torrefacción llevado a cabo, también se estudió el poder calorífico de una muestra de la misma mezcla, pero sin torrefactar con el objetivo de comprender si llevar a cabo este proceso valió realmente la pena o no, con lo que al compararlos se observó un poder calorífico de aproximadamente 15,4 MJ/Kg mientras que para la biomasa torrefactada un valor de aproximadamente 15,8 MJ/Kg.

Cabe aclarar que las fórmulas seleccionadas para conocer el poder calorífico tanto de la biomasa torrefactada como la que no se torrefactó presentan un margen de error de aproximadamente 8% para la primera y una desviación de 1,482 MJ/Kg para la segunda, respectivamente, según los autores de los artículos mencionados en la Actividad 8 en el capítulo correspondiente al diseño metodológico; se resalta que la razón de haber seleccionado las ecuaciones mencionadas corresponde al hecho de que estas no requerían del porcentaje de hidrógeno contenido a las muestras pues, no se contó con los equipos necesarios para llevar a cabo dicha medición. Por lo tanto, estos en adición a los errores de tipo aleatorios mencionados previamente correspondientes a los datos hallados dentro del análisis próximo se hace difícil conocer un valor concreto y acertado sobre el verdadero poder calorífico de ambos casos (antes y después de la torrefacción), sin embargo, la diferencia que se encontró en los dos valores anteriormente mencionados, a pesar de que parece pequeña, dentro de la investigación se aprecia que no vale la pena torrefactar, pues el aumento en el poder calorífico se considera muy pequeño en comparación al costo del proceso de torrefacción.

Teniendo en cuenta la evaluación técnica, económica y ambiental, se observó que los datos obtenidos no correspondieron a una eficiencia óptima, con lo que se consideró que, muy probablemente, con una reestructuración del estudio y con los equipos adecuados, pueden conseguirse resultados con un mejor nivel de claridad, al menos conociendo los márgenes de error presentes.

Finalmente, se realizó la comparación de las propiedades energéticas entre el carbón vegetal y el pellet seleccionado, donde se observó una diferencia bastante considerable pues, ya que el poder calorífico del carbón vegetal varía dependiendo de la parte del eucalipto de la cual se extraiga la materia prima, en todos los casos, los poderes caloríficos que se pueden estimar aproximadamente para el carbón vegetal, están entre 24,8 y 28,24 MJ/Kg mientras que el obtenido para el mejor pellet se encuentra aproximadamente a 15,77 MJ/kg lo que, a pesar de la difusividad de los datos obtenidos, sigue siendo bastante pequeña contra la biomasa proveniente del eucalipto.

Por otra parte, se comprendió que la energía aprovechable de la biomasa proveniente de la postcosecha del cacao es tan pequeña que no merece la pena, si quiera, realizar una comparación contra el costo de la obtención y producción del carbón vegetal.

## 6. Conclusiones

Se determinó que para llevar a cabo un proceso de pelletización efectivo a partir de materia prima molida extraída de la postcosecha del cacao, se requiere aproximadamente un 40,5% de agua, en mezclas que contengan aproximadamente 10, 20 o 30% de aglomerante de almidón de yuca, de plátano o fécula de maíz.

Se seleccionó el tipo de pellet que ofrece las mejores características tanto mecánicas como fisicoquímicas que, bajo las condiciones de trabajo de esta investigación, correspondió a la mezcla de proporción de 10% de almidón de Yuca sin torrefactar.

Se observó que, tras la evaluación técnica, económica y ambiental, los equipos y procesos para producción y obtención del pellet a partir de la postcosecha del cacao, utilizados en esta investigación, son ineficientes para producir resultados en los que, si quiera, se pueda considerar un nivel de exactitud.

Se estableció que, tras la comparación entre las propiedades de la biomasa producto de la postcosecha del cacao y del carbón vegetal, la primera no es una alternativa viable en términos energéticos a la producción del segundo tipo de biomasa, respectivamente.

## 7. Recomendaciones

Como se aprecia en las evidencias registradas en los anexos, y como se mencionó desde el comienzo de este estudio, el método para moler la materia prima fue manual, mediante un equipo que, a pesar de que cumplió con su función, se recomienda usar uno más eficiente, que produzca un grano todavía más fino y se garantice una mejor calidad de pellet, evitando así espacios de aire dentro del cuerpo del mismo y se pueda ofrecer entonces un mejor desempeño dentro del análisis próximo.

