

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**“DESARROLLO DE PELLETS MEDIANTE DENSIFICACIÓN CON  
MEZCLAS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE COSTA RICA”**

**Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería  
Agrícola como requisito para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería Agrícola**

**Giancarlo Montero Borbón**

**Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes**

**San José, Costa Rica**

**2016**

Esta tesis fue aceptada por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado y título de Licenciatura en Ingeniería Agrícola.

---

Ing. Kattia Solís Ramírez, D.Sc.  
Directora de tesis

---

Dr. Carlos Rojas, Ph.D.  
Miembro, Equipo Asesor

---

Ing. Pedro Casanova Tetro, D.Sc.  
Miembro, Equipo Asesor

---

Ing. Geovanni Carmona Villalobos  
Presidente, Tribunal Examinador

---

Ing. Hubert Morris Grainger  
Miembro, Tribunal Examinador

---

Giancarlo Montero Borbón  
Estudiante

## **DEDICATORIA**

A mis padres por su apoyo incondicional y sus consejos para hacer de mí una mejor persona.

A mi familia y en especial mi hermano Carlos que hace tres años guía mis pasos desde el cielo.

A Dios por darme sabiduría y perseverancia en momentos difíciles, finalmente a todas esas personas que han sido parte de mi vida y que sin ustedes no sería la persona que soy.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia a Pedro Casanova Treto por la confianza depositada en mi persona, por ser mi mentor y llenarme de valores como el respeto, responsabilidad y entrega en cada trabajo realizado. Gracias por cada consejo, cada regañada y lo más importante la confianza, amistad y entrega con mi persona.

A Kattia Solís y Carlos Rojas por el apoyo brindado en la presente investigación, por siempre creer en el trabajo realizado y confiar desde un inicio en mí persona para desarrollar el presente estudio. A Pedro Rojas que mediante la Unidad de Recursos Forestales me brindó su apoyo incondicional.

A mis compañeros de Ingeniería Agrícola por su apoyo incondicional, por todas las vivencias que recorrimos juntos y sobre todo por permitirme disfrutar la universidad y llenarme de gratos recuerdos. A la generación de Ingeniería Agrícola y Biosistemas por su apoyo y amistad.

A la Escuela de Ingeniería Agrícola y en especial a Ricardo Radulovich por siempre estar anuente a las necesidades que presentamos como estudiantes y brindar su apoyo.

A Eduardo Rojas del taller de Ingeniería Mecánica por brindar su ayuda en todo momento de la investigación, dando su criterio a los problemas que se presentaban con los equipos.

A la Universidad de Costa Rica por convertirse en mi segundo hogar, por hacer de mí una mejor persona y dejar una serie de recuerdos y anécdotas que siempre llevaré conmigo. A todos los que brindaron apoyo, consejos y su mano amiga de forma desinteresada, siempre les guardaré un grato agradecimiento.

## ÍNDICE GENERAL

|  |      |
|--|------|
| RESUMEN .....  | xiii |
| INTRODUCCIÓN .....   | 1    |
| CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE.....   | 6    |
| 1.1 Situación energética mundial, consumo y surgimiento de bioenergías. ....             | 6    |
| 1.2 Energías renovables .....  | 8    |
| 1.3 Energía de la biomasa .....  | 10   |
| 1.4 Aprovechamiento energético de la biomasa .....                                       | 11   |
| 1.5 Descripción de pellets .....   | 13   |
| 1.6 Tecnologías de densificación de biomasa.....   | 15   |
| 1.7 Tecnologías de pelletizado.....  | 16   |
| 1.7.1 Tornillos extrusores a compresión.....   | 16   |
| 1.7.2 Densificadoras de pistón.....  | 18   |
| 1.7.3 Densificadora de rodillos.....   | 20   |
| 1.8 Elaboración de pellets a nivel de laboratorio .....                                  | 21   |
| 1.9 Estudio de las propiedades físicas, térmicas y fisicoquímicas de los pellets .....   | 22   |
| 1.9.1 Propiedades físicas .....  | 22   |
| 1.9.2 Propiedades térmicas.....  | 23   |
| 1.9.3 Propiedades fisicoquímicas .....   | 25   |
| 1.10 Normativa internacional para pellets elaborados con residuos agroindustriales ..... | 26   |
| CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE CASO.....   | 30   |
| 2.1 Contexto del cultivo de piña en Costa Rica .....                                     | 30   |
| 2.2 Problemática de los residuos del cultivo de piña .....                               | 33   |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.3 Contexto del cultivo de café en Costa Rica .....        | 35        |
| 2.4 Residuos del procesamiento del cultivo de café .....    | 38        |
| <b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....</b>                        | <b>42</b> |
| 3.1 Pruebas preliminares .....                              | 42        |
| 3.2 Recolección de residuos .....                           | 43        |
| 3.3 Elaboración de pellets en el laboratorio .....          | 44        |
| 3.3.1 Acondicionamiento de broza de café .....              | 44        |
| 3.3.2 Acondicionamiento de rastrojo de piña .....           | 47        |
| 3.4 Equipo para la elaboración de pellets .....             | 48        |
| 3.5 Tratamiento de pellets después de pelletizado .....     | 49        |
| 3.6 Metodología empleada en la elaboración de pellets ..... | 50        |
| 3.7 Caracterización de los pellets .....                    | 52        |
| 3.7.1 Propiedades físicas: .....                            | 52        |
| 3.7.2 Propiedades térmicas .....                            | 56        |
| 3.7.3 Propiedades fisicoquímicas .....                      | 59        |
| 3.8 Análisis estadístico de los datos .....                 | 61        |
| <b>CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>              | <b>62</b> |
| 4.1 Tratamientos seleccionados para la investigación .....  | 62        |
| 4.2 Propiedades físicas .....                               | 63        |
| • 4.2.1 Densidad unitaria .....                             | 64        |
| • 4.2.2 Densidad aparente .....                             | 72        |
| • 4.2.3 Dureza mecánica .....                               | 79        |
| • 4.2.4 Friabilidad .....                                   | 87        |

|   |     |
|---|-----|
| 4.3 Propiedades térmicas.....                       | 94  |
| 4.4 Propiedades fisicoquímicas.....                 | 102 |
| • 4.4.1 Contenido de cenizas.....                   | 102 |
| • 4.4.2 Poder calorífico .....                      | 110 |
| • 4.4.3 Análisis último, proximal y de metales..... | 116 |
| CONCLUSIONES .....                                  | 122 |
| RECOMENDACIONES.....                                | 124 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                    | 126 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Consumo de energía primaria en el año 2014.....   | 7  |
| Figura 2. Principio de funcionamiento de tornillos extrusores a compresión. ....                            | 18 |
| Figura 3. Principio de funcionamiento de densificadora de pistón .....                                      | 19 |
| Figura 4. Principio de funcionamiento de densificadora de rodillos. ....                                    | 21 |
| Figura 5. Pelletizadora de rodillos y sus componentes.....  | 22 |
| Figura 6. Equipo de laboratorio para determinación de conductividad térmica de pellets...                   | 24 |
| Figura 7. Destino de la piña costarricense nivel mundial .....  | 32 |
| Figura 8. Aporte de rastrojo y corona de piña en biomasa seca de piña así como energía primaria.....        | 35 |
| Figura 9. Pruebas preliminares en rastrojo de piña.....   | 42 |
| Figura 10. Recolección de broza de café en planta de procesamiento. ....                                    | 43 |
| Figura 11. Recolección de residuos agrícolas de campo de piña.....  | 44 |
| Figura 12. Prensado mecánico de broza de café.....  | 45 |
| Figura 13. Diagrama de flujo de acondicionamiento de broza de café.....                                     | 46 |
| Figura 14. Equipos utilizados en el pretratamiento de biomasa. ....   | 47 |
| Figura 15. Pelletizadora de rodillos KL120B. ....   | 48 |
| Figura 16. Pruebas de calibración para pelletizadora de rodillos KL120B. ....                               | 49 |
| Figura 17. Variación de contenido de humedad en pellets de piña después de pelletizado.                     | 50 |
| Figura 18. Resumen de tratamientos realizados a las biomosas. ....  | 51 |
| Figura 19. Determinación de densidad aparente en pellets. ....  | 52 |
| Figura 20. Determinación de densidad unitaria en pellets.....   | 53 |
| Figura 21. Determinación de la dureza mecánica en pellets.....  | 54 |
| Figura 22. Determinación de la friabilidad en pellets.....  | 55 |
| Figura 23. Equipo utilizado para determinación de propiedades térmicas en pellets.....                      | 56 |
| Figura 24. Densidad unitaria obtenida para las diferentes biomosas estudiadas y tratamientos evaluados..... | 64 |



|  |     |
|--|-----|
| Figura 25. Densidad aparente obtenida para las diferentes biomosas estudiadas y tratamientos evaluados.....    | 72  |
| Figura 26. Dureza mecánica obtenida para las diferentes biomosas estudiadas y tratamientos evaluados. ....     | 80  |
| Figura 27. Friabilidad obtenida en los diferentes tratamientos evaluados para las diferentes biomosas.....     | 87  |
| Figura 28. Perfil de temperatura para determinación de propiedades térmicas con equipo experimental.....       | 95  |
| Figura 29. Contenido de cenizas obtenida para las diferentes biomosas estudiadas y tratamientos evaluados..... | 103 |
| Figura 30. Poder calorífico obtenido para las diferentes biomosas estudiadas y tratamientos evaluados. ....    | 110 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Normativa NF EN 14961-2 de combustibles sólidos .....                                 | 29 |
| <b>Tabla 2.</b> Estimaciones de biomasa húmeda/seca y energía primaria por tipo de sector .....       | 37 |
| <b>Tabla 3.</b> Estimación de biomasa seca/húmeda por RAO y energía primaria.....                     | 39 |
| <b>Tabla 4.</b> Tratamientos aplicados a cada biomasa según contenido de humedad y tamaño de .....    | 63 |
| <b>Tabla 5.</b> Densidad unitaria obtenida para la biomasa de piña.....                               | 65 |
| <b>Tabla 6.</b> Comparación de medias de la densidad unitaria en pellets de rastrojo de piña.....     | 66 |
| <b>Tabla 7.</b> Densidad unitaria obtenida para la biomasa de broza de café.....                      | 67 |
| <b>Tabla 8.</b> Comparación de medias de la densidad unitaria en pellets de broza de café .....       | 68 |
| <b>Tabla 9.</b> Densidad unitaria obtenida para la mezcla .....                                       | 68 |
| <b>Tabla 10.</b> Comparación de medias sobre densidad unitaria a pellet de rastrojo de piña .....     | 69 |
| <b>Tabla 11.</b> Comparación de medias de la densidad unitaria en pellets de las diferentes .....     | 70 |
| <b>Tabla 12.</b> Densidad aparente obtenida para la biomasa de piña .....                             | 73 |
| <b>Tabla 13.</b> Comparación de medias de la densidad aparente en pellets de rastrojo de .....        | 74 |
| <b>Tabla 14.</b> Densidad aparente obtenida para la biomasa de broza de café.....                     | 74 |
| <b>Tabla 15.</b> Comparación de medias de la densidad aparente en pellets de broza de café.....       | 75 |
| <b>Tabla 16.</b> Densidad aparente obtenida para la mezcla rastrojo de piña y broza de café.....      | 76 |
| <b>Tabla 17.</b> Comparación de medias de la densidad aparente en pellets de mezcla rastrojo de ..... | 77 |
| <b>Tabla 18.</b> Comparación de medias de la densidad aparente en pellets de las diferentes .....     | 78 |
| <b>Tabla 19.</b> Dureza mecánica obtenida para la biomasa de piña .....                               | 81 |
| <b>Tabla 20.</b> Comparación de medias de la dureza mecánica en pellets de rastrojo de piña ...       | 81 |
| <b>Tabla 21.</b> Dureza mecánica obtenida para la biomasa de broza de café.....                       | 82 |
| <b>Tabla 22.</b> Comparación de medias de la dureza mecánica en pellets de broza de café.....         | 83 |
| <b>Tabla 23.</b> Dureza mecánica obtenida para la mezcla.....   | 83 |
| <b>Tabla 24.</b> Comparación de medias de la dureza mecánica en pellets de rastrojo de piña ...       | 84 |
| <b>Tabla 25.</b> Comparación de medias de la dureza mecánica en pellets de las diferentes .....       | 85 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 26.</b> Friabilidad obtenida para la biomasa de piña .....                                     | 88  |
| <b>Tabla 27.</b> Comparación de medias de la friabilidad en pellets de rastrojo de piña.....            | 89  |
| <b>Tabla 28.</b> Friabilidad obtenida para la biomasa de broza de café.....                             | 89  |
| <b>Tabla 29.</b> Comparación de medias de la friabilidad en pellets de broza de café .....              | 90  |
| <b>Tabla 30.</b> Friabilidad obtenida para la mezcla rastrojo de piña y broza de café.....              | 91  |
| <b>Tabla 31.</b> Comparación de medias de la friabilidad en pellets de mezcla rastrojo de piña y .....  | 92  |
| <b>Tabla 32.</b> Comparación de medias de la friabilidad en pellets de las diferentes biomosas .        | 93  |
| <b>Tabla 33.</b> Propiedades térmicas para pellets elaborados con rastrojo de piña, conductividad ..... | 96  |
| <b>Tabla 34.</b> Comparación de medias de conductividad térmica en pellets de rastrojo de piña .....    | 97  |
| <b>Tabla 35.</b> Propiedades térmicas para pellets elaborados con broza de café, conductividad          | 97  |
| <b>Tabla 36.</b> Comparación de medias de la conductividad térmica en pellets de broza de café .....    | 98  |
| <b>Tabla 37.</b> Propiedades térmicas para pellets elaborados con broza de café y rastrojo de....       | 99  |
| <b>Tabla 38.</b> Comparación de medias de la conductividad térmica en pellets de la mezcla ..           | 100 |
| <b>Tabla 39.</b> Comparación de medias de la conductividad térmica en pellets de las diferentes .....   | 101 |
| <b>Tabla 40.</b> Contenido de cenizas obtenidas para la biomasa de piña .....                           | 104 |
| <b>Tabla 41.</b> Comparación de medias del contenido de cenizas en pellets de rastrojo de piña .....    | 104 |
| <b>Tabla 42.</b> Contenido de cenizas obtenidas para la biomasa de broza de café.....                   | 105 |
| <b>Tabla 43.</b> Comparación de medias del contenido de cenizas en pellets de broza de café .           | 106 |
| <b>Tabla 44.</b> Contenido de cenizas obtenidas para la mezcla rastrojo de piña y broza de café .....   | 106 |
| <b>Tabla 45.</b> Comparación de medias del contenido de cenizas en pellets de mezcla rastrojo de .....  | 107 |
| <b>Tabla 46.</b> Comparación de medias de contenido de cenizas en pellets de las diferentes ..          | 108 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 47.</b> Poder calorífico obtenido para la biomasa de piña .....  | 111 |
| <b>Tabla 48.</b> Comparación de medias de poder calorífico en pellets de rastrojo de piña.....  | 111 |
| <b>Tabla 49.</b> Poder calorífico obtenido para la biomasa de broza de café.....  | 112 |
| <b>Tabla 50.</b> Comparación de medias de poder calorífico en pellets de broza de café .....  | 113 |
| <b>Tabla 51.</b> Poder calorífico obtenido para la mezcla rastrojo de piña y broza de café .....  | 113 |
| <b>Tabla 52.</b> Comparación de medias del poder calorífico en pellets de mezcla rastrojo de piña .....   | 114 |
| <b>Tabla 53.</b> Comparación de medias de poder calorífico en pellets de las diferentes biombras .....  | 115 |
| <b>Tabla 54.</b> Comparación de valores obtenidos en análisis último, próximo y de metales para pellets de rastrojo de piña y broza de café con valores requeridos según la normativa. .... | 118 |

## RESUMEN

Se realizó el estudio del desarrollo de pellets mediante densificación con mezclas de residuos agrícolas de Costa Rica, en primera instancia se estudió mediante una revisión bibliográfica el estado actual del desarrollo nacional y mundial de la tecnología de pellets con fines energéticos. Posteriormente se estudiaron las principales biomásas en Costa Rica con alta disponibilidad y potencial energético que pueden ser utilizadas para la producción industrial de pellets.

En base a la información anterior se seleccionaron dos residuos agrícolas, el rastrojo de piña y la broza de café para la elaboración de pellets, además se obtuvieron pellets de la mezcla de ambos residuos agrícolas en una proporción 50:50 en masa de cada residuo. Los pellets se obtuvieron bajo distintos tratamientos como contenido de humedad (25 %, 35 % y 45 % bh), tamaño de partícula (4,75 mm, 9,50 mm y el tamaño propio del residuo cuando fue recolectado) y tipo de biomasa (rastrojo de piña, broza de café y la mezcla de los residuos anteriores).

En cuanto a propiedades físicas se obtuvieron en densidad unitaria y densidad aparente valores entre los 1,09 kg/dm<sup>3</sup> a 1,32 kg/dm<sup>3</sup>, 555,30 kg/m<sup>3</sup> a 578,23 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. En el caso de friabilidad y dureza mecánica se encontraron resultados con valores entre 0,89 a 0,99 y 92,29 % a 98,33 % respectivamente, valores que cumplen con las exigencias de la norma NF EN 14961-2. Respecto a las propiedades térmicas se obtuvieron valores de conductividad térmica de 0,214 W/m·K a 0,338 W/m·K, difusividad térmica con valores de  $0,989 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s a  $3,483 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s. Finalmente el calor específico reportó valores en el rango de 1,680 kJ/kg·K a 3,904 kJ/kg·K.

En el caso del poder calorífico los valores obtenidos para los diferentes tratamientos superan el valor mínimo recomendado por la norma NF EN 14961-2 de combustibles sólidos con valores de 17 128 kJ/kg a 17 716 kJ/kg, el contenido de cenizas fue de 4,13 % a 9,84 % (b.s). En base al análisis último, próximo y de metales con respecto a su comparación con las exigencias de la norma NF EN 14961-2, los pellets elaborados

con broza de café son de mayor calidad en comparación a los elaborados con rastrojo de piña al cumplir todos los parámetros que exige la normativa.

## INTRODUCCIÓN

Según García (2011) la matriz energética de los países de América Latina y el Caribe es en comparación con otras regiones del mundo una de las de mayor componente renovable; aun así en el año 2009 cerca de las tres cuartas partes de su estructura correspondieron a combustibles fósiles; y los estudios recientes de prospectiva energética no auguran mayor variación durante los próximos 25 años.

La fuente energética que representan los combustibles fósiles es la más utilizada por el ser humano en sus actividades diarias, siendo un pilar fundamental para el desarrollo del mismo. Sin embargo los combustibles fósiles son recursos que debido a su alta demanda mundial son cada vez más escasos llevando a crisis de abastecimiento y acercando más al límite de agotar este recurso, como el caso del petróleo.

En este entorno, ni el petróleo ni ninguno de los otros combustibles fósiles, como el carbón mineral y el gas natural, son recursos ilimitados. El efecto combinado de la demanda creciente y los recursos que se agotan exige controlar de cerca la situación energética. Otras razones de necesitar un conocimiento profundo de la oferta y demanda de la energía son la dependencia, seguridad y eficiencia energética, así como los aspectos ambientales (IEA, 2007).

La problemática de los combustibles fósiles presentada anteriormente junto con la componente de contaminación por la emisión de gases de efecto invernadero hace que autoridades encargadas a nivel mundial del tema energético busquen soluciones e iniciativas de cómo solucionar este problema, siendo las energías renovables su principal foco de atención.

Se consideran energías renovables a aquellos recursos no fósiles de períodos de formación relativamente cortos o continuos, es decir que bajo un régimen de explotación racional, su disponibilidad no disminuye con el tiempo (García, 2011).

Las energías renovables en la actualidad son foco de estudio ante la problemática con los tradicionales combustibles fósiles, el concepto de bioenergías es cada vez más común con el surgimiento de múltiples proyectos de investigación en busca de su desarrollo.