Se recomienda que, para llevar una investigación de este tipo, se cuente con todos los equipos necesarios para cada uno de los diferentes estudios para obtener una mejor calidad de resultados en cuanto a precisión y certeza en los márgenes de error, además de cumplir con todos los factores a evaluar propuestos, llegando así a respuestas más sólidas y concretas. Se recomienda el uso de equipos como una bomba calorimétrica, o en su defecto, una máquina de análisis de compuestos para tener un análisis próximo mejor desarrollado y, a partir del cual, se tenga la posibilidad de seleccionar una ecuación para el poder calorífico más eficiente, tanto por el autor que la planteo como por los datos a usar en la misma.

Se recomienda que, si se desea continuar con esta investigación, se replantee el diseño de los experimentos y se tenga un mayor nivel de rigurosidad en cuanto a las condiciones del laboratorio donde esta se vaya a realizar, con el fin de disminuir los factores aleatorios que puedan influir en un aumento del margen de error.

Se recomienda que, si se continúa con esta investigación, se tenga en cuenta que los resultados no proporcionarían una solución a la problemática planteada con respecto a las plantaciones de eucalipto, sino solo un conocimiento con respecto a las propiedades de la biomasa proveniente de la postcosecha del cacao.

### Referencias Bibliográficas

- A.R. Villamizar-Jaimes, L. J. López-Giraldo, “Cáscara de cacao fuente de polifenoles y fibra: simulación de una planta piloto para su extracción”, *Respuestas*, vol. 22, no. 1, pp. 75-83, 2017.
- Comité de cafeteros de Santander (2012), Importancia de la actividad cafetera en el departamento de Santander. URL [https://santander.federaciondecafeteros.org/fnc/nuestros\\_cafeteros/category/118](https://santander.federaciondecafeteros.org/fnc/nuestros_cafeteros/category/118)
- Computadoras (2017), Análisis técnico económico. URL. <http://www.salohogar.com/ciencias/tecnologia/computadoras/analiseconomicoytecnico.htm>
- Contexto Ganadero (2013), Cacaoteros de Santander conforman una nueva cadena productiva. URL <https://www.contextoganadero.com/regiones/cacaoteros-de-santander-conforman-nueva-cadena-productiva>
- El Espectador (2019), El cacao: un alimento que llevó paz a zonas donde antes había guerra. URL. <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/el-cacao-un-alimento-que-llevo-paz-zonas-de-colombia-donde-antes-habia-guerra-articulo-891618>
- Estufas Top (2018), ¿Qué son los pellets? URL. <https://estufastop.com/que-son-los-pellets/>
- EUMED (2017), Consecuencias de los Monocultivos de Eucalipto. URL <http://www.eumed.net/libros-gratis/2009a/495/Consecuencias%20de%20los%20monocultivos%20de%20eucaliptos.htm>
- Fondo financiero del sector agropecuario (2017), Inteligencia del mercado: CACAO. URL [https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/ficha\\_cacao\\_version\\_ii.pdf](https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/ficha_cacao_version_ii.pdf)
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE (2016), Calidad del combustible: Normas ISO/UNE. URL. <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biomasa/calidad-del-combustible>
- Instituto Politécnico Nacional. Caracterización del poder calorífico de la biomasa residual de cacao CCN51 mediante procesos de gasificación anaeróbico y termoquímico; *Científica*, vol. 22, núm. 2, pp. 113-123; 2018;
- La F. M. (2019), Cacao de Santander: Uno de los mejores del mundo. URL. <https://www.lafm.com.co/economia/cacao-de-santander-uno-de-los-mejores-del-mundo>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2014), Bioenergía y seguridad alimentaria Evaluación rápida: Manual de usuario de Carbón Vegetal, Sección 1. URL <http://www.fao.org/3/a-bp846s.pdf>
- Ospina, C., Hernández, R., Rodas, C., Urrego, J., Godoy, J., Aristizabal, F., Osorio, O., Riaño, N. (2006), *El Eucalipto: Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona Andina colombiana*, 6.

Red de desarrollo Sostenible (2016), Monocultivos y conflictos socio-ambientales “Desiertos Verdes”.