Para la región de América Central, las tecnologías de energía renovable a pequeña escala representan una alternativa económica y ambiental factible para la provisión de energía a comunidades rurales remotas y para la expansión de la capacidad eléctrica instalada, ya sea por medio de sistemas aislados o por proyectos conectados a la red eléctrica. La región cuenta con suficientes recursos para desarrollar sistemas hidráulicos, solares, eólicos y de biomasa, principalmente (BUN-CA, 2002).

Según BUN-CA (2002) el término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego.

Según Arauz (2011) las actividades agropecuarias ocupan 1 800 000 hectáreas, lo que equivale al 35,3 % del territorio nacional. De estas, alrededor de 500 000 hectáreas están dedicadas a cultivos, por diferencia, se estima que 1 300 000 hectáreas están dedicadas a pastos, ya que no hay un dato estadístico reciente sobre este particular. En estas tendencias destaca el rápido aumento del área dedicada al cultivo de piña, que pasó de 28 000 hectáreas en 2007 a 45 000 hectáreas en 2010, el área total dedicada a cultivos aumentó en 16 153 hectáreas del 2010 al 2011, a pesar de disminuciones en áreas dedicadas a banano, naranja y melón. Este incremento se debe al aumento de área sembrada de caña de azúcar, palma aceitera, hortalizas, raíces y tubérculos y granos básicos, principalmente arroz.



Con respecto a la cobertura del sector agropecuario al tercer trimestre del 2015, las exportaciones alcanzaron un monto de 3 346,4 millones de dólares un 3,1 % menor a las del mismo período del 2014. Estas exportaciones representaron un 46,4 % del monto total exportado por el país; el sector agrícola aportó un 26,5 % al total de las ventas nacionales al exterior, la industria agroalimentaria un 15,0 %, el sector pesca y pecuario un 3,4 %, mientras que la industria química y maquinaria aportó un 1,0 % y la industria agromanufacturera un 0,5 % (Mora & Borbón, 2015).

La información anterior nos muestra el alto potencial de Costa Rica en generación de biomasa, cultivos como piña, palma aceitera, arroz, café y residuos forestales son grandes generadores de biomasa residual. Esta biomasa representa un alto potencial energético para las industrias que pueden aprovechar la biomasa mediante combustión directa, obteniendo múltiples beneficios por el aprovechamiento de un recurso que anteriormente no tenía ningún valor. La combustión directa de biomasa se beneficia mediante la densificación, este proceso culmina con la conversión de la biomasa en pellets.

Los pellets son cilindros granulados y compactados, elaborados a partir de restos forestales naturales y de subproductos provenientes del procesamiento mecánico de la madera, como aserrín, virutas y astillas. Este material es secado y homogenizado disminuyendo su humedad, para posteriormente pasar por un proceso de molido. La harina producida es comprimida a alta presión y pasada por una matriz para formar pellet. Para su elaboración, debido a la alta presión y temperatura del proceso la lignina presente en la madera realiza la función de ligante natural (DGE Bruxelles, 2012).

Las energías renovables son la principal solución para la generación de energía, contribuyendo a eliminar la dependencia total de combustibles fósiles, estas son conocidas como energías limpias además de solventar el problema anterior hacen uso de recursos que antes no presentaban valor alguno, como el caso de residuos agrícolas lo cual da un valor agregado a incentivar su uso.

La energía de la biomasa es una energía que además de solventar la dependencia absoluta de combustibles fósiles viene a solucionar otro gran problema a nivel mundial como es el manejo de residuos que generan gran contaminación. La bioenergía viene a solventar este problema en sectores de producción como el agrícola, industrial y forestal que presentan grandes inconvenientes en el manejo adecuado de sus residuos, siendo la energía de la biomasa una potencial herramienta.

La energía de la biomasa se considera neutra en emisiones de dióxido de carbono, la biomasa utilizada proveniente del sector agrícola y forestal presenta la característica que mediante su desarrollo tuvo absorción de dióxido de carbono durante los procesos de fotosíntesis esto hace que se llegue a un equilibrio entre la cantidad de dióxido de carbono liberada en el proceso de combustión directa y el dióxido de carbono fijado o absorbido en el desarrollo de la biomasa.

El presente trabajo de investigación plantea el uso de dos residuos del sector agrícola costarricense con gran potencial energético y alta disponibilidad del recurso, con la finalidad de ser utilizados como materia prima en la generación de pellets. Se pretende realizar pellets en laboratorio de mezclas de diferentes biomásas, posteriormente realizar toda su caracterización que comprende análisis de propiedades generales de los pellets y un análisis más detallado de propiedades físicas y químicas.

La investigación tiene como finalidad el desarrollo de energía de la biomasa a partir de desechos o residuos con origen en diferentes sectores productivos de Costa Rica, residuos que no presentan ningún tipo de valor y generan inconvenientes para su manejo, de ahí la importancia de la investigación en una nueva fuente de energía que permite además el manejo adecuado de residuos provenientes de diferentes sectores.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Elaborar pellets con mezclas de dos residuos agrícolas de Costa Rica para su aprovechamiento energético.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Conocer las principales fuentes de biomasa en Costa Rica con potencial para producción industrial de pellets.
2. Seleccionar dos residuos biomásicos de Costa Rica con alta disponibilidad y poder energético para la elaboración de pellets.
3. Elaborar pellets con mezclas de dos residuos agrícolas de Costa Rica a nivel de laboratorio bajo distintos escenarios de producción.
4. Evaluar los pellets por medio de propiedades físicas y químicas, respecto a las normativas internacionales de calidad.

## **CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE**

### **1.1 Situación energética mundial, consumo y surgimiento de bioenergías.**

La producción y el uso de energía representan dos tercios de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI), lo que significa que los compromisos contraídos en la COP21 deberán aportar recortes drásticos de dichas emisiones y al mismo tiempo, mantener el crecimiento de la economía mundial, impulsar la seguridad energética en el mundo y proporcionar energía moderna a los miles de millones que hoy todavía carecen de ella (IEA, 2015).

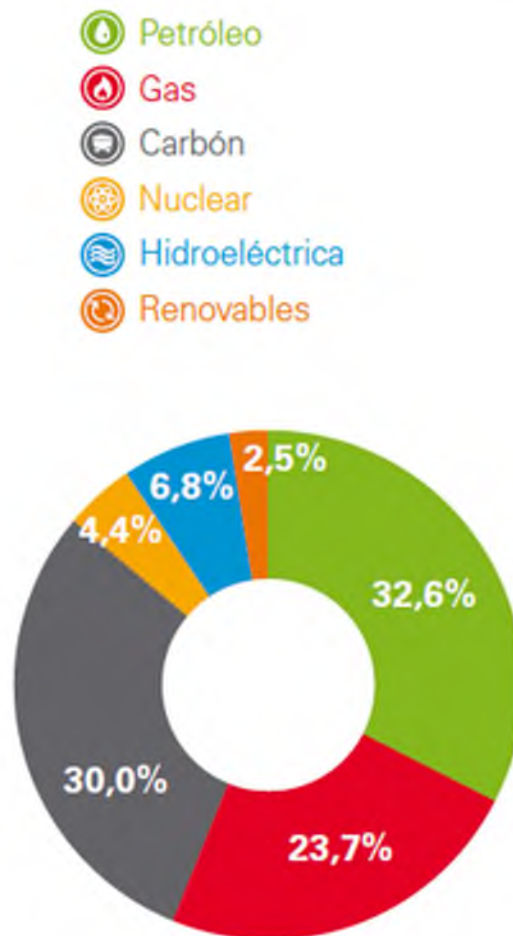
El uso de fuentes energéticas de baja emisión de CO<sub>2</sub> se está extendiendo con rapidez y hay signos de que el crecimiento de la economía mundial y el de las emisiones relacionadas con la energía tal vez estén empezando a divergir. La economía mundial creció en torno a un 3 % en 2014, pero las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) relacionadas con la energía permanecieron estables, siendo la primera vez en 40 años como mínimo que se constata semejante fenómeno fuera de una crisis económica. Las renovables representaron casi la mitad de toda la capacidad de generación eléctrica nueva en 2014, liderada por el crecimiento en China, Estados Unidos, Japón y Alemania, con inversiones que siguen siendo elevadas (270 000 millones USD) y costos que continúan cayendo (IEA, 2015).

La intensidad energética de la economía mundial decayó un 2,3 % en 2014, más del doble de la tasa media de caída durante la última década, como resultado de la mejora de la eficiencia energética y de los cambios estructurales en algunas economías como China. En torno al 11 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía se registra en áreas en las que existe comercio de emisiones (con un precio medio de \$7 por tonelada de CO<sub>2</sub>), mientras que el 13 % de esas emisiones se produce en mercados con subvenciones para el uso de combustibles fósiles (un incentivo equivalente a una media de \$115 por tonelada de CO<sub>2</sub>). Se advierten algunos signos alentadores en ambos frentes, como la reforma inminente del Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea y el

hecho de que países como la India, Indonesia, Malasia y Tailandia estén aprovechando la oportunidad que ofrece la bajada de los precios del petróleo para reducir las subvenciones a los combustibles fósiles, recortando el incentivo al derroche de energía (IEA, 2015).

En cuanto al mix energético mundial, el consumo de todos los combustibles creció hasta alcanzar niveles récord en todos sus tipos, exceptuando la energía nuclear. A continuación el siguiente gráfico muestra el consumo de energías primarias:

### Consumo de energía primaria mundial 2014



**Figura 1.** Consumo de energía primaria en el año 2014. Fuente: (BP, 2015).

Así, el petróleo continuó siendo el principal combustible del mundo representando el 32,6 % del mix energético aunque perdió cuota de mercado por 15° año consecutivo. Por su parte, se observó un estancamiento del crecimiento del consumo de carbón (0,4 %) debido al cambio de tendencia en la economía productiva china y un débil crecimiento mundial del gas natural (+0,4 %) debido a una caída de consumo gracias al invierno suave en Europa durante 2014. Por otro lado, las energías renovables fueron las que crecieron con más rapidez y representaron un tercio del incremento total del uso de energía primaria durante un año en el que el crecimiento del consumo de este tipo de energía se ralentizó. Aun así, solo representaron el 3 % de la energía primaria (BP, 2015).

El despliegue de tecnologías en energías renovables ha visto un notable crecimiento en las últimas décadas, con el apoyo de políticas que las permitan y logren reducciones de los costos empinados. Energía mejorada en seguridad, menos impactos adversos del cambio climático y acceso a la energía en general son ampliamente vistos como motivaciones para este aumento. El caso del negocio para las energías renovables se refuerza aún más por los beneficios socioeconómicos que se pueden obtener (IRENA, 2015).

Acelerar la transición a un sistema energético basado en las energías renovables representa una oportunidad única para cumplir con los objetivos climáticos, mientras alimenta el crecimiento económico, la creación de nuevas oportunidades de empleo y mejorar el bienestar humano (IRENA, 2015).

## **1.2 Energías renovables**

Según Merino (2009) entre las distintas fuentes de energía, las renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana, aunque habría que decir que, para fuentes como la biomasa, esto es así siempre que se respeten los ciclos naturales. El sol está en el origen de todas las energías renovables porque su calor provoca en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de la energía eólica. El sol ordena el ciclo del agua, causa la evaporación que predispone la formación de nubes y, por tanto, las lluvias. También del sol procede la energía hidráulica.

Las plantas se sirven del sol para realizar la fotosíntesis, vivir y crecer. Toda esa materia vegetal es la biomasa. Por último, el sol se aprovecha directamente en las energías solares, tanto la térmica como la fotovoltaica.

Entre las principales tipos de energías renovables tenemos la energía solar, energía eólica, hidráulica, energía de la biomasa, energía mareomotriz, energía geotérmica que González (2009) las describe de la siguiente manera:

- Energía solar: Corresponde a la energía transportada por las ondas que el sol irradia.
- Energía eólica: Es la energía generada a partir del movimiento de los vientos.
- Energía hidráulica: Consiste en la energía obtenida al aprovechar la energía potencial de la acumulación de grandes masas de agua.
- Energía de la biomasa: Definida como la energía almacenada en las masas vegetales producto de la fotosíntesis.
- Energía mareomotriz: Es la energía obtenida del movimiento de las olas y mareas.
- Energía geotérmica: Se refiere a la energía en forma de calor obtenida del interior de la Tierra.

Entre las energías renovables destaca el uso de productos obtenidos a partir de materia orgánica para producir energía. Estos productos componen lo que se denomina comúnmente “biomasa”, una definición que abarca un gran grupo de materiales de diversos orígenes y con características muy diferentes. Los residuos de aprovechamientos forestales y cultivos agrícolas, residuos de podas de jardines, residuos de industrias agroforestales, cultivos con fines energéticos, combustibles líquidos derivados de productos agrícolas, residuos de origen animal o humano, etc., todos pueden considerarse dentro de la citada definición (IDAE, 2007).

### **1.3 Energía de la biomasa**

Para la mayoría de la población mundial, las formas más familiares de energía renovable son las que provienen del sol y del viento. Sin embargo existen otras fuentes como la energía de la biomasa, ejemplos de biomasa como leña, carbón de leña, cascarilla de arroz, proveen un alto porcentaje de la energía consumida en el mundo y tienen potencial para suplir mayores volúmenes (BUN-CA, 2002).

Desde la prehistoria, la forma más común de utilizar la energía de la biomasa ha sido por medio de la combustión directa: quemándola en hogueras a cielo abierto, en hornos y cocinas artesanales e, incluso, en calderas; convirtiéndola en calor para suplir las necesidades de calefacción, cocción de alimentos, producción de vapor y generación de electricidad (BUN-CA, 2002).

Según Ramírez, Carazo, Roldán, & Villegas (2007) entre las principales fuentes de biomasa se encuentran: forestales (restos de aserrío, restos de ebanistería, restos de plantaciones, leña); agropecuarios (cáscara y pulpa de frutas y vegetales, cáscara y polvo de granos secos (arroz y café), estiércol, residuos de cosechas, tallos y hojas (bagazo, cáscaras, maleza, pastura, caquis, aserrín); industriales (pulpa y cáscara de frutas y vegetales, residuos de procesamiento de carnes, aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales, grasas y aceites vegetales, desechos lácteos) y urbanos (aguas negras, desechos domésticos orgánicos (cáscaras y vegetales) y basura orgánica (madera).

Según IDAE (2007) el uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles comúnmente utilizados, supone unas ventajas medioambientales de primer orden, como son:

- Disminución de las emisiones de azufre.
- Disminución de las emisiones de partículas.
- Emisiones reducidas de contaminantes como CO, HC.
- Ciclo neutro de CO<sub>2</sub>, sin contribución al efecto invernadero.



- Reducción del mantenimiento y de los peligros derivados del escape de gases tóxicos y combustibles en las casas.
- Reducción de riesgos de incendios forestales y de plagas de insectos.
- Aprovechamiento de residuos agrícolas, evitando su quema en el terreno.
- Posibilidad de utilización de tierras de barbecho con cultivos energéticos.
- Independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles provenientes del exterior (no son combustibles importados).
- Mejora socioeconómica de las áreas rurales.

Estas ventajas convierten a la biomasa en una de las fuentes potenciales de empleo en el futuro, siendo un elemento de gran importancia para el equilibrio territorial, en especial en las zonas rurales.

#### **1.4 Aprovechamiento energético de la biomasa**

La finalidad del manejo adecuado de la biomasa es darle uso como fuente energética, se conocen tres formas de cómo aprovechar este recurso con fines energéticos, la combustión directa, la gasificación y pirolisis son los mecanismos con mayor desarrollo para satisfacer este objetivo.

Hay tres tipos de procesos que dependen de la cantidad de oxígeno presente en la transformación, según Ramírez et al. (2007) estos se describen de la siguiente manera:

- **Combustión:** se somete a la biomasa a altas temperaturas con un exceso de aire que depende de las características de los equipos y de la biomasa utilizada. Es el método más utilizado para la obtención de calor en industrias.
- **Pirólisis:** donde se somete a la biomasa altas temperaturas (alrededor de 500 °C) sin presencia de aire con el fin de producir carbón vegetal y obtener a la vez combustibles líquidos semejantes a los hidrocarburos.

- Gasificación: se somete a la biomasa a muy altas temperaturas en presencia de agua suficiente para ajustar un 20 % el contenido de humedad de la biomasa aproximadamente para que se realice de forma adecuada el proceso de gasificación, la presencia de aire es regulada según la capacidad del reactor.

Además de los procesos anteriores IRENA (2013) agrega el proceso de digestión anaeróbica que describe de la siguiente manera:

- Digestión Anaeróbica: proceso que tiene como medio material biológico que se descompone, el proceso se favorece por condiciones cálidas, húmedas y sin aire. Se obtiene un gas que se compone principalmente de metano y dióxido de carbono, este gas es conocido como biogás, y tiene múltiples aplicaciones como uso en motores de combustión interna.

La energía de la biomasa se utiliza para aplicaciones térmicas como producción de calor y agua caliente sanitaria son las más comunes dentro del sector de la biomasa. En un nivel menor de desarrollo se sitúa la producción de electricidad.

Las materias más utilizadas para las aplicaciones térmicas de la biomasa son los residuos de las industrias agrícolas (cáscaras de almendras, huesos de aceitunas...) y forestales (astillas, aserrines) y los residuos de actividades silvícolas (podas, claras, limpieza de bosques) y de cultivos leñosos (podas, arranques). En muchas ocasiones algunos de estos residuos se transforman en pelets y briquetas, astillas molturadas y compactadas que facilitan su transporte, almacenamiento y manipulación pero que requieren de un tratamiento previo encareciendo el producto final. Hay bolsas de pellets de hasta 15 kg disponibles en hipermercados o gasolineras, otras de mayor tamaño, denominadas "*big bag*", que pueden alcanzar los 1 000 kg, finalmente también pueden adquirirse a granel siendo transportados en camiones normales o en camiones cisterna hasta un silo de almacenamiento (IDAE, 2007).

## 1.5 Descripción de pellets

Según Codina (2010) la peletización es un proceso de compactación de material lignocelulósico de unas determinadas condiciones (granulometría pequeña y humedad inferior al 12 % bh) para obtener unos cilindros entre 6 y 30 mm de diámetro y entre 10 y 70 mm de longitud. La compactación facilita la manipulación, disminuye los costos de transporte y aumenta su valor energético por unidad de volumen. Además menciona para la fabricación de los pellets se requiere una materia prima con una humedad muy reducida (<12 % bh) y ausencia de impurezas (Codina, 2010).

Según IDAE (2012) la producción de pellets es un proceso sencillo en el que la única materia prima es el aserrín de conífera. No se añade ningún tipo de aditivo ni aglomerante al aserrín o biomasa, sus fases son secado, granulado, compactado, enfriado, tamizado y empaquetado. A continuación se describen las fases para la biomasa de aserrín según dicho autor:

- **Secado:** El aserrín húmedo se introduce en el secadero por medio de una banda porosa sinfín. El aire caliente se hace circular a través de esta banda y el aserrín se va secando. Al final de la banda porosa hay un aspirador que absorbe el aserrín con una humedad inferior al 10 % y deja pasar el que contenga una humedad superior. El aserrín absorbido pasa a la siguiente fase y el aserrín húmedo sigue en circulación en la banda porosa hasta que su humedad es inferior al 10 %.
- **Granulado:** El aserrín seco pasa al molino donde se homogeniza el grano del aserrín, consiguiendo así un aserrín con un tamaño de grano uniforme.
- **Compactado:** El aserrín se introduce en una matriz perforada y gracias a la acción de unos rodillos es obligado a pasar por unos agujeros de 6 mm de diámetro. Gracias a la presión ejercida por los rodillos y a la lignina contenida, se obtienen cilindros de aserrín prensado (pellets). La temperatura del aserrín triturado aumenta en la máquina pelletizadora y la lignina se derrite y aglutina el pellet cuando se enfría. De ahí que el pellet no presenta dureza hasta una vez enfriado.

- Enfriado: Después de la compresión, la temperatura de los pellets es alta (cercana a los 90 °C). El enfriado estabiliza los pellets y endurece la lignina. A partir de ahí los pellets adquieren gran consistencia.
- Tamizado: El polvo de la materia prima es separado y devuelto al proceso de pelletizado.
- Empaquetado: Si el pellet va a ser distribuido a granel, simplemente hay que almacenarlo en un lugar adecuado.

Entre las principales características y propiedades que se evalúan en los pellets tenemos: la forma, el aspecto, tamaño, densidad, humedad, friabilidad, composición química, poder calórico, potencia calórica, conductividad térmica, índices de calidad energética (Camps & Marcos, 2008).

Para IDAE (2012) usando este combustible se pueden calentar viviendas, naves industriales, invernaderos, hoteles etc., con equipos generadores de calor con eficiencias superiores al 90 % y totalmente automatizados. Además este autor nombra cuatro tipos de instalaciones en función del servicio que prestan:

- Instalaciones de estufas: para calentar pequeñas estancias como comercios, restaurantes, estudios, salas de estar, etc.
- Instalaciones de calderas domésticas: se utilizan para dar servicio de calefacción y agua caliente sanitaria a pisos, caseríos, hoteles rurales, chalets, viviendas unifamiliares, etc.
- Instalaciones de calderas de mediana potencia: proporcionan servicio de calefacción y agua caliente sanitaria a bloques de viviendas, edificios de oficinas, etc.
- Instalaciones de calderas industriales: se usan para generar calor en instalaciones ganaderas, industria, etc., y agua caliente sanitaria de pequeños municipios.

## **1.6 Tecnologías de densificación de biomasa**

Los mecanismos más comunes de densificación de biomasa, han sido adaptados a partir de otras tecnologías de procesamiento de alta eficiencia, como las de industrias de alimentos, tanto para humanos como animales y productos farmacéuticos. Entre los mecanismos anteriormente indicados se encuentran las pelletizadora, briqueteadoras, tornillos extrusores, empastilladoras y otros mecanismos aglomeradores. Los casos de las pelletizadora, briqueteadoras y tornillos extrusores, son los más empleados en densificación de biomasa para fines energéticos (Tumuluru, Wright, Kenny, & Hess, 2010).

Según Ortiz (2008) informa que en la actualidad se puede decir que se ha alcanzado un nivel tecnológico aceptable (en algunos países), y que a pesar que las tecnologías de densificación no están consolidadas como otros sectores tecnológicos, al día de hoy el desarrollo tecnológico permite abordar la fase industrial de densificación de biomasa con bastante solvencia.

Según el objetivo final que se quiera dar a la biomasa así será su proceso de densificación de la biomasa, si la necesidad es con fines energéticos se buscan procesos como pelletizado, briquetas, chips, además la diferencia entre que método de densificación de biomasa utilizar radica en el equipo para su aprovechamiento, por ejemplo del tipo y tamaño de la caldera de pellets. A continuación se describen las principales formas en las que se densifica la biomasa según Clarke & Preto (2011):

- Pellets: Poseen una alta densidad. Son más fáciles de manejar que otras biomásas densificadas, inclusive se usa infraestructura empleada en granos para su almacenamiento. Normalmente son cilíndricos con diámetros del orden del centímetro y largos superiores a los 3 cm.
- Briquetas: Son similares a los pellets pero con mayor tamaño. Las briquetas tienen diámetros de 2,5 cm o mayores, y están formados de biomasa altamente comprimida que pasa por una matriz, debido a la acción de un pistón o tornillos sinfín. Se emplea también matrices con calentadores para favorecer la compresión de la briqueta.

- Pacas: Es el método de densificación más común. Son hechas empleando maquinaria que comprime la biomasa en formas cuadradas, cúbicas o cilíndricas. Típicamente poseen dimensiones desde 1 m a 1,5 m. Las pacas cilíndricas son menos costosas de hacer, sin embargo las rectangulares o cúbicas normalmente son más fáciles de manejar y transportar.

- Cubos: Son más grandes que los pellets, menos densos y usualmente poseen forma cúbica. Tienen dimensiones entre 1 cm y 4 cm en ancho, y largos de hasta 10 cm. El proceso implica comprimir follajes residuales de pasturas con maquinaria especializada.

- Chips (astillas): Son empleados en muchas operaciones, desde labores en los hogares hasta aplicaciones en plantas generadoras de energía a gran escala. Los chips, son hechos por trituradoras y en términos energéticos son comparables con el carbón.

- Discos: Poseen diámetros superiores a los 7 cm. Son elaborados con equipo semejante a las briqueteadoras, pero sin una matriz de salida (como empastilladoras). Los discos tienen densidades similares a las de los pellets.

Según Ortiz (2008) el fundamento operativo del pelletizado se basa en la presión ejercida por una serie de rodillos sobre los residuos situados sobre una matriz metálica dotada de orificios de calibre variable. Los pellets de biomasa residual se fabrican a partir de un producto base con una humedad comprendida entre el 8 y 15 % bh y un tamaño de partícula del orden de 0,5 cm, tienen forma cilíndrica con diámetros que van desde 0,5 a 2,5 cm y de 1 a 3 cm de longitud.

En cuanto a pelletizadora se conocen tres mecanismos bastante desarrollados y aplicados para la densificación mecánica de biomasa y la obtención de pellets, estos mecanismos son tornillos extrusores a compresión, densificadoras de pistón y densificadoras de rodillos.

## **1.7 Tecnologías de pelletizado**

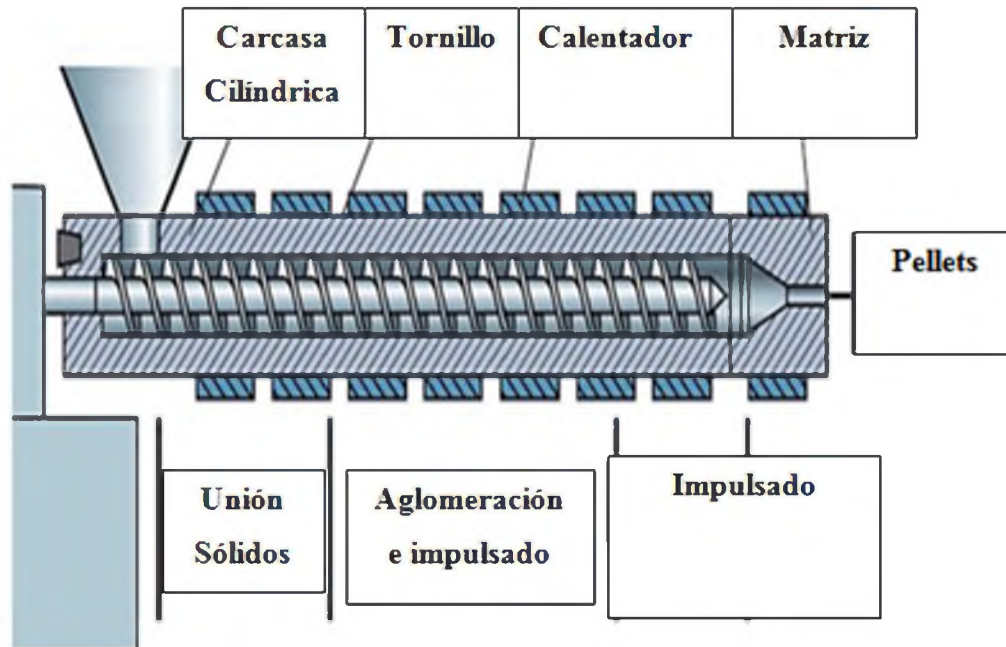
### **1.7.1 Tornillos extrusores a compresión**

La extrusión a tornillo es la más utilizada en la industria de la madera con varios proveedores de maquinaria para éste fin, lo más interesante de éstos sistemas es la integración con sistemas de aspirado y filtrado del aserrín y polvo de madera producido por el parque de máquinas de carpintería que ofrecen una solución en línea para eliminación de partículas del aire y eliminación eficiente del residuo. En este sistema por una tolva se alimenta con la materia prima un tornillo que comprime el aserrín contra una matriz o placa conformadora, que posee una abertura con el perfil que tendrá la sección final de la briqueta, es un proceso continuo que sigue con un canal enfriador que le da a la briqueta su compacidad final. Si bien estos sistemas pueden producir pellets, se han popularizado más para briquetas ya que la tecnología de pellets se orientó más hacia los sistemas que veremos más adelante. Muchas veces para ampliar el rango de partículas a emplear, se colocan trituradores en línea a la entrada del equipo (INTI, 2011).

Según Tumuluru et al. (2010) el proceso cuenta con la mayor demanda energética en la sección de unión de sólidos, aglomeración e impulsado, esto debido a la necesidad de vencer la fricción para mantener el movimiento de la biomasa. Conforme el material se acerca al sector de estrechamiento, se presenta la evaporación más acelerada de la humedad del material, lo que facilita la tarea de compresión del producto final. Entre las desventajas que presenta este tipo de máquinas pelletizadora respecto a otras, se encuentra la elevada potencia que requiere para funcionar si se compara por ejemplo con densificadoras de pistón.

El principio de funcionamiento para la elaboración de pellets se basa en la compresión de la biomasa por medio de un tornillo extrusor como su nombre lo indica, el proceso combina un movimiento giratorio del tornillo que realiza el transporte de la biomasa de forma longitudinal y la fricción que se da con la carcasa cilíndrica que esta a una temperatura adecuada para densificar, el material finalmente se lleva un punto en el cual es forzado a pasar por la matriz que formara los pellets según el diseño establecido. A continuación se muestra en la Figura 2 el principio de tornillos extrusores a compresión el

cual está compuesto por una carcasa, el tornillo extrusor de biomasa, el calentador así como la matriz que permite la forma final del pellet:



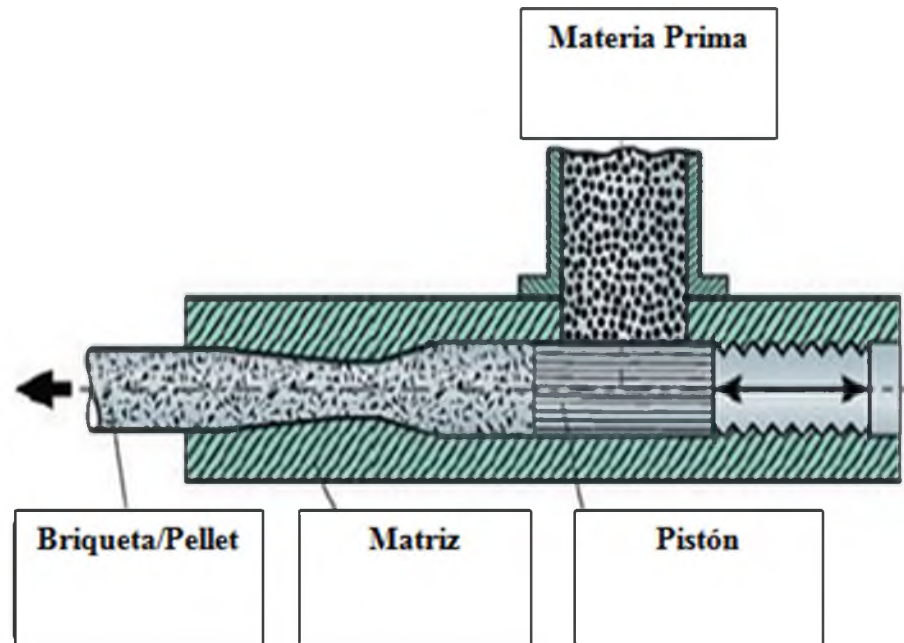
**Figura 2.** Principio de funcionamiento de tornillos extrusores a compresión. Fuente: (Tumuluru et al., 2010).

### 1.7.2 Densificadoras de pistón

Las compactadoras de pistón mecánico, la fuerza de compresión alcanza hasta los 2 000 kg/cm<sup>2</sup> para obtener comprimidos de alta densidad (superiores a 1 000 kg/m<sup>3</sup>), sin la adición de aglomerantes. Este tipo de prensas se utilizan típicamente para producción a gran escala con rendimientos que van de 200 kg/h a 2 500 kg/h. La pérdida de energía en la máquina es limitada, y el rendimiento en relación con el consumo de energético es óptimo. Además, la vida de funcionamiento de una prensa mecánica es considerablemente superior al de las prensas hidráulicas. En general, una prensa mecánica tiene un periodo de retorno de la inversión considerablemente más corto que el de las prensas hidráulicas (Tumuluru et al., 2010).



La Figura 3 muestra un diagrama del principio de funcionamiento de una pelletizadora de pistón, la cual está compuesta por una tolva que permite la alimentación de la materia prima, el pistón mecánico y la matriz que da forma final al pellet o briqueta.



**Figura 3.** Principio de funcionamiento de densificadora de pistón Fuente: (Tumuluru et al., 2010)

En ésta tecnología se utiliza un pistón dentro de un cilindro que comprime la materia prima contra una placa o matriz, que tiene un orificio con el perfil de la sección final de la briqueta que se desea obtener; es un método alternativo que puede ser alimentado por gravedad o por medio de un tornillo alimentador o un pistón de alimentación, como en el caso anterior, una sección de enfriamiento es necesaria para otorgarle al producto final las propiedades requeridas. Debido a las características del mismo permite su utilización con tamaños de partículas más grandes y heterogéneas, imposibles de utilizar en otros métodos, haciéndolo muy popular y al igual que el sistema

anterior permite la confección de briquetas huecas, las que poseen mayor facilidad para su combustión (INTI, 2011).

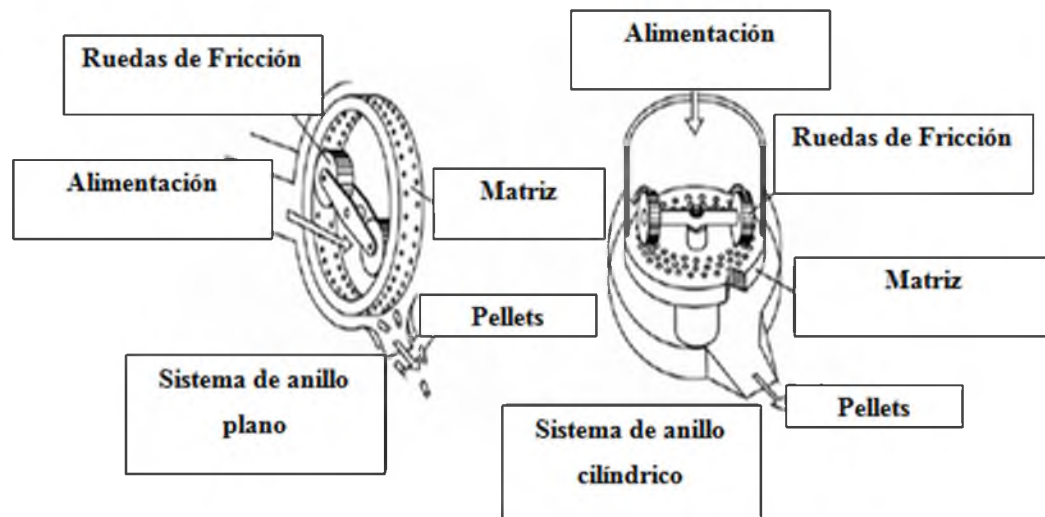
### 1.7.3 Densificadora de rodillos

Las densificadoras de rodillos se dividen en dos grandes grupos, anillo plano y anillo cilíndrico, a continuación se describe cada sistema:

Sistemas de anillo Plano: Son sistemas basados en un disco de metal perforado llamado matriz que está adosado al eje de un motorreductor que lo hace girar, fijado a la carcasa se encuentran dos ruedas de fricción que giran libres sobre su eje en contacto con el disco perforado, a su vez, éste eje puede desplazarse limitadamente para permitir cierto huelgo entre las ruedas y el disco y alojar el material pre-comprimido. Al hacer girar el disco e introducir el aserrín, el mismo se comprime contra el plato y comienza a introducirse en los orificios conformando los pellets, que son expulsados del otro lado del disco al alcanzar determinada longitud por medio de fuerza centrípeta; a continuación deben enfriarse para mantener su integridad. Estos sistemas son en general utilizados para equipos de poca producción y existen un gran número de proveedores en china y algunos en otras partes del mundo (INTI, 2011).

Sistemas de anillo cilíndrico: Con un sistema similar al anterior en funcionamiento, éstos sistemas poseen una matriz cilíndrica, o sea, un grueso cilindro de metal perforado en posición horizontal que gira haciendo que el aserrín introducido por un costado se pre-comprima contra unas ruedas de fricción que giran libres sobre sus ejes, los cuales se mantienen solidarios a la carcasa; esto hace que el material nuevo comprima al anterior obligándolo a introducirse en los orificios para conformar los pellets, los que nuevamente se desprenden al alcanzar cierto largo por fuerza centrípeta o contacto con la carcasa. Estos sistemas se utilizan para molinos de pellets de gran producción y son de una complejidad y costo superior a los anteriores, la gran mayoría de los productores se encuentran en Europa (INTI, 2011).

A continuación se muestra en la Figura 4 el sistema de anillo plano y anillo concéntrico en sistemas de pelletizado, ambos tipos de pelletizadora compuestas por sistema de alimentación, ruedas de fricción o rodillos que generan la compresión de la biomasa con la matriz, anillo plano o anillo cilíndrico, matriz y finalmente apertura para salida de pellets.



**Figura 4.** Principio de funcionamiento de densificadora de rodillos. Fuente: (INTI, 2011).

### 1.8 Elaboración de pellets a nivel de laboratorio

La elaboración de pellets a nivel de laboratorio se realiza en la mayoría de casos con sistemas cilindro-pistón que permite estudiar la fuerza de compresión, la temperatura de pelletizado así como el tamaño de partícula de la biomasa a densificar. Una tecnología más avanzada es el uso de pelletizadora tipo anillo concéntrico que permite pasar de ensayos de laboratorio a pruebas con carácter de producción industrial, para este estudio se utilizó una pelletizadora de rodillos que se describe a continuación.

Se utilizó la pelletizadora de anillo plano modelo KL120B, este tipo de pelletizadora permite estudiar diferentes biomásas, tamaños de partículas así como

contenidos de humedad. A continuación se muestra en la Figura 5 la pelletizadora de anillo plano utilizada en la presente investigación:



**Figura 5.** Pelletizadora de rodillos y sus componentes

El principio de funcionamiento de la pelletizadora se basa en dos rodillos de igual diámetro que tienen un sentido de giro inverso, debajo de los rodillos se encuentra la matriz perforada que presenta un espacio con los rodillos para el paso de la biomasa. Este espacio se gradúa según la biomasa, tamaño de partícula y compresión que se quiera dar a la biomasa. La forma final del pellet depende del diámetro de la matriz, el espaciamiento entre rodillos y matriz, la biomasa, tamaño de partícula y contenido de humedad.

De lo anterior podemos concluir que se debe estudiar la relación entre variables como contenido de humedad, tamaño de partícula, diferentes biomásas y el proceso de densificación con mezclas de biomásas. El proceso de densificación se evalúa mediante propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas de los pellets que permiten observar el efecto de las variables mencionadas anteriormente sobre la peletización.

## **1.9 Estudio de las propiedades físicas, térmicas y fisicoquímicas de los pellets**

### **1.9.1 Propiedades físicas**

Las propiedades físicas en los pellets son ampliamente estudiadas porque tienen una incidencia directa sobre el almacenaje de pellets y el transporte. Además son propiedades de fácil determinación, con equipos fáciles de utilizar y el tiempo de pruebas es corto por lo

cual se cuenta con amplia información bibliográfica del estudio de propiedades físicas de pellets. La bibliografía y estudios realizados se enfocan en densidad aparente, densidad real, friabilidad, dureza mecánica como propiedades para evaluar la calidad de los pellets.