URL. <https://www.rds.org.co/es/novedades/monocultivos-y-conflictos-socio-ambientales>

Tienda Biomasa (2019), Qué son los pellets. URL <https://tiendabiomasa.com/pellet>

Valverde J., Arias D., Campos R., Guevara M. Caracterización física y química del carbón de tres segmentos de fuste y ramas de *Eucalyptus camadulensis* Dehnh. Proveniente de plantaciones dendroenergéticas. Revista Forestal Mesoamericana Kurú (septiembre, 2018) 15 (Supl. 01): 16-24.

## Apéndices

**Apéndice A. Evidencia fotográfica trituración de materia prima**





## **Apéndice B. Descripción detallados del procedimiento que se llevó a cabo para determinar el porcentaje de humedad estandarizado para la investigación.**

En primer lugar, se consideró mezclar la materia prima solamente con agua, variando las proporciones de esta segunda. Por lo tanto, para comenzar se realizaron los siguientes procedimientos:

- A una masa de materia prima seca de 270g se le agregó humedad en un 11,11% (30g de agua aprox.) con el fin de obtener 300g de masa húmeda en un 10%.

- A 300g de materia prima seca se les agregó humedad en un 10% de su masa inicial para tener un total de 330g húmedos en un 9,09%.

- Se procede a juntar las dos masas anteriores para obtener un total de 630g húmedos en un 9,52% (570g de materia prima seca y 60 g de agua).

- Debido a que la masa total aún se percibe bastante granulosa y suelta, se procede a continuar humedeciendo los 630g obtenidos previamente, con una cantidad de agua correspondiente al 10% de la masa total (63g) obteniendo 693g de cacota húmeda en un 17,74%.

- Posteriormente, de la masa resultante en el paso anterior, se extraen 200g que se mezclan con 20 g de agua (10% de la cacota húmeda) para obtener 220g de masa húmeda en un 25,21%.

- A los 220g con 25,21% de humedad se les agrega agua en un 10% de la masa total (22g) obteniendo así 242g de materia húmeda en un 32,01%.

Con las masas preparadas en los pasos anteriores se procede a realizar la primera fase de los experimentos para determinar la composición adecuada para la correcta fabricación de los pellets.

En cada uno de los experimentos de todas las fases se llevan a cabo las respectivas variaciones de los componentes correspondientes a cada mezcla, tanto de agua, como de aglomerante, de forma que la masa resultante se introduce en la máquina peletizadora y de esta se analiza el producto.

### **Primera fase: Cacota Molida – Agua**

#### ***Experimento 1***

*Condiciones:* Se toman como muestra los 630g de materia prima con 9,52% de humedad

*Elementos:* Cacota molida, agua.

*Apariencia:* Bastante suelta.

*Peletizado:* No se observa ninguna forma de pellet aparente. Materia prima extraída igual como se introdujo.

#### ***Experimento 2***

*Condiciones:* se tienen de muestra 693g de materia prima húmeda en 17,74%

*Elementos:* Cacota molida, agua.

*Apariencia:* Bastante suelta.

*Peletizado:* No se observa ninguna forma de pellet aparente. Materia prima extraída igual como se introdujo.

#### ***Experimento 3***

*Condiciones:* Se toman como muestra los 220g con 25,21% de humedad.

*Elementos:* cacota molida, agua.

*Apariencia:* Bastante suelta. Empiezan a aparecer los primeros grumos.

*Peletizado:* Por resultados anteriores se infiere que, según la apariencia, no es posible llevar a cabo un peletizado exitoso.

#### **Experimento 4**

*Condiciones:* Se toman de muestra los 242 g de materia prima con 32,01% de humedad.

*Elementos:* Suelta, aparecen más grumos y se percibe un poco más de consistencia.

*Peletizado:* Cacota extraída se aprecia igual que como se introdujo. Sin embargo, la caída de esta a través de la máquina peletizadora fue mucho más lenta que en los intentos anteriores. Se cree que las vibraciones y la velocidad de giro del disco pueden pulverizar cualquier forma de pellet que se genere.

#### **Experimento 5**

*Condiciones:* A los 242 g de materia prima con 32.01% de humedad se les agrega agua en un 10% del total de la masa. Obteniendo 266,2g de masa total húmeda en un 38,19%

*Elementos:* Cacota – agua

*Apariencia:* Suelta, se percibe más consistente, aunque ya no se aprecian grumos. Se compacta fácilmente con la mano.