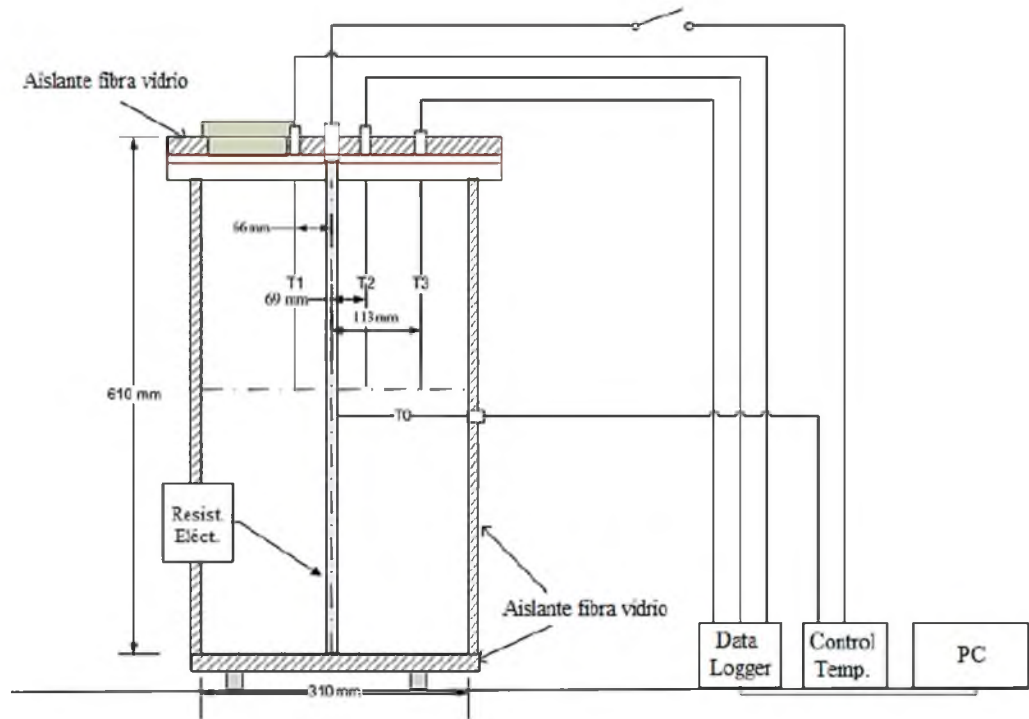
Lee et al. (2013) investigaron la dureza de pellets elaborados a partir de residuos de especies forestales (Alerce del Japón y Tulipero). En este caso se controlaron las condiciones de pelletizado como la granulometría, temperatura y tiempo de compresión. Nuevamente se encontró que la dureza aumenta con granulometrías menores, y si la temperatura aplicada y el tiempo de compresión aumentan.

Por su parte Soto & Nuñez (2008) estudiaron el efecto del uso de mezclas de residuos de carbonilla y aserrín sobre la friabilidad, la friabilidad se mantuvo relativamente constante desde la proporción de 10 % a 45 % de carbonilla, además se incluyen los valores para 100 % de aserrín (FR = 1,00) y 100 % de carbonilla (FR < 0,20), estableciéndose así resultados máximos y mínimos de friabilidad, respectivamente. Se acepta como “buena” una resistencia al golpeteo (friabilidad) con un valor de 0,93 o superior. Esto indica que al arrojar 100 pellet al suelo cerámico se obtienen sólo 7 pellets rotos en 2 partes; obteniéndolo cuando el porcentaje de carbonilla es de 47,5 %. Con una proporción mayor la friabilidad disminuye considerablemente.

### **1.9.2 Propiedades térmicas**

Conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico son las propiedades que se utilizan para caracterizar los pellets según la termodinámica en base a la bibliografía encontrada, generalmente estas propiedades se determinan con equipos de laboratorio confeccionados que permiten su determinación directa o indirecta como el caso de el calor específico.

Guo, Lim, Bi, Sokhansanj & Melin (2013) desarrollaron equipo para el análisis de las propiedades térmicas en laboratorio, conductividad térmica y calor específico de los pellets se puede determinar mediante el equipo que se muestra en la siguiente figura:



**Figura 6.** Equipo de laboratorio para determinación de conductividad térmica de pellets.  
Fuente: (Guo et al., 2013).

Sistemas como el anterior basan su funcionamiento en el principio del cilindro semi-infinito, este considera infinita la medida longitudinal del cilindro en referencia al diámetro. El modelo presenta una fuente de calor lineal ubicada en el centro del cilindro que se manifiesta en dirección radial hacia el exterior del cilindro.

El sistema anterior contempla el cambio de temperatura como función del tiempo, esto porque se trabaja con una resistencia interna que se considera no despreciable que producen los pellets, finalmente se proyecta un perfil radial de temperatura no constante debido al estado transitorio en que se encuentra el sistema.

Se registra la variación de temperatura en distintos puntos radialmente en el cilindro (por convención T0, T1, T2 Y T3 como lo muestra la figura anterior), mientras la temperatura de la fuente de calor (en este caso como resistencia eléctrica) va aumentando

progresivamente debido al flujo de corriente eléctrica que pasa a través de ella y que se refleja en el perfil radial de temperaturas.

Se encontraron perfiles lineales y crecientes de temperatura para los cuatro puntos de monitoreo, además, la conductividad térmica efectiva de los pellets se determinó alrededor de los 0,146 W/m·K a 0,195 W/m·K, y esta aumentó con tendencia lineal conforme es mayor el contenido de humedad de los pellets. Respecto a la medición del calor específico, se estimaron valores entre 1,074 kJ/kg·K a 1,253 kJ/kg·K para las muestras e intervalos ensayados, esto para el estudio realizado por Guo et al. (2013).

Este tipo de equipos se ha utilizado para mediciones en materiales diferentes a pellets, para granos de consumo humano Bitra, Banu, Ramakrishna, Narender, & Womac (2010) determinaron las propiedades térmicas de maní, nueces y otros granos para consumo humano.

Sistemas como los mencionados anteriormente basan su principio de funcionamiento en una muestra de referencia, mediante la cual se realizan mediciones de diferencia de calor que emite la muestra a evaluar respecto a la muestra de referencia bajo la misma metodología de condiciones experimentales

### **1.9.3 Propiedades fisicoquímicas**

La bibliografía estudiada muestra como propiedades de interés el poder calórico, contenido de cenizas, contenido de elementos inorgánicos, propiedades de combustión de pellets, metales pesados entre otras que son de suma importancia su estudio ya que permiten evaluar la calidad del pellet y su efecto en los sistemas de aprovechamiento de los mismos.

Soto & Nuñez (2008) estudiaron el poder calórico en base a mezclas de carbonilla y aserrín en donde encontraron que el valor máximo obtenido fue de 5 381,2 kcal/kg para la proporción de 50 % de carbonilla. Además consideran óptima la proporción de 47,5 % de carbonilla, puesto que es más resistente al golpeteo; en este punto se estableció un nivel de

tolerancia para la friabilidad de los pellets, con la finalidad de obtener una combustión más eficiente.

La determinación de poder calórico se basa en la normativa Norteamericana ASTM E711-87, o en su caso, normativa como la CEN/TS 14918 que es su equivalente en Europa que su principio es la bomba calorimétrica.

Respecto al contenido de cenizas tenemos normas como la ASTM E1534-93 o CEN/TS-4775 que es su equivalente en Europa que permiten su determinación. El contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno utilizan la norma CEN/TS 15104 o ASTM D5291-10 para su evaluación, la norma CEN/TS 15289 permite la determinación de cantidades de compuestos y elementos inorgánicos como el cloro y sulfuros.

#### **1.10 Normativa internacional para pellets elaborados con residuos agroindustriales**

Los residuos agroindustriales adecuados para su uso como combustible en calderas de biomasa son fundamentalmente los provenientes de las industrias de la producción de aceite de oliva y aceituna, de las alcoholeras y la uva, y de los frutos secos. En general, los proveedores suelen reducir su grado de humedad mediante procesos de secado con el objetivo de aumentar su poder calorífico inferior. Normalmente, son combustibles económicos y de buena calidad, aunque en algunos casos se debe prestar una especial atención a las distintas calidades de una misma biomasa (IDAE, 2009).

Según ekoheat (2014) las normas de calidad para los pellets especifican la cantidad permitida de contenido de humedad, así como la densidad y el nivel de abrasión requerido, a fin de establecer los valores precisos para que la caldera funcione con eficacia. Para lograr una buena combustión y asegurar que la caldera funcione de forma eficiente.

La calidad de los pellets y briquetas está directamente relacionada con sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Las propiedades físico-mecánicas determinan la calidad del material biomásico densificado durante el transporte y almacenamiento, y la composición química a su vez determina la capacidad energética de estos, la formación de



cenizas y emanación de sustancias no deseadas durante el proceso de combustión (Cabral et al., 2012).

Por su parte en base a los principales parámetros que regulan las normas de calidad para pellets Rojas (2004) menciona la regulación de valores como la densidad a granel, la densidad por unidad, el contenido de cenizas, el contenido de humedad, el poder calorífico, concentración de sustancias como azufre, nitrógeno y cloro, las normas utilizadas en los diferentes países productores a la fecha son bastante similares (Rojas, 2004).

Según Segura (2007) las principales normas europeas sobre pellet son las siguientes:

- Austria:
  - ✓ ÖNORM M 7135: especificaciones de los pellets y briquetas de madera con o sin corteza.
  - ✓ ÖNORM M 7136: Requerimientos de calidad de la logística y transporte de los pellets de madera.
  - ✓ ÖNORM M 7137: Requerimiento de calidad del almacenamiento del consumidor final de pellets de madera.
- Suecia:
  - ✓ SS 18 71 20 especifica tres clases de pellets en función del tamaño y de la cantidad de cenizas que generan.
- Alemania:
  - ✓ DIN 51731, de pellets y briquetas y la DIN Plus que es específica de pellets de gran calidad para calderas que sólo trabajan con pellets.
- Italia:
  - ✓ CTI R04/05 establece los parámetros de calidad de los pellets de biomasa con fines energéticos. Establece 4 categorías en función del origen.

También tenemos normativas para mercados como Estados Unidos, Australia, Noruega que se muestran a continuación según lo plantea Rojas (2004):

- ✓ En Austria, existe una norma uniforme para la elaboración de pellets y aglomerados (ÖNORM 7135). Esta señala que estos deben fabricarse solo de madera y no se permite el uso de agentes aglutinantes.
- ✓ La Sociedad Noruega para la Estandarización y la Construcción (NBS – Norges Bygging - og Standardiseringforbund, Oslo) está trabajando en la actualidad para responder a la pregunta de cómo generar una norma apropiada a los pellets. No existe aún una norma en vigencia, pero es posible que la normativa sueca sea introducida muy pronto en este país.
- ✓ En 1995 el Instituto de Combustible Pellets (PFI) estableció normas de carácter nacional para el combustible pellet de uso residencial. Esta norma es solo una recomendación no oficial propuesta por esta agrupación para la producción de este tipo de combustibles.

Para pellets de residuos agroindustriales se conoce una única norma que rige la calidad de los mismos y es la norma NF EN 14961-2 de combustibles sólidos la cual es originaria de Francia. Según ragt-energie (2016) esta norma se aplica a los pellets de madera y plantas y la misma se divide en 5 categorías:

Para pellets de madera:

- Calidad de la madera de alto rendimiento
- Estándar Calidad de la madera
- Calidad de la madera industrial

Para pellets agrícolas:

- Agro alta calidad Rendimiento
- Agro Calidad Industrial

A continuación se muestra una tabla resumen con los parámetros que evalúa la norma y los valores permitidos por la misma:

**Tabla 1.** Normativa NF EN 14961-2 de combustibles sólidos

| <b>Parámetro</b>  | <b>Madera de alta calidad rendimiento</b> | <b>Estándar Calidad de la madera</b> | <b>Madera de calidad industrial</b> | <b>Agro alta calidad rendimiento</b> | <b>Agro Calidad Industrial</b> |
|---|---|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Diámetro</b>   | 6 +/- 1mm                                 | 6 a 9 mm +/- 1mm                     | 6 a 8 mm +/- 1mm                    | 6 a 8 mm +/- 1mm                     | 6 a 16 mm +/- 1mm              |
| <b>Longitud</b>   | $3,15 \leq L \leq 45$ mm                  | $3,15 \leq L \leq 45$ mm             | $3,15 \leq L \leq 45$ mm            | $3,15 \leq L \leq 45$ mm             | $3,15 \leq L \leq 45$ mm       |
| <b>Densidad Aparente</b>  | $\geq 650$ kg/m <sup>3</sup>              | $\geq 650$ kg/m <sup>3</sup>         | $\geq 650$ kg/m <sup>3</sup>        | $\geq 650$ kg/m <sup>3</sup>         | $\geq 650$ kg/m <sup>3</sup>   |
| <b>Contenido de humedad</b>   | $\leq 10$ %                               | $\leq 10$ %                          | $\leq 15$ %                         | $\leq 11$ %                          | $\leq 15$ %                    |
| <b>Contenido de cenizas ( % en peso en el peso seco )</b>             | $\leq 0,7$ %                              | $\leq 1,5$ %                         | $\leq 3$ %                          | $\leq 5$ %                           | $\leq 7$ %                     |
| <b>Poder Calorífico</b>   | $\geq 16,5$ MJ/kWh                        | $\geq 16,5$ MJ/kWh                   | $\geq 15,4$ MJ/kWh                  | $\geq 15,8$ MJ/kWh                   | $\geq 14,9$ MJ/kWh             |
| <b>Nitrógeno</b>  | $\leq 0,3$ %                              | $\leq 0,3$ %                         | $\leq 0,5$ %                        | $\leq 1,5$ %                         | $\leq 2$ %                     |
| <b>Azufre</b>   | $\leq 0,05$ %                             | $\leq 0,08$ %                        | $\leq 0,08$ %                       | $\leq 0,2$ %                         | $\leq 0,2$ %                   |
| <b>Cloro</b>  | $\leq 0,03$ %                             | $\leq 0,05$ %                        | $\leq 0,05$ %                       | $\leq 0,2$ %                         | $\leq 0,3$ %                   |
| <b>Arsénico</b>   | $\leq 1$ mg/kg                            | $\leq 1$ mg/kg                       | $\leq 1$ mg/kg                      | $\leq 1$ mg/kg                       | $\leq 1$ mg/kg                 |
| <b>Cadmio</b>   | $\leq 0,5$ mg/kg                          | $\leq 0,5$ mg/kg                     | $\leq 0,5$ mg/kg                    | $\leq 0,5$ mg/kg                     | $\leq 0,5$ mg/kg               |
| <b>Cromo</b>  | $\leq 10$ mg/kg                           | $\leq 10$ mg/kg                      | $\leq 10$ mg/kg                     | $\leq 10$ mg/kg                      | $\leq 10$ mg/kg                |
| <b>Cobre</b>  | $\leq 10$ mg/kg                           | $\leq 10$ mg/kg                      | $\leq 10$ mg/kg                     | $\leq 40$ mg/kg                      | $\leq 40$ mg/kg                |
| <b>Plomo</b>  | $\leq 10$ mg/kg                           | $\leq 10$ mg/kg                      | $\leq 10$ mg/kg                     | $\leq 10$ mg/kg                      | $\leq 10$ mg/kg                |
| <b>Plata</b>  |   |                                      |                                     |                                      |                                |
| <b>Níquel</b>   | $\leq 10$ mg/kg                           | $\leq 10$ mg/kg                      | $\leq 10$ mg/kg                     | $\leq 15$ mg/kg                      | $\leq 15$ mg/kg                |
| <b>Zinc</b>   | $\leq 100$ mg/kg                          | $\leq 100$ mg/kg                     | $\leq 100$ mg/kg                    | $\leq 60$ mg/kg                      | $\leq 60$ mg/kg                |
| <b>Resistencia Mecánica</b>   | $\geq 97,5$ %                             | $\geq 95$ %                          | $\geq 95$ %                         | $\geq 95$ %                          | $\geq 92$ %                    |
| <b>Partículas finas (después de de salida a la salida de fábrica)</b> | $\leq 1$ %                                | $\leq 2$ %                           | $\leq 3$ %                          | $\leq 2$ %                           | $\leq 3$ %                     |

Fuente: (ragt-energie, 2016)

## **CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE CASO**

### **2.1 Contexto del cultivo de piña en Costa Rica**

La producción de piña en Costa Rica se inició a finales de los años de 1970, y las primeras exportaciones se realizaron a inicios de 1980, con el proyecto de exportaciones de la empresa PINDECO (Del Monte). Sus principales cultivos se encuentran en la Zona Sur del país, específicamente, en Buenos Aires de Puntarenas, donde se cultivan 4 000 hectáreas asignadas a la producción de piña, de las cuales, solamente, utilizan en este momento 2 000, ya que el resto se encuentra en descanso de siembra o en preparación para la siembra (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2007).

Las primeras exportaciones de fruta costarricense las realizó PINDECO, luego DOLE. No es sino hasta inicios de la década de los años 90, que el cultivo se popularizó o sea que inversionistas independientes (nacionales y extranjeros), invirtieron en esta actividad, a tal punto que hoy en día el 50 % de la producción nacional está en manos de empresas de capital nacional (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2007).

Entre los nuevos productos agrícolas con los que Costa Rica ha diversificado sus exportaciones en los últimos años está la piña, que, si bien la hemos sembrado siempre en casi todo el territorio nacional, es apenas ahora que hay grandes capitales involucrados y que los cultivos son muy extensos y tecnológicamente pujantes. En los piñales el suelo se mantiene completamente expuesto y se emplea mucho agroquímico, lo que hace que su impacto ambiental sea muy severo. Dado que ante la alta demanda del mercado internacional la producción piñera es creciente, entre los ambientalistas la inquietud es grande, porque se avizora una nueva edición del modelo bananero padecido por nuestra naturaleza desde hace más de un siglo: destrucción masiva de suelos, contaminación de cursos de agua y de ecosistemas terrestres vecinos con graves consecuencias en su flora y su fauna y daños a la salud humana (AMBIENTICO, 2006).

En Costa Rica se ha producido piña desde hace mucho tiempo atrás, y hasta hace unas décadas la producción estaba uniformemente distribuida por todo el territorio nacional, pues el proceso productivo era muy natural y no requería de ningún paquete tecnológico ni de condiciones especiales para apresurar la producción de la fruta. Pero a partir de la aparición de PINDECO se dio una serie de cambios que constituyeron un parteaguas en el proceso histórico de la producción piñera en el país, ya que esta empresa impactó una serie de dimensiones de su producción ampliando el área de producción que se tenía hasta ese momento e introduciendo diferentes tecnologías y estilos de producción (AMBIENTICO, 2006).

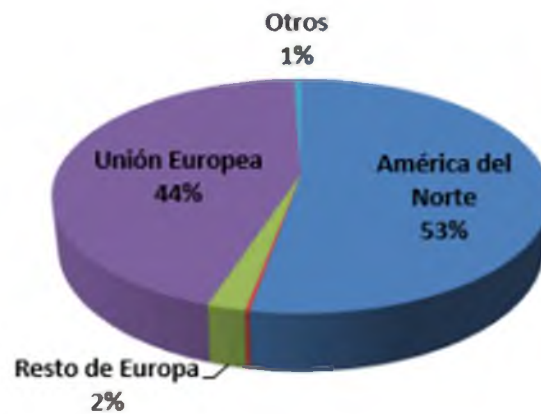
La piña es un cultivo que está presente en el país desde hace más de 50 años, en distintas regiones. En sus inicios, la producción se destinaba para consumo local y en menor proporción a la industrialización de pulpas, mermeladas y enlatados. Fue a partir de 1986, cuando se inició la exportación de la fruta con la variedad Cayenna Lisa, posteriormente se continuó con Champaca y a partir del 2001, con la variedad que nos ha dado un lugar de preferencia a nivel mundial: la Golden (CANAPEP, 2016).

El crecimiento del sector inicia aproximadamente en el año 2000, hasta ese entonces se estimaba que existían unas 11 000 hectáreas, distribuidas entre la Zona Sur y Norte del país. Sin embargo, el incremento en la cantidad de productores y hectáreas dedicadas al cultivo de la fruta, se multiplicó con las oportunidades de exportación. En la actualidad existen 38 000 hectáreas de nuestro suelo dedicadas al cultivo, en todo lo largo y ancho de 16 cantones, divididos en: Zona Norte con 17 860 hectáreas, lo equivalente al 47 % del área cultivada; el Atlántico dispone de 11 780 hectáreas y representa el 31 %, a su vez, el Pacífico destina 8 360 hectáreas, lo cual constituye el 22 % del área cultivada en manos de unos 550 productores de piña, en todo el país (CANAPEP, 2016).

Según la Cámara Nacional de exportadores de piña CANAPEP (2016) Costa Rica mantiene su posición de mayor exportador mundial de piña, lo cual genera una importante

cantidad de ingresos así como la generación de empleo que registra 26 600 empleos, 170 exportadores de piña y 61 plantas empacadoras en el país.

A continuación se muestra los principales destinos de la exportación de piña costarricense:



**Figura 7.** Destino de la piña costarricense nivel mundial Fuente: (CANAPEP, 2016)

De nuestras exportaciones agrícolas, solo la del banano sigue siendo más grande en cuanto a volumen de venta que la de piña. Y los principales capitales que cultivan y exportan el banano son, precisamente, los que también siembran y comercializan la piña. La participación de pequeños productores en el negocio es insignificante. Como la demanda de piña por parte del mercado internacional va en aumento, entre los ambientalistas la preocupación por los efectos de su cultivo también es creciente (AMBIENTICO, 2006).

A setiembre del 2015, se exportaron alrededor 856 productos de cobertura agropecuaria. Los principales fueron: banano (612,4 millones de dólares), piña (606,1 millones de dólares), café oro (285,5 millones de dólares), los demás jarabes y

concentrados (225,9 millones de dólares) y el melón (68,4 millones de dólares), estos representaron el 53,7 % de dichas exportaciones (Mora & Borbón, 2015).

La creciente demanda del cultivo de piña, la cantidad actual de producción de piña y las proyecciones de producción nacional hacen del cultivo de la piña un foco de estudio por la diversidad de problemas que surgen en su producción, por lo cual el manejo adecuado de la piña y de sus residuos es un tema de gran relevancia en la actualidad que está siendo estudiado como en esta investigación con los residuos agrícolas de campo de piña.

## **2.2 Problemática de los residuos del cultivo de piña**

La producción intensiva del cultivo de piña deja al país grandes remesas debido a las exportaciones del fruto, sin embargo también deja grandes problemas como la contaminación al ambiente que produce este cultivo bajo condiciones de producción intensivas. Uno de los principales problemas del cultivo de piña es el manejo de los residuos agrícolas de campo, el rastrojo y la corona de piña son en la actualidad foco de estudio de diversas entidades con la finalidad de buscarle una utilidad a los mimos y darles un manejo de residuos adecuado.

El manejo adecuado de los desechos, tanto para lograr agregar componentes para fijar carbono como para evitar la proliferación de plagas y contaminación ambiental, es el punto crítico de este compromiso. Implica atención a las prácticas de disposición de desechos no orgánicos, tales como los envases de agroquímicos o residuos de material utilizados en la producción y empaque de la piña. Tiene que ver con la atención integral de los problemas que han surgido en la relación entre plantaciones y comunidades y con la búsqueda de formas alternativas de disposición de desechos (Ministerio de Ambiente y Energía, 2013).

Los datos respecto a la generación de desechos en la producción de piña son alarmantes y preocupan a las autoridades nacionales y otros organismos que buscan evitar

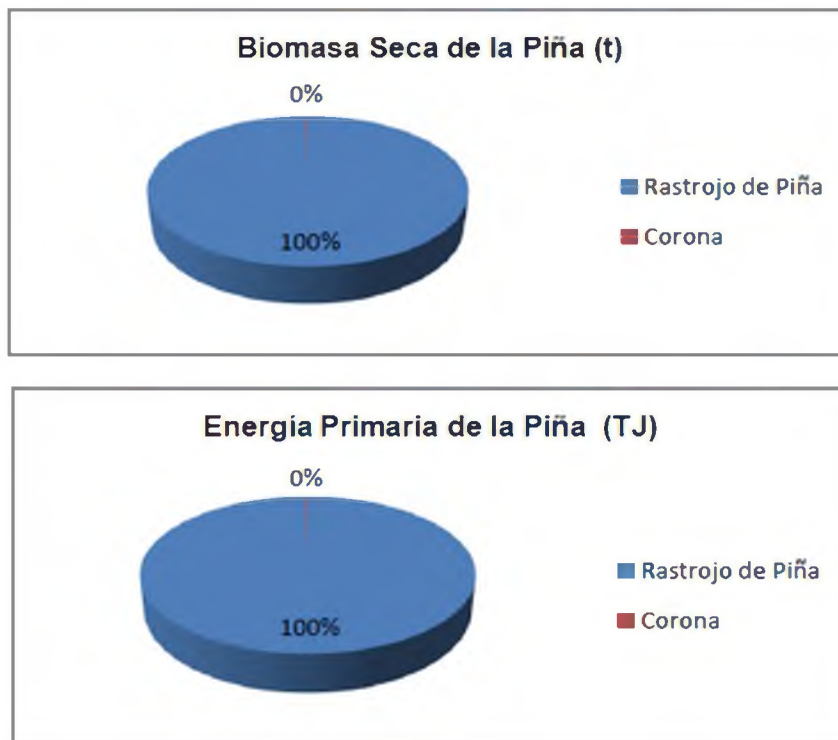
el deterioro ambiental nacional e internacional. A raíz de esta situación se hace necesario buscar soluciones y uso a tanta biomasa y agroquímicos, que si no se trata adecuadamente eventualmente llegarán a contaminar suelos, ríos y ambiente en general de protocolo rastrojo (Alpizar, 2007).

El uso de materiales agrícolas como materia prima es especialmente importante cuando se trata desechos que se generan en grandes cantidades y que regularmente son fuente de contaminación. En Costa Rica, la industrialización de los productos agrícolas genera un 86 % del total de desechos de diferentes sectores industriales. La utilización de estos residuos resultaría muy ventajosa desde el punto de vista económico y ambiental, pues sería una fuente renovable de materiales, lo que evitaría su eliminación de manera inadecuada de protocolo rastrojo (Quesada, Alvarado, Sibaja, & Vega, 2003).

La biomasa asociada a la producción se puede utilizar como materia prima para las fuentes de energía alternativa, contribuyendo de manera sustancial con las políticas de carbono neutralidad, producción responsable, creación de empleos, disminución de la factura y dependencia petrolera, etc (Ministerio de Ambiente y Energía, 2013).

El principal residuo agrícola de campo del cultivo de piña es el rastrojo, este representa una cantidad tan grande que es imposible su incorporación al suelo por la gran cantidad de rastrojo que se tiene, según Coto (2014) en el sector piñero nacional se nota la importante contribución a materia seca y potencial energético del rastrojo, y es en este adonde puede haber un potencial uso energético si se demuestra la viabilidad de tecnologías de conversión. Por otro lado podría haber otros usos derivados y prácticas de manejo que deben ser consideradas como “drivers” para un eventual uso energético de estos residuos. A continuación se muestra una gráfica que muestra la contribución del rastrojo de piña en comparación a la corona como generadores de biomasa:





**Figura 8.** Aporte de rastrojo y corona de piña en biomasa seca de piña así como energía primaria Fuente: (Coto, 2014).

La Figura 8 nos muestra en primera instancia el aporte en materia seca de biomasa de rastrojo de piña y corona para ser utilizados con fines energéticos, en donde podemos observar como el 100 % corresponde al aporte del rastrojo de piña. Misma relación se observa en la proporción de energía primaria que se puede obtener de ambas biomásas.

### 2.3 Contexto del cultivo de café en Costa Rica

La producción de café es la actividad agroindustrial de mayor tradición en Costa Rica, de gran importancia en la conformación social y económica de esta nación. En el país el cultivo y beneficiado del café se ha localizado en el valle central, donde en las últimas décadas compite con el crecimiento urbano y con el desarrollo industrial (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2010).

El procesamiento del café mediante beneficiado húmedo es fundamental para mantener y destacar la excelente calidad del café que proviene de los diferentes valles y cordilleras. No obstante, dicha importancia se contrapone a los costos ambientales que tradicionalmente ha traído consigo el beneficiado de café en términos de contaminación de los ecosistemas, alto consumo de agua y uso ineficiente de los insumos energéticos. Estos problemas, aunados a la presión cada vez mayor de diversas instancias que velan por la conservación de los recursos naturales, motivaron al sector cafetalero a emprender la búsqueda de soluciones que permitan un desarrollo sostenible de sus actividades, sin afectar negativamente su productividad y la calidad final del grano (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2010).

La importancia de estudios tendientes al aprovechamiento de los residuos del beneficiado del café radica en generar vías alternas de ingreso, provenientes de recursos, que pese a su potencial económico, hoy son considerados como residuos o materias de desecho y causantes de problemas ambientales (Alfaro & Rodríguez, 1994).

Por la trascendencia económica de esta actividad, la alteración a los sistemas que genera y, por la posible significancia económica del aprovechamiento de los desechos del café, es necesario evaluar el impacto que el material desechado tiene a nivel tanto ambiental como socioeconómico (Alfaro & Rodríguez, 1994).

A continuación se presenta los resultados obtenidos de las estimaciones realizadas para biomasa húmeda, biomasa seca y energía primaria potencial disponible en los distintos sectores considerados según:

**Tabla 2.** Estimaciones de biomasa húmeda/seca y energía primaria por tipo de sector para Costa Rica en año 2012.

| <b>Sector</b>       |             | <b>Producción</b>         | <b>Biomasa Húmeda (t)</b>  | <b>Biomasa Seca (t)</b>  | <b>Energía Primaria (TJ)</b> |
|---------------------|-------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Agrícola y Forestal | Caña        | 4 005 752                 | 4 534 511                  | 1 782 264                | 25 277,7                     |
|                     | Piña        | 2 484 729                 | 8 165 717                  | 817 429                  | 9 482,2                      |
|                     | Palma       | 1 111 250                 | 444 500                    | 247 142                  | 4 874,3                      |
|                     | Aserraderos | 1 002 644                 | 411 084                    | 219 930                  | 4 068,7                      |
|                     | Café        | 658 346                   | 404 883                    | 96 744                   | 1 587,9                      |
|                     | Banano      | 1 948 869                 | 405 365                    | 60 805                   | 705,3                        |
|                     | Arroz       | 214 279                   | 44 999                     | 38 249                   | 590,2                        |
|                     | Naranja     | 280 000                   | 140 000                    | 21 000                   | 347,6                        |
| <b>Sub Total</b>    |             |                           | <b>14 551 058</b>          | <b>3 283 562</b>         | <b>46 933,8</b>              |
| <b>Sector</b>       |             | <b>Número de animales</b> | <b>Biomasa Húmeda (TM)</b> | <b>Biomasa Seca (TM)</b> | <b>Energía Primaria (TJ)</b> |
| Pecuario            | G. Lechero  | 793 563                   | 7 035 243                  | 1 407 049                | 21 982,8                     |
|                     | G. Carne    | 630 312                   | 4 928 873                  | 736 387                  | 11 504,8                     |
|                     | Avícola     | 65 932 297                | 488 277                    | 430 487                  | 4 986,1                      |
|                     | G.Porcino   | 831 427                   | 521 464                    | 78 220                   | 1 079,4                      |
| <b>Sector</b>       |             | <b>Producción (t)</b>     | <b>Biomasa Húmeda (t)</b>  | <b>Biomasa Seca (t)</b>  | <b>Energía Primaria (TJ)</b> |
| <b>Sub Total</b>    |             |                           | <b>12 973 858</b>          | <b>2 652 143</b>         | <b>39 553,2</b>              |
| <b>Total</b>        |             |                           | <b>27 524 916</b>          | <b>5 935 705</b>         | <b>86 487,0</b>              |

Fuente: (Coto, 2013).

Del total de biomasa húmeda cerca de 27 millones de toneladas, los sectores agrícola y de aserraderos representan cerca del 52 % mientras que los sectores pecuarios representan un 47,13 %. Mientras tanto en biomasa seca los sectores agrícolas y forestales representan cerca de un 55 % mientras que los sectores pecuarios representan un 44,6 %. A nivel del total de energía primaria potencial los sectores agrícolas y aserraderos concentran un 54 % del total de esa energía (Coto, 2013).

Es importante recalcar la gran cantidad de biomasa humedad y seca generada con valores de 404 883 toneladas y 96 744 toneladas respectivamente, lo cual se convierte en

1 587,9 TJ de energía primaria que podría generarse y aprovechar en procesos de la misma industria cafetalera.

La información anterior nos muestra la gran cantidad de biomasa que se genera en Costa Rica, siendo el cultivo de piña y café dos grandes contribuyentes de biomasa en Costa Rica, lo cual ratifica la importancia del estudio de tecnologías de conversión de residuos agrícolas o biomasa en fuentes de energía. El aprovechamiento energético de la biomasa por si solo es un gran aporte en busca de la eliminación de la dependencia de los combustibles fósiles, así como contribuir con la mitigación del efecto invernadero y una herramienta para el productor y agroindustria respecto al manejo adecuado de residuos.

## **2.4 Residuos del procesamiento del cultivo de café**

El sector cafetalero de Costa Rica generó US\$ 374,88 millones en divisas en el 2011 que representaron cerca de un 3,6 % del total de ingresos por exportaciones del país, 15,65 % en relación al sector agropecuario y un 18,6 % del total del sector agrícola del país; y es a su vez el segundo producto agrícola de exportación después del banano en el rubro de productos de exportación tradicionales (Coto, 2013).

Según Mora & Borbón (2015) a setiembre del 2015 se exportó en café oro (285,5 millones de dólares), sobresale las ventas al exterior de café oro que mostraron un aumento con respecto al mismo período del 2014 de un 16,0 %, producto del repunte de los precios internacionales.

La producción intensiva del cultivo del café genera una gran cantidad de residuos del procesamiento del fruto del café, a continuación se muestra una tabla con los principales residuos del procesamiento del fruto del café y su cantidad en toneladas de biomasa:

**Tabla 3.** Estimación de biomasa seca/húmeda por RAO y energía primaria.

| Sector                              |                | RAO                   | Biomasa (T) |             | Energía Primaria (TJ) |
|-------------------------------------|----------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|
| Agrícola                            | Café           | Pulpa                 | 273 871,9   | 52 035,7    | 826,3                 |
|                                     |                | Cascarilla            | 28 308,9    | 25 194,9    | 451,7                 |
|                                     |                | Mucilago              | 102 702,0   | 19 513,4    | 309,9                 |
|                                     | Arroz          | Granza                | 62 642,0    | 38 248,8    | 590,2                 |
|                                     | Caña de Azúcar | Bagazo                | 1 001 438,0 | 500 719,0   | 8 762,6               |
|                                     |                | Cachaza               | 1 201 725,6 | 301 737,6   | 4 827,8               |
|                                     |                | Melaza                | 1 402 013,2 | 701 006,6   | 6 827,8               |
|                                     |                | R.Campo               | 929 334,5   | 278 800,3   | 4 859,5               |
|                                     | Palma Africana | Fibra de Mesocarpio   | 144 462,5   | 91 011,4    | 1 768,4               |
|                                     |                | Cascarilla de Coquito | 55 562,5    | 46 116,9    | 1 057,5               |
|                                     |                | Fibra de Pinzote      | 244 475,0   | 110 013,8   | 2 048,5               |
|                                     | Cítricos       | Residuos de Naranja   | 140 000,0   | 21 000,0    | 347,6                 |
|                                     | Piña           | Rastrojo de Piña      | 8 158 262,5 | 815 826,2   | 9 463,6               |
|                                     |                | Corona                | 7 454,2     | 1 602,7     | 18,6                  |
|                                     | Banano         | Pinzote de Banano     | 183 193,7   | 27 479,1    | 316,8                 |
| Banano Rechazo(industria alimentos) |                | 222 171,1             | 33 325,7    | 384,2       |                       |
| Forestal                            | Aserraderos    | Aserrín               | 102 771,0   | 69 884,3    | 1 292,9               |
|                                     |                | Leña                  | 189 098,7   | 94 549,4    | 1 749,2               |
|                                     |                | Otros Res. Aserrío    | 110 992,7   | 49 946,7    | 924,0                 |
|                                     |                | Burucha               | 8 221,7     | 5 549,6     | 102,7                 |
| Pecuario                            | Ganado Lechero | Excreta G.Lechero     | 7 035 242,9 | 1 407 048,6 | 21 982,8              |
|                                     |                | Excreta G. Carne      | 4 928 873,3 | 736 387,1   | 11 504,8              |
|                                     | Avícola        | Excreta G. Avícola    | 488 277,2   | 430 487,3   | 4 986,1               |
|                                     | Porcino        | Excreta G. Porcino    | 521 464,4   | 78 219,7    | 1 079,4               |

Fuente: (Coto, 2014)

La tabla anterior nos muestra la cantidad de biomasa seca/húmeda por RAO, además del potencial de energía primaria. Para el cultivo del café tenemos tres grandes

residuos como lo son pulpa, cascarilla y mucilago siendo la pulpa el mayor residuo con 273 871,9 T de biomasa húmeda y 52 035,7 de biomasa seca lo cual representa un potencial de energía primaria de 826,3 TJ.

Según Coto (2013) en relación al sector café, es muy importante notar la importante contribución de la materia seca y energía asociada a la pulpa del café respecto a los otros residuos, sin embargo debido a los altos contenidos de humedad en la materia orgánica, y tomando en cuenta la necesidad de secar o preparar la materia para un proceso de conversión energética, no se puede asociar el potencial con la disponibilidad energética de este residuo. La búsqueda tecnológica en un residuo como la pulpa y su viabilidad dictará eventualmente cuanto de este potencial puede finalmente quedar disponible para usos finales de calor de proceso o de generación eléctrica en el sector. El mucílago está asociado con el manejo de aguas mieles en el sector y su consideración energética deberá darse desde esa perspectiva, aún cuando pudiesen haber usos alternativos como también puede ser el caso de la pulpa del café.

Existen en el país diversos acercamientos al tema de aprovechamiento y disposición de pulpa del café, y el factor tamaño de beneficio es muy importante; así como la cercanía existente a sitio de disposición final sea este en plantaciones o en brozeros (Coto, 2013).

La pulpa de café, así como mucha biomasa, tiene vocación de uso potencial en distintas aplicaciones:

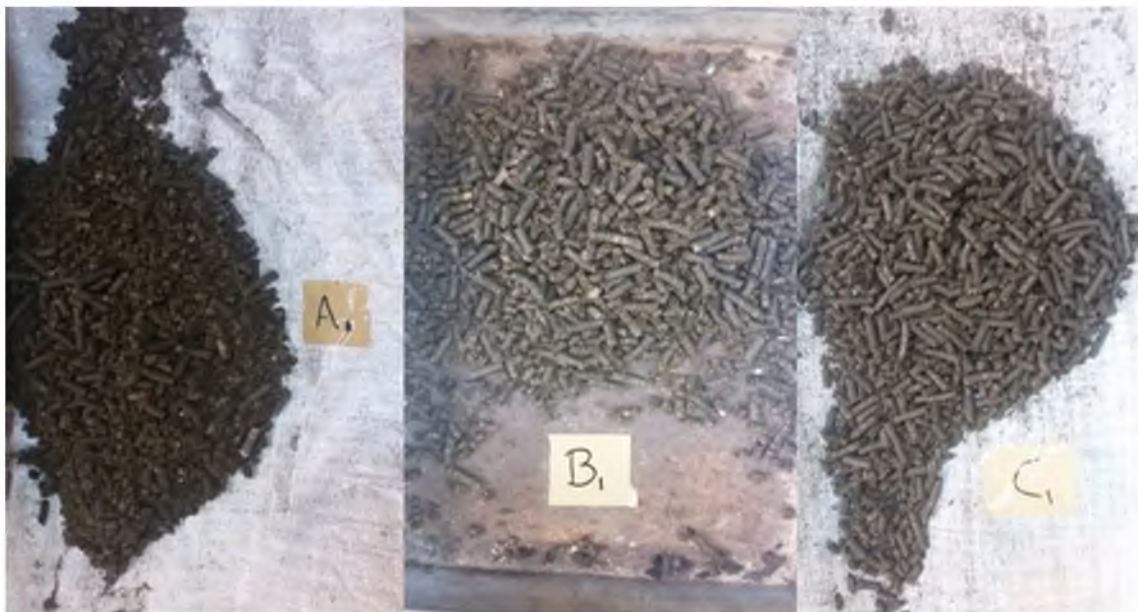
- A nivel agrícola: abono y compost.
- A nivel de alimentación animal: proteína y forraje, sustrato para producción hongos, y otras químicas derivadas.
- A nivel industrial: Combustible (pulpa seca), biogás, alcohol, briquetas y pellets.
- Además es importante mencionar las investigaciones realizadas para ser utilizada la pulpa como materia prima para la elaboración de galletas para consumo humano.