#### **Análisis de resultados**

A pesar de que observe un aumento en la consistencia de la cacota molida al aumentar el porcentaje de agua en la mezcla, al llegar al porcentaje del último experimento se infiere que la estructura de la cacota molida no cambiará al estar húmeda, de manera que al secarse volverá a su apariencia inicial, apreciándose de forma similar a un talco. Con lo que se establece el agregar más agua no tendrá mayor efecto en la cacota molida, y de tenerlo, los pellets tendrían una estructura tan débil, que de secarse perderán completamente su forma.

#### **Segunda Fase: Almidón de Plátano**

##### **Experimento 1**

- A los 266,2g de masa húmeda en un 38.19% se le agrega harina de plátano como aglomerante en un 10% de la masa total. Aproximadamente 27g. Sin adicionar agua.

- Ahora se tiene una masa compuesta por aproximadamente 101.7g de agua, 27g de harina de plátano y 164,52g de cacota. Es decir, una masa total de 293.2g húmeda en un 34.68% y compuesta en un 9.2% de almidón de plátano.

*Elementos:* Agua, cacota, almidón de plátano.

*Apariencia:* Bastante suelta.

*Peletizado:* Apariencia no apta para procedimiento.

### **Experimento 2**

A los 293,2 g de mezcla se procede a agregarles agua en un 10% del total de la masa, aproximadamente 29 g de agua. Se espera que la estructura de la masa ahora sí cambie al contactarse con el agua. De manera que el porcentaje total de agua resulta estar en un 40.5% y de almidón de plátano en un 8,38%.

*Elementos:* Agua, cacota, almidón de plátano.

*Apariencia:* Suelta, grumosa, más robusta.

*Peletizado:* Exitoso. Surge la primera tanda de pellets.

### **Experimento 3**

Se toman 300g de cacota molida seca y se le agrega aglomerante de plátano en un 20% de la masa total de la cacota seca. Es decir, 360g de mezcla con aglomerante en 16,66%. Posteriormente se adiciona agua, de manera que la masa total al final tenga una humedad correspondiente al 40,5%.

Para conocer la cantidad exacta de agua, se procede a seguir el siguiente cálculo patrón con el cual se calcula el agua en los experimentos posteriores, tal que:

$$360 \text{ g} + m_{H_2O} = m_T \quad (1)$$

$$\frac{m_{H_2O}}{m_T} = 40,5\% \quad (2)$$

Se reescribe la ecuación 1

$$360 \text{ g} + 0.405m_T = m_T \quad (1)$$

$$360 \text{ g} = 0.595m_T$$

$$m_T = 605,042 \text{ g}$$

$$m_{H_2O} = 245.04 \text{ g}$$

*Elementos:* Agua, almidón de plátano, cacota.

*Apariencia:* Grumosa, consistente, grano grande.

*Peletizado:* Exitoso, pellets irregulares, gomosos. Debido a que por causas del proceso de molido de la cacota se obtuvo un grano más grande, el agua se mezcló más con el almidón de plátano que con la misma cacota.



**Experimento 4**

Se toman 200 g de cacota molida seca y se mezclan con aglomerante de plátano en un 39% de la masa de la cacota (60g) para obtener 260 g de biomasa con aglomerante en un 25,07%. Ya que la proporción de agua adicionada previamente ha funcionado para la correcta fabricación de los pellets, se procede a continuar agregándola tal que su proporción corresponda a un 40,5% de la masa total, siguiendo el anterior cálculo patrón. Es decir, 177 g de agua, aproximadamente.

*Elementos:* Agua, cacota, almidón de plátano.

*Apariencia:* Grumosa.

*Peletizado:* Exitoso.

**Análisis de resultados**

Con el 10% y con el 30% de aglomerante se usaron granos más finos que con el 20% de este. De manera tal que se consiguió una mezcla más homogénea entre los 3 componentes de la mezcla y una mejor calidad de compactación.

**Tercera fase: Almidón de yuca.*****Experimento 1***

Se tomaron 200 g de cacota molida seca a los que se les añade aglomerante en un 10% del total de la masa (20g) obteniendo así 22g con 9,09% de aglomerante. Se añade agua, tal que su masa corresponda al 40,5% del total de la mezcla.