Los residuos del procesamiento del fruto del café según la información anterior representan gran cantidad de toneladas de biomasa seca y húmeda con potencial para la generación de energía, lo cual representa una oportunidad para el sector industria de eliminar la dependencia a los combustibles fósiles con la sustitución de los mismos por energía de la biomasa. Además en términos de manejo de residuos estos procesos de conversión de biomasa en energía son una herramienta para el sector agroindustrial que los ayuda a tener un manejo adecuado de residuos.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Pruebas preliminares

En primera instancia se realizaron pruebas preliminares con la finalidad de encontrar el punto de operación de la pelletizadora semi industrial, además de encontrar el contenido de humedad y tamaño de partícula ideal para pelletizar, esto para la biomasa de piña así como broza de café. A continuación se muestra una figura que ejemplifica el proceso anterior:



**Figura 9.** Pruebas preliminares en rastrojo de piña.

En base a las pruebas preliminares se realizó la selección de los tratamientos para la biomasa de piña y biomasa de broza de café, estos tratamientos difieren entre sí en tamaño de partícula y contenido de humedad.

A continuación se describe el proceso de pelletizado para la biomasa de rastrojo de piña, biomasa de broza de café y la mezcla de ambas biomásas.



### 3.2 Recolección de residuos

El presente trabajo de investigación como se mencionó anteriormente se desarrolló con los residuos del procesamiento del fruto de café, en específico broza de café y residuos agrícolas de campo del cultivo de piña.

Los residuos de broza de café se recolectaron en Santa María de Dota, San José. El lugar específico fue CoopeDota la cual colaboró en la investigación con la broza procesada horas antes de su recolección, a continuación se muestra una figura del proceso de recolección de la biomasa:



**Figura 10.** Recolección de broza de café en planta de procesamiento.

La Figura 10 muestra la recolección de broza en la planta de procesamiento, la broza cuenta con alto contenido de humedad lo cual como se aborda más adelante es uno de los desafíos para su procesamiento. La broza se recolectó en bolsas plásticas que fueron selladas, esto con la finalidad de preservar las condiciones iniciales de la biomasa.

La recolección de residuos agrícolas de campo de piña se realizó en la zona Pital de San Carlos, Alajuela. Se realizó el corte de las plantas de piña en campo y se procedió al

corte de raíz que no es de interés para esta investigación, se recolectó el rastrojo de piña como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 11.** Recolección de residuos agrícolas de campo de piña.

La recolección de residuos de piña consistió en el corte de la planta de piña, posteriormente se procedió a cortar la raíz que no va ser estudiada en el presente trabajo de investigación, finalmente se cortó la hoja de la planta de piña en partes más pequeñas con la finalidad de empacar los residuos en menor espacio y facilitar el transporte de los mismos.

### **3.3 Elaboración de pellets en el laboratorio**

Los residuos de broza de café y rastrojo de piña conllevan tratamientos similares de acondicionamiento para la elaboración de pellets en el laboratorio, a continuación se describe el proceso de acondicionamiento para la broza de café.

#### **3.3.1 Acondicionamiento de broza de café**

Los residuos de broza de café recolectados cuentan con un contenido de humedad de 82 % bh, el alto contenido de humedad de la biomasa no permite un pelletizado adecuado por lo cual se debe acondicionar la biomasa a contenidos de humedad apropiados,

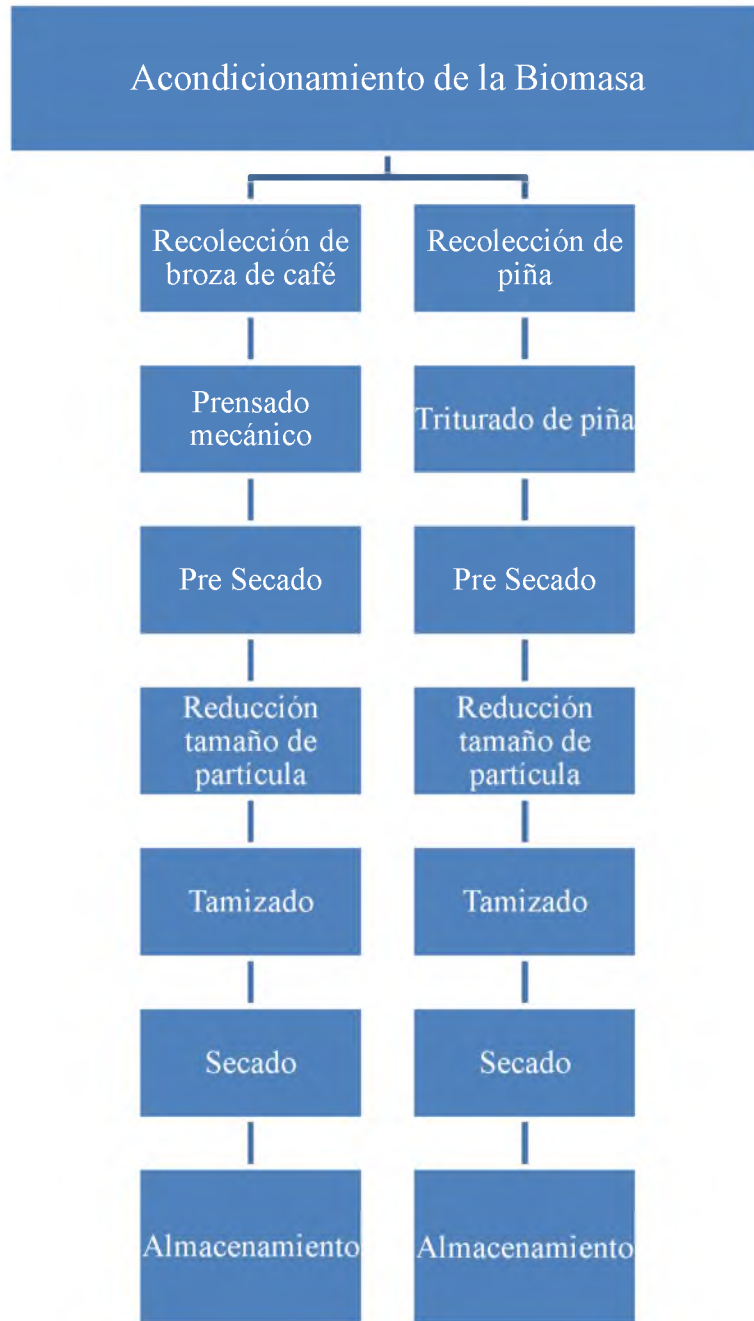
por lo cual se extrajo parte de la humedad con un prensado que se realizó con implementos diseñados en el laboratorio, a continuación se muestra el proceso de extracción de humedad de forma mecánica:



**Figura 12.** Prensado mecánico de broza de café.

El prensado mecánico se realizó a la broza de café con una presión de 5 toneladas, el efecto en el contenido de humedad fue la reducción de 82 % a 61 % bh, con lo cual se extrae gran cantidad de agua libre en la broza de café, este proceso es de suma importancia ya que este proceso permite reducir el secado en horno de convección forzada.

Posteriormente se realizó la fase de pre secado, molienda, reducción tamaño de partícula, tamizado y finalmente el secado final al contenido de humedad deseado, a continuación se muestra un diagrama que ejemplifica el proceso de acondicionamiento para broza de café y rastrojo de piña:



**Figura 13.** Diagrama de flujo de acondicionamiento de broza de café.



### 3.3.2 Acondicionamiento de rastrojo de piña

El acondicionamiento de los residuos agrícolas de campo de piña sigue una metodología similar a la broza de café, el primer paso es triturar la planta de piña, posteriormente se realiza un pre secado seguido de una disminución de tamaño de partícula para finalmente tamizar y realizar el secado final en el cual se lleva la biomasa de piña al contenido de humedad deseado.

Como muestran la Figura 13 en el diagrama de flujo de pre tratamiento para broza de café y RAC de piña los procedimientos son muy similares, además para realizar esta metodología se utilizaron en su gran mayoría los mismos equipos, a continuación se muestra una figura con los equipos utilizados en la presente metodología de pretratamiento o acondicionamiento de biomasa:



**Figura 14.** Equipos utilizados en el pretratamiento de biomasa.

En la Figura anterior se pueden apreciar los equipos utilizados en el pretratamiento de la biomasa, A) balanza digital, B) Horno de Secado, C) Prensa mecánica y sus aditamentos, D) Molino de martillos, E) Tamices, F) Muestras tamizadas.

### 3.4 Equipo para la elaboración de pellets

La elaboración de pellets se realizó mediante una pelletizadora de anillo plano, modelo KL120B este tipo de pelletizadora permiten estudiar diferentes biomásas, tamaños de partículas así como contenidos de humedad.

A continuación se muestra en la Figura 15 el equipo de pelletizado mencionado anteriormente.



**Figura 15.** Pelletizadora de rodillos KL120B.

El principio de funcionamiento de la pelletizadora se basa en dos rodillos de igual diámetro que tienen un sentido de giro inverso, debajo de los rodillos se encuentra la matriz perforada que presenta un espacio con los rodillos para el paso de la biomasa. Este espacio se gradúa según la biomasa, tamaño de partícula y compresión que se quiera dar a la biomasa.

La forma final del pellet depende del diámetro de la matriz, el espaciamiento entre rodillos y matriz, la biomasa utilizada, tamaño de partícula y contenido de humedad, son variables que influyen en la calidad final de los pellets.

Para el funcionamiento de la pelletizadora se realizaron estudios preliminares con diferentes biomásas, además se varió el tamaño de partícula y contenido de humedad, esto con la finalidad de encontrar el punto óptimo de funcionamiento de la pelletizadora, a continuación se muestra una figura que ejemplifica el proceso:

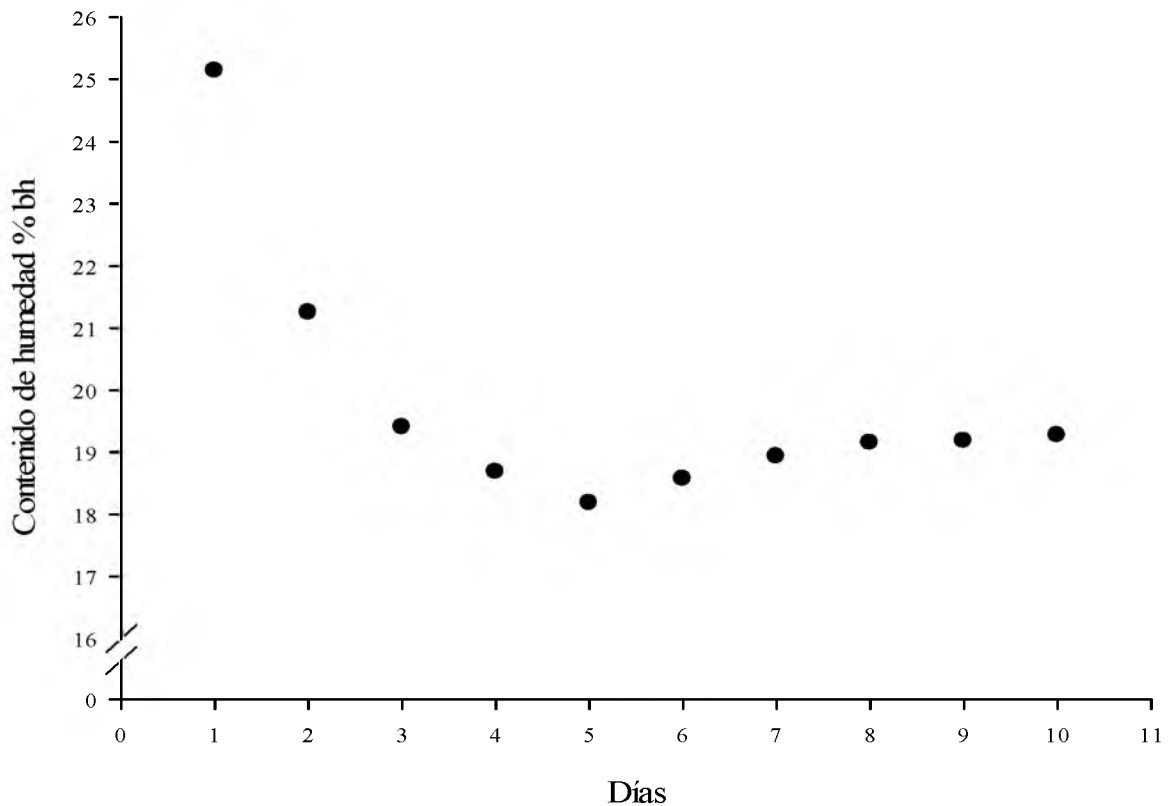


**Figura 16.** Pruebas de calibración para pelletizadora de rodillos KL120B.

### **3.5 Tratamiento de pellets después de pelletizado**

La pelletizadora semi industrial KL120B se debe calentar diez minutos antes de su operación con una mezcla de arena y aceite, esto con la finalidad de limpiar la matriz y llevarla a condiciones de operación óptimas, después de los diez minutos se alcanza la temperatura de operación adecuada que es de 80 °C lo que permite el pelletizado adecuado.

Sin embargo la elevada temperatura que alcanza la pelletizadora se refleja en una pérdida de humedad de la biomasa después del proceso de pelletizado, se determinó temperaturas de 40 °C en pellets inmediatamente después de ser pelletizados. Por ende se realizó un estudio preliminar de la pérdida de contenido de humedad para encontrar el punto óptimo para realizar las pruebas a los pellets, a continuación se muestra la pérdida de contenido de humedad en pellets de piña:



**Figura 17.** Variación de contenido de humedad en pellets de piña después de pelletizado.

En base a la metodología anterior para cada tratamiento se seleccionó el día en el cual el pellet perdió el mayor contenido de humedad, para el caso específico de la Figura 17 es el día 5 en el cual se obtiene una humedad de 18,18 % bh, después del día 5 los pellets empiezan a ganar humedad por lo cual el día óptimo para la recolección de los pellets y almacenamiento para posteriormente realizar las pruebas es el día 5 para el caso específico de pellets de piña con un contenido de humedad inicial de entrada a la pelletizadora de 25 % bh.

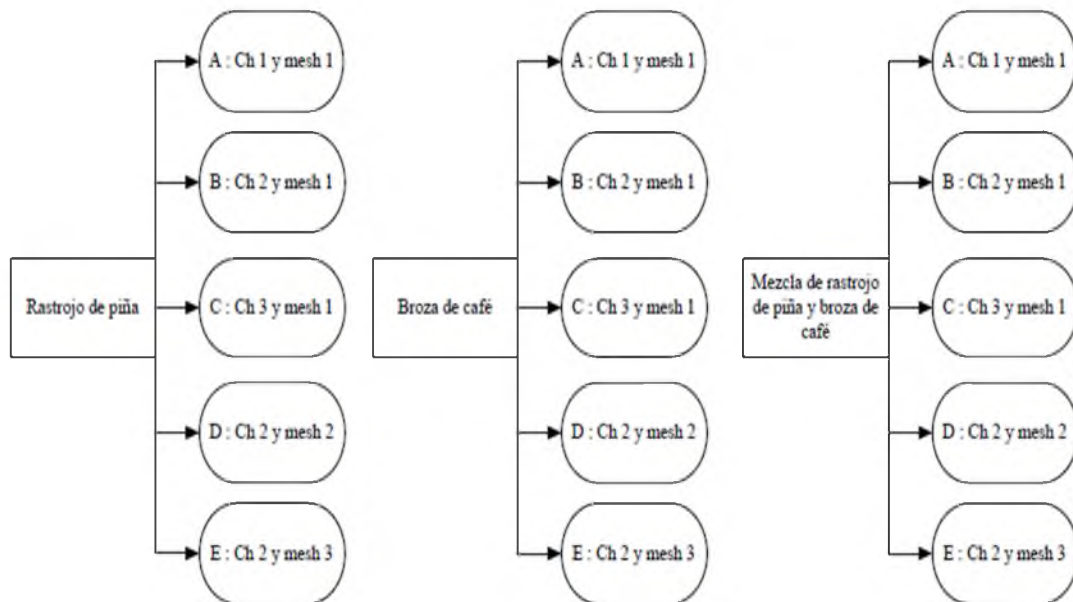
### 3.6 Metodología empleada en la elaboración de pellets

Como se ha mencionado anteriormente la presente investigación tuvo la finalidad de estudiar la densificación de biomasa de broza de café, rastrojo de piña así como la



combinación de ambas. Además se estudió el efecto de la variación de tamaño de partícula y contenido de humedad sobre la calidad del pellet, lo cual se evaluó mediante el análisis de propiedades físicas, térmicas y fisicoquímicas.

A continuación se muestra una figura que resume la matriz de tratamientos que se realizó en la investigación:



**Figura 18.** Resumen de tratamientos realizados a las biomásas.

La Figura anterior presenta un resumen de los tratamientos que se realizaron a las diferentes biomásas, los residuos agrícolas de piña se sometieron a cinco tratamientos siendo T1 el tamaño de partícula y contenido de humedad idóneos para pelletizar según las pruebas de calibración realizadas en la pelletizadora. T2, T3, T4 y T5 son tratamientos en los cuales se varió tamaño de partícula o contenido de humedad, se varió una propiedad y la otra se mantuvo constante. Para el caso de broza de café se realizó la misma matriz de pruebas en donde se obtuvieron cinco tratamientos. Finalmente se realizó la mezcla de ambas biomásas en cinco tratamientos, para la elaboración de la mezcla se trabajó con una proporción de 50:50 en masa de cada biomasa.

### 3.7 Caracterización de los pellets

#### 3.7.1 Propiedades físicas:

- 3.7.1.1 Densidad aparente

La densidad aparente se obtuvo empleando la norma ASAE-124 para la determinación de propiedades físicas de pellets y briquetas. Se utilizó un recipiente cilíndrico de 7,5 cm de altura por 9,0 cm de diámetro, este recipiente se llenó de pellets a ras, se midió la masa de la muestra en una balanza con una precisión de  $\pm 0,1$  g.

La determinación de la densidad aparente se realizó por triplicado, se calculó el promedio de las mediciones y se reportó el mismo, a continuación se muestra la ecuación utilizada para determinar densidad aparente:

$$\rho_a = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Donde:

$\rho_a$ : densidad aparente ( $\text{kg/m}^3$ )

m: masa total de la muestra (kg)

v: volumen del cilindro ( $\text{m}^3$ )

A continuación se muestra en la Figura 19 el proceso para la determinación de densidad aparente:



**Figura 19.** Determinación de densidad aparente en pellets.

- **3.7.1.2 Densidad unitaria**

La densidad unitaria o real de partículas se determinó tomando de forma aleatoria 3 pellets, se midió la longitud y diámetro de cada pellet utilizando un vernier digital de precisión  $\pm 0,01$  mm; y se determinó la masa de los pellets empleando una balanza digital con una precisión de  $\pm 0,01$  g.

La densidad unitaria se determinó con la siguiente ecuación:

$$\rho_u = \frac{m}{v} \quad (2)$$

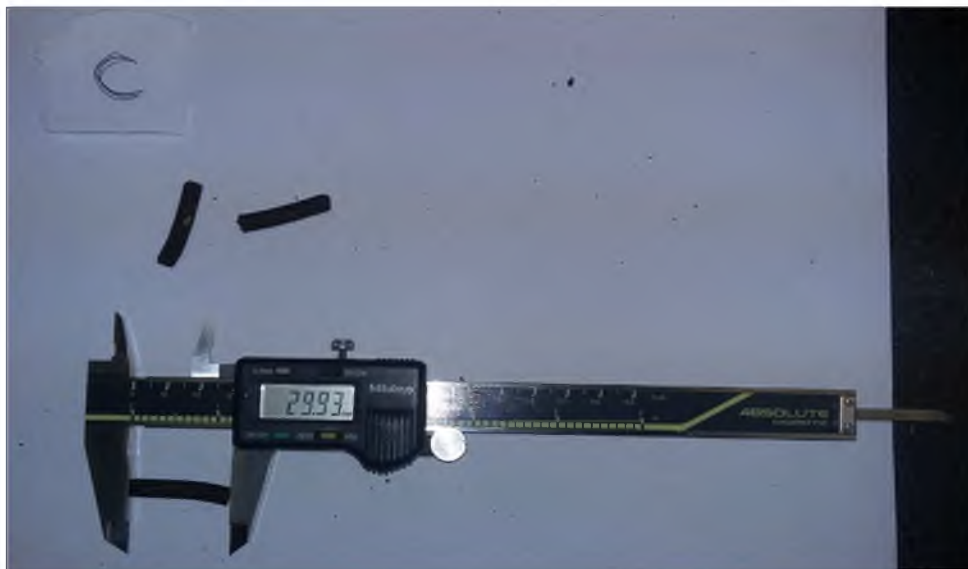
Donde:

$\rho_u$ : densidad unitaria ( $\text{g}/\text{dm}^3$ )

$m$ : masa del pellet (g)

$v$ : volumen del pellet ( $\text{dm}^3$ )

A continuación se muestra una figura que ejemplifica el proceso para la determinación de densidad unitaria:



**Figura 19.** Determinación de densidad unitaria en pellets.

- **3.7.1.3 Dureza mecánica**

La dureza mecánica se determinó empleando la norma ASAE 269.4 para la determinación de dureza mecánica en pellets y briquetas. Se utilizó una masa de 500 g como muestra para la prueba, la masa de 500 g se depositó en un recipiente de dimensiones de (300 x 300 x 125) mm con el fin de hacer cumplir el efecto deseado sobre los pellets este recipiente cuenta en su interior con un deflector de 230 mm fijado de forma diagonal. El recipiente se hizo girar a 50 rpm hasta lograr el giro de 500 revoluciones del recipiente, finalmente la muestra se tamizó (tamiz 3,15mm) y se determinó la masa del material que quedó en los tamices, se reportó el promedio de las tres mediciones. La dureza mecánica se determinó con la siguiente ecuación:

$$Du = 100 - \left[ \frac{mi-mf}{mi} \right] \quad (3)$$

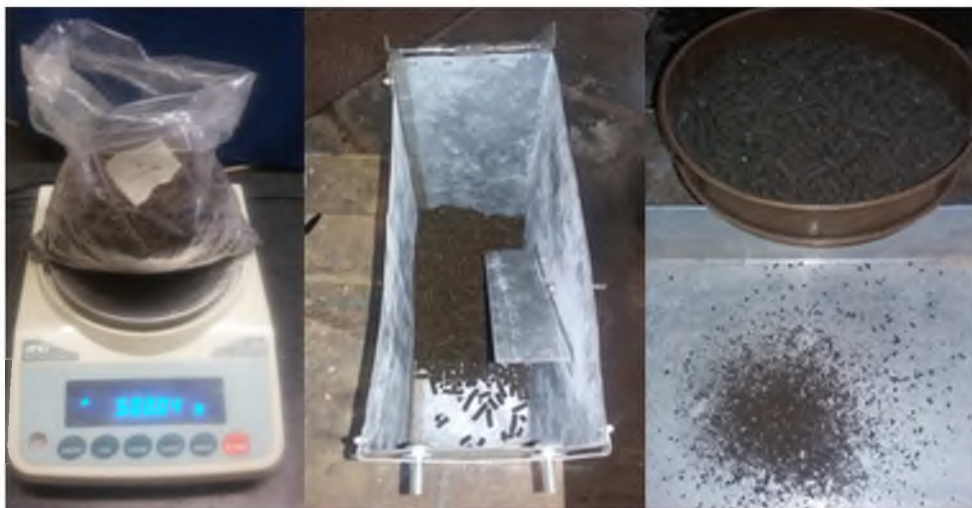
Donde:

DU: dureza mecánica (%)

mi: masa inicial de los de pellets.

mf: masa final de los pellets que quedan en el tamiz (g)

A continuación se muestra una figura que ejemplifica el proceso para la determinación de dureza mecánica:



**Figura 20.** Determinación de la dureza mecánica en pellets.

- **3.7.1.4 Friabilidad**

Los ensayos de friabilidad en pellets son sencillos de realizar ya que no se necesitan equipos más que un piso cerámico y una cinta métrica. La metodología utilizada se basa en el método comúnmente ocupado en los Laboratorios de Termodinámica y Motores de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSI de Montes), en donde se arroja uno a uno el pellet desde una altura de 1m a un piso de cerámica y se observa para cada pellet en cuantas partes se rompe (2, 3 o más partes). Finalmente se aplica la siguiente ecuación que relaciona los pellets iniciales y resultantes según Camps & Marcos (2002):

$$Fr = \frac{Ni}{Nf} \quad (4)$$

Donde:

FR: friabilidad resultante (adimensional),

Ni: número de pellets al inicio del ensayo

Nf: número de pellets al final del ensayo (pellets enteros y fraccionados).

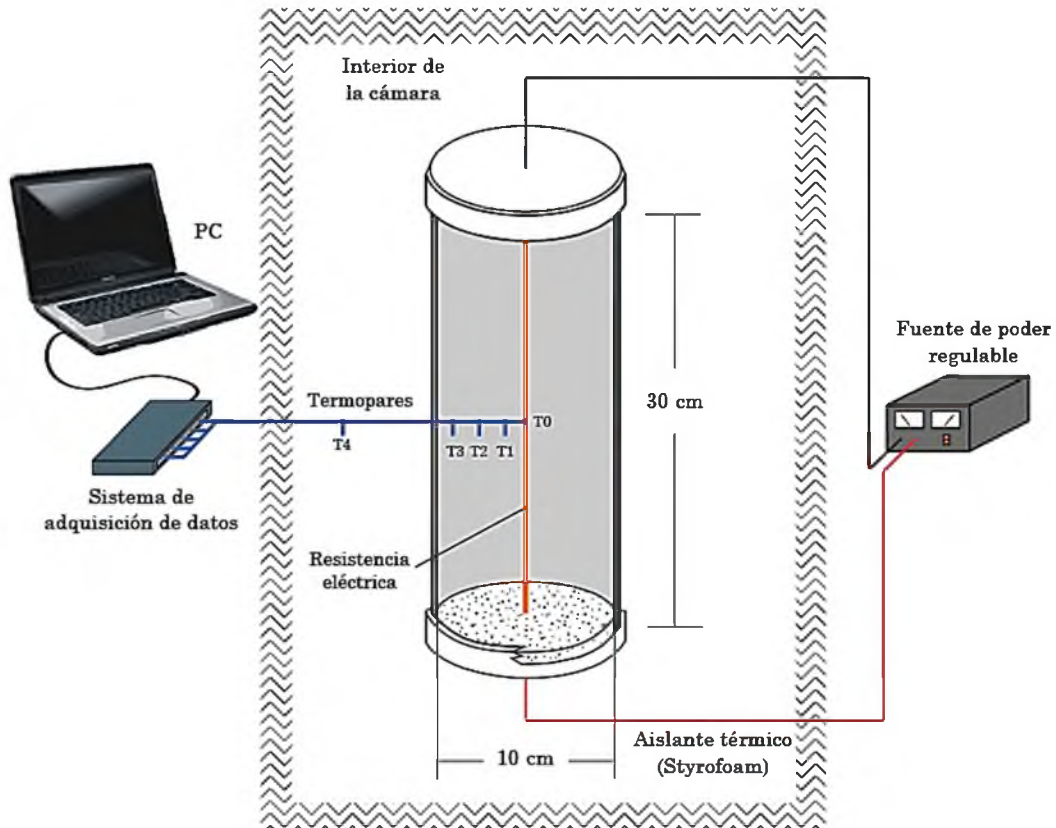
A continuación se muestra una figura que ejemplifica el proceso para la determinación de friabilidad:



**Figura 21.** Determinación de la friabilidad en pellets.

### 3.7.2 Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas se determinaron con el principio del cilindro infinito, se determinó el calor específico, difusividad térmica y conductividad térmica. El equipo sigue la metodología de Guo et al. (2013) y Bitra et al. (2010) a la cual se le realizaron pequeñas modificaciones, a continuación se muestra una figura con el principio de funcionamiento:



**Figura 22.** Equipo utilizado para determinación de propiedades térmicas en pellets. Fuente: (Carrillo, 2015).

El equipo funcionó bajo el fundamento termodinámico de un cilindro infinito. Está construido con tubo PVC de 10 cm de diámetro y 30 cm de largo; en sus dos extremos está recubierto con aislante térmico ("Styrofoam") y sellado con tapones de los cuales uno es removible con el fin de rellenar con muestra de pellets el cilindro. A lo largo del eje central del cilindro pasa una resistencia eléctrica de 30 cm de largo, que funciona como fuente de calor lineal; se asume que se da conducción de calor unidireccional y radial a partir de la

fuerza lineal de calor. Se aplicó a la resistencia un voltaje de 1,75 V y un consumo de corriente eléctrica de 1,50 A. El equipo se puso en funcionamiento dentro de una cámara tipo incubadora con temperatura constante de 23 °C (Carrillo, 2015).

Las corridas experimentales del equipo consisten en llenar el cilindro de la muestra de pellets y activar la fuente de poder, seguidamente se registra el cambio de la temperatura de la resistencia y diferentes puntos en el interior del cilindro según como se indica en la Figura 23. Lo anterior es realizado con 4 termopares; el termopar T0 registra el cambio de la temperatura de la resistencia y otros tres termopares T1, T2, y T3 registran la temperatura en puntos ubicados a una distancia radial de 1 cm, 2,5 cm y 4 cm respectivamente; un último termopar T4 registra la temperatura de la cámara. Finalmente, el cambio en los perfiles de temperatura con el tiempo para cada uno de los puntos estudiados (T0, T1, T2, y T3), se relacionan con la conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico de la muestra (Carrillo, 2015).

Por su parte Ramaswamy, Raghavan, Chakraverty & Mujumbar (2003) permite determinar la conductividad térmica mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{q}{4\pi L(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad (5)$$

Donde:

K: conductividad térmica de la muestra ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )

q: potencia disipada por la resistencia (W)

L: longitud del cilindro (m)

T1 y T2: temperaturas inicial y final de la resistencia respectivamente (°C)

t1 y t2: tiempos inicial y final respectivamente (s)

La difusividad térmica se determina según Moura, Devilla & Martins (2010) mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \left[ \frac{e^{\left(\frac{4\pi K \Delta T}{q} + y\right)}}{4t} \right] * r^2 \quad (6)$$

Donde:

$\alpha$ : difusividad térmica de la muestra ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

$r$ : distancia radial de toma de lecturas (m)

$\Delta T$ : gradiente de temperatura a la distancia  $r$  ( $^{\circ}C$ )

$k$ : conductividad térmica de la muestra ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$q$ : potencia disipada por la resistencia (W)

$y$ : constante de Euler ( $y = 0,5772$ )

$t$ : intervalo de tiempo de las mediciones (s)

El calor específico se puede determinar de forma indirecta conociendo la difusividad térmica, la conductividad y la densidad aparente. Según Ramaswamy et al. (2003) el calor específico lo podemos determinar con la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{k}{\alpha * \rho_a} \quad (7)$$

Donde:

$C_p$ : calor específico de la muestra ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$k$ : conductividad térmica de la muestra ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$\alpha$ : difusividad térmica de la muestra ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

$\rho_a$ : densidad aparente de la muestra ( $kg \cdot m^{-3}$ )



### 3.7.3 Propiedades fisicoquímicas

- **3.7.3.1 Contenido de cenizas**

Se determinó bajo la norma CEN/TS 14775:2009, elaborada por el Comité Europeo de Estandarización para la determinación del contenido de cenizas de biocombustibles sólidos, este método es equivalente al de normativas de entes como ISO o ASTM.

El procedimiento consistió en la selección de una muestra superior a un 1 g de pellets, esta se colocó en un horno llamado tipo estufa durante 90 minutos a 250 °C, posteriormente se aumentó la temperatura a 550 °C y se mantuvo durante 150 minutos. Finalmente se registró la masa de las cenizas que se obtuvieron al final de este proceso para determinar el contenido de cenizas mediante la siguiente fórmula:

$$C_{bs} = \frac{100 \cdot m_f}{m_i} \cdot \frac{100}{(100 - CH_{bs})} \quad (8)$$

Donde:

$C_{bs}$ : contenido de cenizas de la muestra de pellets en base seca expresado en (%).

$m_i$ : masa inicial de la muestra de pellets (g) que debe ser superior a 1 g.

$m_f$ : masa final de las cenizas (g).

$CH_{bs}$ : contenido de humedad de la muestra en base seca (%).

El procedimiento anterior se realizó tres veces para cada tratamiento y se reportó el promedio de las tres mediciones.

#### 3.7.3.2 Poder calorífico

El poder calorífico de los pellets se determinó siguiendo el protocolo PC-03-004 del Laboratorio de Química de la Atmósfera, basado en el método ASTM D-4809, descrito por

la Sociedad Norteamericana para Pruebas y Materiales. El análisis se realizó utilizando una Bomba Calorimétrica marca IKA, modelo 200.

#### **3.7.3.2 Porcentaje de nitrógeno**

El análisis del porcentaje de nitrógeno se realizó en el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT) de la Escuela de Química de la Universidad Nacional de Costa Rica. El porcentaje de Nitrógeno se determinó siguiendo el protocolo PC-03-008 del Laboratorio de Química de la Atmósfera, basado en el método ASTM D-3828, descrito por la Sociedad Norteamericana para Pruebas y Materiales.

#### **3.7.3.3 Porcentaje de azufre y cloruros**

El análisis de porcentaje de azufre y cloruros se realizó en el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT) de la Escuela de Química de la Universidad Nacional de Costa Rica. En la determinación del porcentaje de azufre y cloruros, se utilizó el protocolo de análisis PC-03-002 del Laboratorio de Química de la Atmósfera, LAQAT-UNA. Se utilizaron tubos de vidrio de 60,0 cm de longitud y 0,60 cm de diámetro interno, recubiertos en su superficie interior con carbonato de sodio. El análisis de los ácidos se realizó en un Cromatógrafo de Iones HPLC Dionex, modelo 5000, equipado con un Detector de Conductividad Eléctrica y una Columna IonPac® AS23, de 4 mm de diámetro interno y 25,0 cm de largo.

#### **3.7.3.4 Metales en cenizas**

El análisis de metales en cenizas se realizó en el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT) de la Escuela de Química de la Universidad Nacional de Costa Rica. El análisis de los metales contenidos en las cenizas, se realizó siguiendo el protocolo PC-03-009 del Laboratorio de Química de la Atmósfera, basado en el método ASTM D-482, descrito por la Sociedad Norteamericana para Pruebas y Materiales. Las muestras se

calcinaron a 750 °C en una mufla marca Thermolyne, modelo F- D1525M, luego fueron digeridas en Agua Regia, y se analizaron en un ICP, Thermo Jarrel-Ash, modelo Iris.

### **3.8 Análisis estadístico de los datos**

Se realizaron pruebas a los pellets de piña por triplicado, posteriormente se reportó el promedio de los datos para el análisis estadístico. En primera instancia se aplicó el test Shapiro-Wilk a los datos obtenidos con la finalidad de verificar si se ajustan a una distribución estadística normal, para determinar la normalidad de los datos se utilizó un valor  $\alpha = 0,05$ .

Posteriormente se realizó un análisis de varianza, se aplicó el test estadístico SNK, conocido como “T de Student”. Se utilizó para el análisis de varianza un valor de  $\alpha = 0,05$  con la finalidad de determinar diferencias significativas entre las medias de las propiedades evaluadas en los diferentes tratamientos estudiados.

La incertidumbre de los resultados se determinó mediante el programa Engineering Equation Solver (ESS); específicamente mediante su herramienta propagación de incertidumbres (Uncertainty Propagation) que permite obtener la incertidumbre de los resultados obtenidos en las diferentes propiedades evaluadas en esta investigación.

## **CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Los resultados obtenidos así como su respectivo análisis se presentan por secciones, en primera instancia el nombre de la propiedad evaluada, posteriormente los resultados y análisis para la biomasa de rastrojo de piña, broza de café y mezcla en el orden mencionado.

Se muestran los resultados de forma gráfica con la finalidad de apreciar de mejor forma el efecto de cada tratamiento sobre la propiedad estudiada, posteriormente se presenta en forma tabulada los resultados obtenidos para cada propiedad en donde se puede observar el comportamiento obtenido según los tratamientos aplicados. Finalmente se presenta el análisis estadístico de los resultados obtenidos y la discusión sobre el efecto de cada tratamiento sobre los resultados de la propiedad estudiada, seguidamente se realiza una comparación sobre los parámetros requeridos según la normativa internacional para pellets elaborados con residuos agroindustriales.

Se muestran tres secciones con los resultados obtenidos y la discusión de los mismos según el tipo de propiedad, se presentan propiedades físicas, propiedades térmicas y finalmente propiedades físicoquímicas.

### **4.1 Tratamientos seleccionados para la investigación**

En base a las pruebas preliminares y pruebas de calibración de la pelletizadora se seleccionaron cinco tratamientos para cada biomasa, estos tratamientos tuvieron el objetivo de evaluar el efecto del contenido de humedad y tamaño de partícula sobre las propiedades de los pellets. Además se realizó la mezcla de rastrojo de piña y broza de café, también se realizaron cinco tratamientos para la mezcla. A continuación se muestran los tratamientos empleados:

**Tabla 4.** Tratamientos aplicados a cada biomasa según contenido de humedad y tamaño de partícula.

| <b>Biomasa</b>          | <b>Tratamiento</b> | <b>Contenido de humedad inicial (%) bh</b> | <b>Contenido de humedad final (%) bh</b> | <b>Tamaño de Partícula (mm)</b> |
|-------------------------|--------------------|--|--|---------------------------------|
| <b>Rastrojo de Piña</b> | A                  | 25   | 18                                       | Fibra entera                    |
|                         | B                  | 35   | 20                                       | Fibra entera                    |
|                         | C                  | 45   | 24                                       | Fibra entera                    |
|                         | D                  | 35   | 21                                       | 4,75                            |
|                         | E                  | 35   | 20                                       | 9,50                            |
| <b>Broza de Café</b>    | A                  | 25   | 19                                       | Broza entera                    |
|                         | B                  | 35   | 20                                       | Broza entera                    |
|                         | C                  | 45   | 25                                       | Broza entera                    |
|                         | D                  | 35   | 22                                       | 4,75                            |
|                         | E                  | 35   | 20                                       | 9,50                            |
| <b>Mezcla</b>           | A                  | 25   | 18                                       | Fibra entera- Broza entera      |
|                         | B                  | 35   | 20                                       | Fibra entera- Broza entera      |
|                         | C                  | 45   | 24                                       | Fibra entera- Broza entera      |
|                         | D                  | 35   | 21                                       | 4,75                            |
|                         | E                  | 35   | 20                                       | 9,50                            |

La tabla anterior nos muestra los cinco tratamientos realizados a cada biomasa, es importante mencionar que el contenido de humedad que se reporta en la Tabla 4 es el de entrada a la pelletizadora, el cual es el único que se puede tener control ya que después de pelletizada, cada biomasa tiene un comportamiento distinto en cuanto a pérdida de humedad como se muestra en la columna contenido de humedad final.