*Elementos:* agua, almidón de yuca, cacota.

*Apariencia:* Uniforme, consistente.

*Peletizado:* Exitoso.

***Experimento 2***

*Condiciones:* a 200g de cacota molida seca se les agrega 40 g de yuca (20%) y agua en un 40,5% del total de la masa final.

*Elementos:* Cacota, agua, almidón de yuca.

*Apariencia:* grumosa, consistente.

*Peletizado:* Exitoso, sin embargo, se observan pellets más frágiles que con el 10% de aglomerante.

**Experimento 3**

*Condiciones:* a 200g de cacota molida seca se les añade el 30% de su masa en almidón de yuca (60g). Se adiciona agua en un 40,5% del total de la masa.

*Elementos:* agua, cacota, almidón de yuca.

*Peletizado:* Exitoso.

**Cuarta fase: Fécula de maíz.****Experimento 1**

*Condiciones:* a 200g de cacota molida seca se les añade 20 g (10%) de fécula de maíz y agua en un 40,5% del total de la mezcla.

*Apariencia:* uniforme, consistente.

*Peletizado:* Exitoso.

**Experimento 2**

*Condiciones:* a 200 g de CMS (cacota molida seca) se les añade 40 g (20%) de fécula de maíz y agua en un 40,5% del total de la mezcla.

*Apariencia:* uniforme, consistente.

*Peletizado:* Exitoso.

**Experimento 3**

*Condiciones:* a 200 g de CMS se les agrega 60 g (30%) de fécula de maíz y agua en un 40,5% del total de la mezcla.

*Apariencia:* uniforme, consistente.




*Peletizado:* Exitoso.




**Apéndice C. Evidencia fotográfica sobre determinación del porcentaje de agua a utilizar (sin aglomerante).**








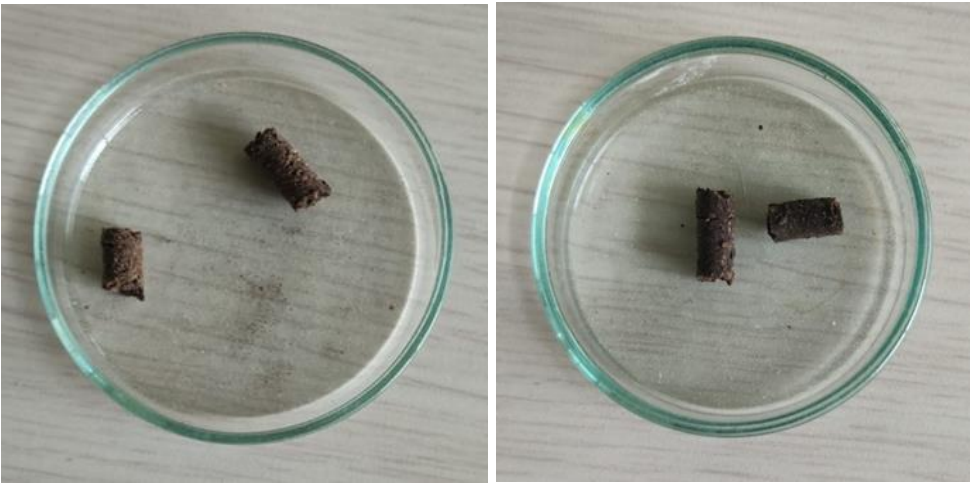
**Apéndice D. Tabla fotográfica de pellets de cada mezcla, clasificados según el porcentaje de aglomerante**

|                     | Aglomerante     | % en masa | Registro fotográfico   |
|---------------------|-----------------|-----------|--|
| Muestras de Pellets | Almidón de Yuca | 10        |    |
|                     |                 | 20        |   |
|                     |                 | 30        |  |

|                     |                |    |  |
|---------------------|----------------|----|--|
| Muestras de Pellets | Fécula de maíz | 10 |    |
|                     |                | 20 |   |
|                     |                | 30 |  |

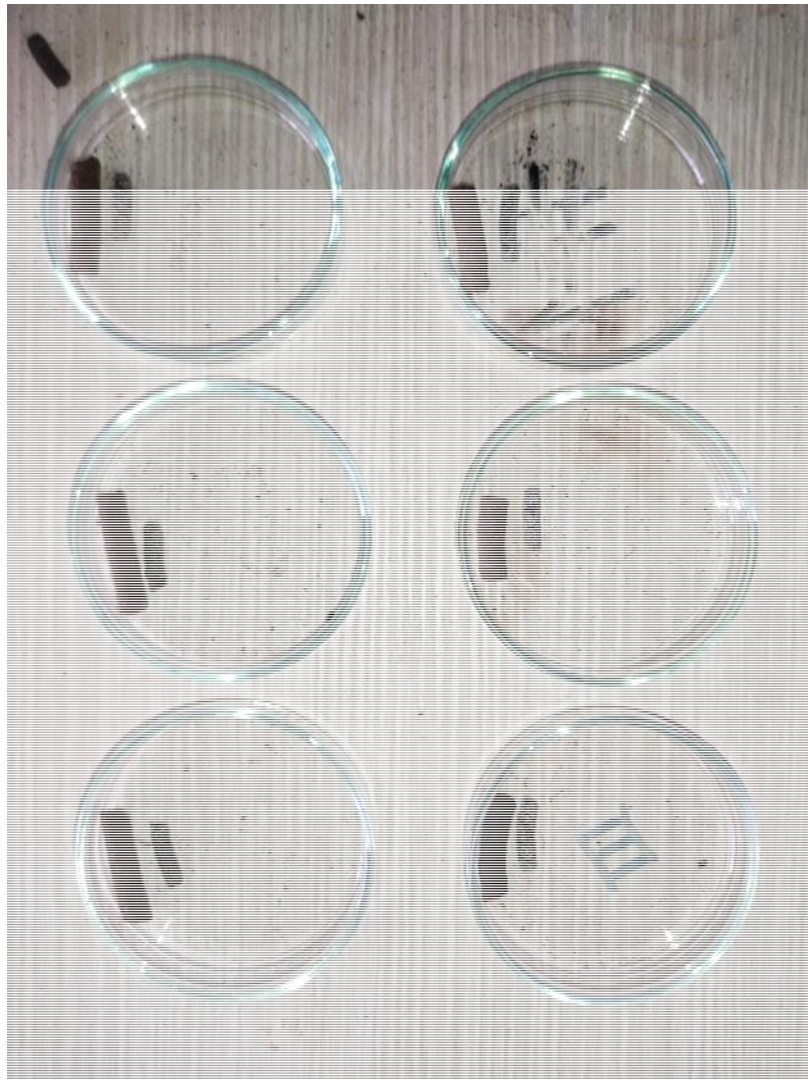
|                     |                    |    |  |
|---------------------|--------------------|----|--|
| Muestras de Pellets | Almidón de Plátano | 10 |    |
|                     |                    | 20 |   |
|                     |                    | 30 |  |

**Apéndice E. Evidencia fotográfica de prueba de resistencia al impacto**

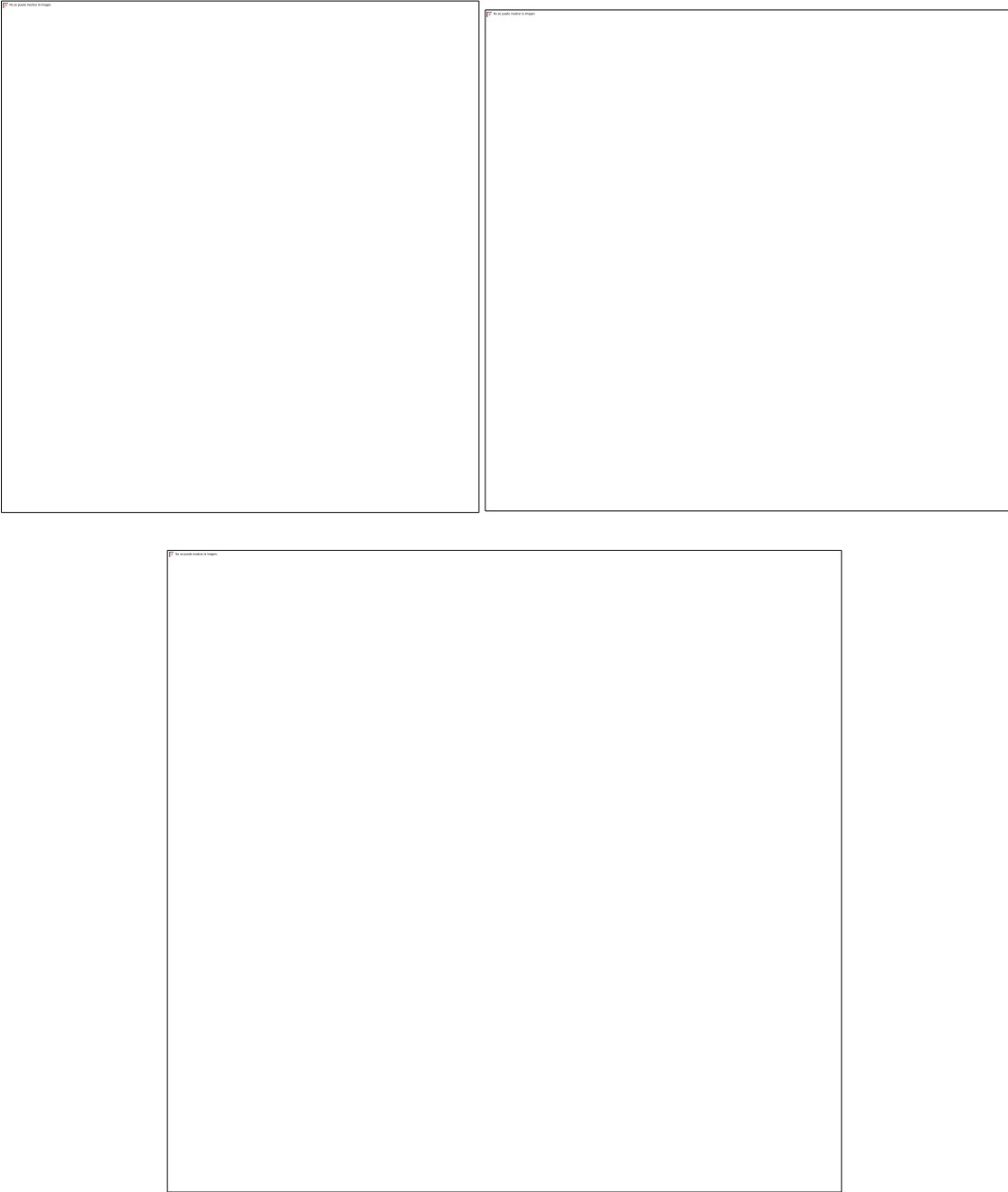


### Apéndice F. Evidencia fotográfica de los pellets torrefactados

Se aprecia un gradual cambio de color en los pellets más grandes, haciéndose cada vez más oscuros. Los pequeños corresponden a los pellets luego de perder material volátil.



### Apéndice G. Evidencia fotográfica de los pellets tras pruebas de secado, de pérdida de material volátil y de ceniza



### Apéndice H. Conversión de datos de pérdida de masa (prueba de impacto) a valores entre 1 y 5 para establecer la calificación

La calificación se determinó mediante el siguiente cálculo patrón que se aplicó para las demás muestras. Si la mayor calificación es 5, esta equivale a que se mantuvo el 100% de la masa del pellet al finalizar la prueba. Ya que el porcentaje que se registró en la tabla fue el opuesto, es decir, el correspondiente a la masa perdida y no restante, se tiene que:

$$m_{perdida} = 45,71\% \quad (3)$$

$$m_{restante} = 100\% - m_{perdida} \quad (4)$$

Se aplica regla de 3, tal que

$$5 \rightarrow 100\%$$

$$x \rightarrow m_{restante} = 54,29\%$$

$$x = 2,7$$

Se aplicó para cada una de las muestras, tal como se ve reflejado en la siguiente tabla.

| <b>Conversión de datos</b> |       |       |       |       |       |       |      |       |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| <b>Masa perdida</b>        | 45,71 | 48,34 | 10,67 | 61,22 | 18,99 | 42,38 | 37,7 | 47,41 | 33,12 |
| <b>Masa restante</b>       | 54,29 | 51,66 | 89,33 | 38,78 | 81,01 | 57,62 | 62,3 | 52,59 | 66,88 |
| <b>Calificación</b>        | 2,7   | 2,6   | 4,5   | 1,9   | 4,1   | 2,9   | 3,1  | 2,6   | 3,3   |