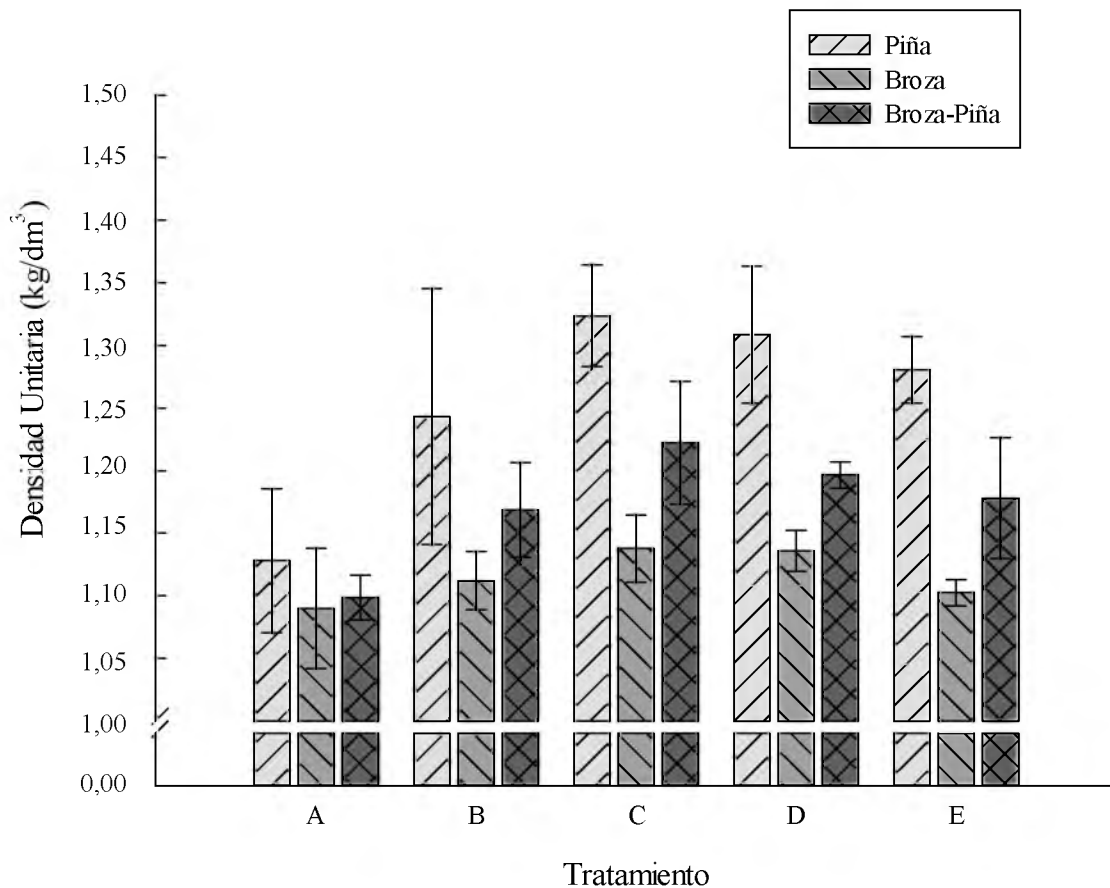
## 4.2 Propiedades físicas

Se evaluaron cuatro propiedades físicas en base a las normativas internacionales para pellets elaborados con residuos agroindustriales, se muestra de manera gráfica en primera instancia los resultados obtenidos, posteriormente de forma tabulada en donde se

adjunta incertidumbre y desviación estándar de los resultados. Posteriormente se presenta el análisis de varianza y la comparación entre medias que permiten apreciar de una mejor manera la existencia o no de diferencias significativas entre los tratamientos estudiados. Se muestran densidad unitaria, densidad aparente, dureza mecánica y friabilidad a continuación:

- 4.2.1 Densidad unitaria

A continuación se muestra de forma gráfica los resultados obtenidos de la propiedad densidad unitaria para los pellets elaborados con rastrojo de piña, broza de café y la mezcla de las biomásas:



**Figura 23.** Densidad unitaria obtenida para las diferentes biomásas estudiadas y tratamientos evaluados.

Se presentan los cinco tratamientos aplicados a cada biomasa. Se puede observar como los pellets elaborados con biomasa de rastrojo de piña presentan la mayor densidad unitaria para todos los tratamientos, esto lo podemos atribuir a la lignina presente en el rastrojo de piña que permite en el proceso de pelletizado la cohesión de mejor manera esto porque realiza la función de aglutinante.

Además es importante resaltar como los pellets realizados con broza de café tienen la menor densidad unitaria en todos los tratamientos, la mezcla por su parte para todos los tratamientos aplicados estuvo entre los valores de rastrojo de piña y broza de café, esto permite verificar como realizando mezclas podemos mejorar las propiedades de los pellets, en este caso la densidad unitaria.

Se presenta a continuación los resultados obtenidos para la biomasa de piña para los diferentes tratamientos aplicados, además se muestra la desviación estándar y la incertidumbre de las mediciones:

**Tabla 5.** Densidad unitaria obtenida para la biomasa de piña

| Tratamiento | Densidad unitaria              |                             |                                  |
|-------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
|             | $\rho_u$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | $\pm$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | Desv. Est. (kg/dm <sup>3</sup> ) |
| <b>A</b>    | 1,128                          | 0,011                       | 0,057                            |
| <b>B</b>    | 1,243                          | 0,012                       | 0,102                            |
| <b>C</b>    | 1,324                          | 0,012                       | 0,041                            |
| <b>D</b>    | 1,309                          | 0,007                       | 0,055                            |
| <b>E</b>    | 1,280                          | 0,007                       | 0,027                            |

La tabla anterior muestra los resultados de densidad unitaria para los pellets elaborados de rastrojo de piña. Se puede observar como el menor valor reportado de densidad unitaria corresponde al tratamiento A (contenido de humedad 25 % bh, fibra entera de rastrojo de piña) y el mayor valor al tratamiento C (contenido de humedad 45 % bh, fibra entera de rastrojo de piña) lo cual nos muestra la relación directa entre el contenido de humedad y la densidad unitaria. A mayor contenido de humedad, mayor valor

de densidad unitaria lo cual se justifica al agua ligada en los pellets, entre más alto el contenido más cantidad de agua contiene el pellet lo cual se refleja en el valor de densidad.

También es importante apreciar la influencia del tamaño de partícula sobre la densidad unitaria, el tratamiento B, D y E presentan el mismo contenido de humedad (35 % bh) pero diferentes tamaños de partícula (fibra entera de rastrojo de piña, partícula de 4,75 mm y 9,50 mm respectivamente. Se puede apreciar como al disminuir el tamaño de partícula la densidad unitaria aumenta, esto se justifica debido a un mejor pelletizado de las partículas de menor tamaño ya que logran un mejor acomodo y una mejor cohesión entre partículas.

El análisis de varianza realizado para densidad unitaria en los pellets elaborados con rastrojo de piña muestra el valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ), con lo cual se puede afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados.

A continuación se presenta la comparación entre medias de los cinco tratamientos estudiados en los pellets de rastrojo de piña, se encontró diferencia significativa para el tratamiento A con respecto a los otros tratamientos como se muestra a continuación:

**Tabla 6.** Comparación de medias de la densidad unitaria en pellets de rastrojo de piña

| <b>Tratamiento</b>  | <b>Medias</b> | <b>n</b> | <b>E.E.</b> | <b>Comparación</b> |
|---|---------------|----------|-------------|--------------------|
| <b>A</b>  | 1,12          | 3        | 0,03        | A                  |
| <b>B</b>  | 1,24          | 3        | 0,03        | B                  |
| <b>C</b>  | 1,32          | 3        | 0,03        | B                  |
| <b>D</b>  | 1,31          | 3        | 0,04        | B                  |
| <b>E</b>  | 1,28          | 3        | 0,04        | B                  |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p &gt; 0,05</math>)</b> |               |          |             |                    |

En base al análisis de varianza y la comparación de medias que podemos observar en la tabla anterior existen diferencias significativas entre el tratamiento A con respecto a los otros tratamientos, también en la tabla podemos visualizar en los tratamientos A, B y C



como al aumentar el contenido de humedad aumentaron las medias de la propiedad densidad unitaria.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la de broza de café en los diferentes tratamientos aplicados, se muestra además la desviación estándar y la incertidumbre:

**Tabla 7.** Densidad unitaria obtenida para la biomasa de broza de café.

| Tratamiento | Densidad unitaria              |                             |                                  |
|-------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
|             | $\rho_u$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | $\pm$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | Desv. Est. (kg/dm <sup>3</sup> ) |
| <b>A</b>    | 1,090                          | 0,007                       | 0,048                            |
| <b>B</b>    | 1,112                          | 0,011                       | 0,023                            |
| <b>C</b>    | 1,138                          | 0,011                       | 0,027                            |
| <b>D</b>    | 1,136                          | 0,012                       | 0,016                            |
| <b>E</b>    | 1,102                          | 0,011                       | 0,011                            |

En la tabla anterior podemos apreciar como el tratamiento C (contenido de humedad 45 % bh, broza de café entera) es el que presenta mayor valor sobre la propiedad densidad unitaria, al igual que en rastrojo de pïña se observa la relación directa entre contenido de humedad y densidad unitaria. A mayor contenido de humedad mayor valor reportado de densidad unitaria, esto debido a la mayor cantidad de agua que almacena el pellets.

También es importante mencionar el efecto del tamaño de partícula sobre la densidad unitaria, se puede apreciar como los tratamientos B, E y D presentan una tendencia al aumento de densidad unitaria en el orden mencionado, siendo el tratamiento D (contenido de humedad 35 % bh y tamaño de partícula 4,75 mm) el que presenta el mayor valor de densidad unitaria. Esto se justifica debido a que entre menor el tamaño de partícula se da un mejor proceso de pelletizado, lo cual se refleja en el valor de la densidad unitaria.

El análisis de varianza realizado para densidad unitaria en los pellets elaborados con broza de café reporta según el valor de p obtenido, que no cumple ( $p < 0,001$ ) con lo cual se puede afirmar que no existe interacción estadísticamente significativa para los

tratamientos estudiados, esto se visualiza de mejor manera en la comparación de medias que se muestra a continuación de forma tabulada:

**Tabla 8.** Comparación de medias de la densidad unitaria en pellets de broza de café

| Tratamiento   | Medias | n | E.E. | Comparación |
|---|--------|---|------|-------------|
| <b>A</b>  | 1,09   | 3 | 0,01 | A           |
| <b>B</b>  | 1,11   | 3 | 0,01 | A           |
| <b>C</b>  | 1,14   | 3 | 0,01 | A           |
| <b>D</b>  | 1,14   | 3 | 0,02 | A           |
| <b>E</b>  | 1,10   | 3 | 0,02 | A           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p&gt;0,05</math>)</b> |        |   |      |             |

Finalmente se muestran los resultados obtenidos de la densidad unitaria en la mezcla de rastrojo de piña y broza de café para los diferentes tratamientos evaluados:

**Tabla 9.** Densidad unitaria obtenida para la mezcla

| Tratamiento | Densidad unitaria              |                             |                                  |
|-------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
|             | $\rho_u$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | $\pm$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | Desv. Est. (kg/dm <sup>3</sup> ) |
| <b>A</b>    | 1,099                          | 0,012                       | 0,018                            |
| <b>B</b>    | 1,169                          | 0,012                       | 0,038                            |
| <b>C</b>    | 1,222                          | 0,007                       | 0,049                            |
| <b>D</b>    | 1,197                          | 0,011                       | 0,011                            |
| <b>E</b>    | 1,178                          | 0,009                       | 0,049                            |

La tabla anterior nos muestra los valores de la densidad unitaria para la mezcla de rastrojo de piña y broza de café, en la cual se puede observar como al igual que en broza de café y rastrojo de piña se da una relación directa entre el tamaño de partícula y contenido de humedad sobre la densidad unitaria, obteniendo los mayores valores los tratamientos con contenido de humedad más alto y el menor tamaño de partícula.

Se realizó el análisis de varianza para densidad unitaria en los pellets elaborados de la mezcla rastrojo de piña y broza de café, en base al valor de p obtenido que cumple ( $p<0,001$ ) se puede afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados.

Se muestra a continuación la comparación de medias de la densidad unitaria para la mezcla mencionada anteriormente, en donde se ratifica la existencia de diferencias significativas entre tratamientos:

**Tabla 10.** Comparación de medias sobre densidad unitaria a pellet de rastrojo de piña

| <b>Tratamiento</b>  | <b>Medias</b> | <b>n</b> | <b>E.E.</b> | <b>Comparación</b> |
|---|---------------|----------|-------------|--------------------|
| <b>A</b>  | 1,10          | 3        | 0,02        | <b>A</b>           |
| <b>B</b>  | 1,17          | 3        | 0,02        | <b>B</b>           |
| <b>C</b>  | 1,22          | 3        | 0,02        | <b>B</b>           |
| <b>D</b>  | 1,20          | 3        | 0,02        | <b>B</b>           |
| <b>E</b>  | 1,18          | 3        | 0,02        | <b>B</b>           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p&gt;0,05</math>)</b> |               |          |             |                    |

En base al análisis de varianza y la comparación de medias podemos ver como los tratamientos B, C, D y E no son significativamente diferentes entre ellos ( $p>0,05$ ), el tratamiento A si presenta diferencias significativas con respecto a los otros tratamientos. En la comparación entre medias también es importante visualizar en la tabla anterior como al aumentar el contenido de humedad en los tratamientos y disminuir el tamaño de partícula se refleja un pequeño incremento en los valores de densidad unitaria reportados.

Se presenta un análisis de varianza y una comparación de medias entre tratamientos iguales para las tres biomásas estudiadas, rastrojo de piña, broza de café y la mezcla de las dos anteriores. Mediante este análisis se puede apreciar la influencia de cada biomasa sobre la densidad unitaria en un tratamiento en común.

A continuación se presentan los resultados de la comparación entre medias de la densidad unitaria en pellets de diferentes biomásas estudiadas:

**Tabla 11.** Comparación de medias de la densidad unitaria en pellets de las diferentes biomosas estudiadas

| Tratamiento   | Biomasa          | Medias | n | E.E. | Comparación |
|---|------------------|--------|---|------|-------------|
| A   | Rastrojo de pïña | 1,13   | 3 | 0,02 | A           |
|   | Broza de caf e   | 1,09   | 3 | 0,02 | A           |
|   | Mezcla           | 1,10   | 3 | 0,02 | A           |
| B   | Rastrojo de pïña | 1,24   | 3 | 0,03 | A           |
|   | Broza de caf e   | 1,11   | 3 | 0,03 | B           |
|   | Mezcla           | 1,17   | 3 | 0,03 | A B         |
| C   | Rastrojo de pïña | 1,32   | 3 | 0,02 | C           |
|   | Broza de caf e   | 1,14   | 3 | 0,02 | A           |
|   | Mezcla           | 1,22   | 3 | 0,02 | B           |
| D   | Rastrojo de pïña | 1,31   | 3 | 0,02 | B           |
|   | Broza de caf e   | 1,14   | 3 | 0,02 | A           |
|   | Mezcla           | 1,20   | 3 | 0,02 | A           |
| E   | Rastrojo de pïña | 1,28   | 3 | 0,02 | C           |
|   | Broza de caf e   | 1,10   | 3 | 0,02 | A           |
|   | Mezcla           | 1,18   | 3 | 0,02 | B           |
| <b>Medias con una letra com n no son significativamente diferentes (<math>p&gt;0,05</math>)</b> |                  |        |   |      |             |

La tabla anterior nos muestra la comparaci n entre medias de un mismo tratamiento pero variando la biomasa utilizada. Podemos visualizar como en el tratamiento A no se encontraron diferencias significativas, tratamientos B, C, D y E si mostraron diferencias para las biomosas estudiadas, adem s es importante recalcar como los mayores valores de densidad unitaria se obtuvieron para pellets elaborados con rastrojo de pïña.

Los resultados obtenidos para las diferentes biomosas y los tratamientos aplicados a cada una de ellas nos muestran como la densidad unitaria es proporcional al tama o de

partícula y contenido de humedad. El tamaño de partícula se reflejó en los valores obtenidos de densidad unitaria, entre menor el tamaño de partícula mayor fue la densidad unitaria reportada, aspecto que se justifica ya que entre menor el tamaño de partícula mejor es su distribución y acomodo en el proceso de pelletizado lo que se refleja en mayores valores de densidad unitaria.

Aparte de contenido de humedad, la distribución del tamaño de partícula y el tamaño de las partículas son dos factores importantes que afectan a las propiedades físicas. La densidad depende del tamaño de partícula y distribución del tamaño de partícula. La distribución de tamaño de partícula también se refleja en la superficie disponible. Los tamaños de partícula afectan a la densidad real o unitaria de los materiales de alimentación y también influyen en la durabilidad (Karunanithy, Wang, Muthukumarappan, & Pugalendhi, 2012).

Por su parte González, Rincón, Camargo, Dévora, & Sierra (2014) mencionan que según la norma Austriaca ÖNORM M 7135 (Austrian Standard, 2000), la densidad de los pellets debe ser  $\geq 1,12 \text{ kg/dm}^3$ . En sus tratamientos obtuvieron que los pellets de tratamientos 3 y 5 con biomasa de palma de aceite cumplieron con este parámetro, lo que indica que entre menor sea el tamaño de partícula de la materia prima mejor será su densidad unitaria. En base a la apreciación anterior se confirma la relación directa entre el tamaño de partícula y el valor de densidad unitaria, a menor tamaño de partícula mejor es su proceso de pelletizado lo cual se refleja en la densidad unitaria.

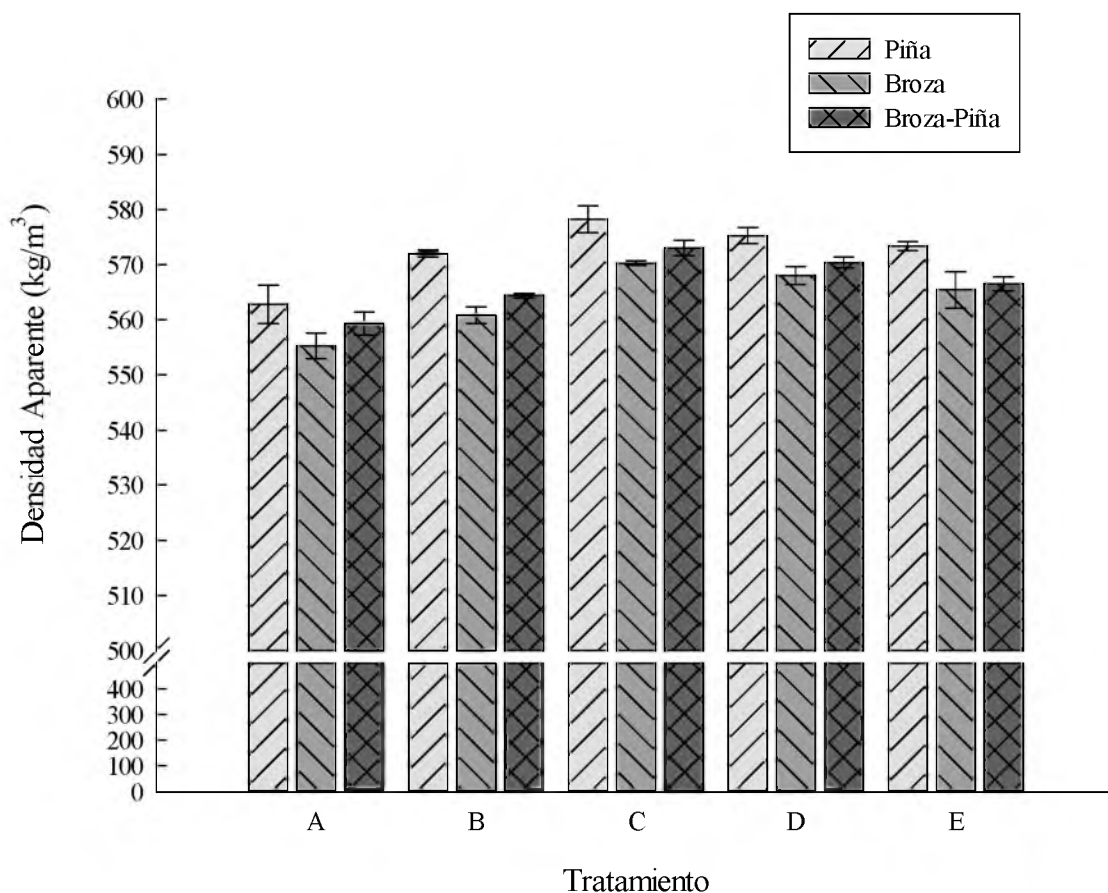
El contenido de humedad desempeña un papel importante en todo biocombustible, debido a que determina la facilidad de compactación de la materia prima, la estabilidad y durabilidad de los pellets (González et al., 2014). Lo anterior nos ratifica la influencia del contenido de humedad sobre la densidad unitaria, en donde para las diferentes biomásas estudiadas se determinó que a mayor contenido de humedad se reportó un mayor valor de densidad unitaria, lo cual se puede atribuir al mayor porcentaje de humedad (agua) que conserva el pellet. En su estudio González et al. (2014) encontraron resultados similares del

efecto del tamaño de partícula y contenido de humedad sobre la densidad unitaria en pellets elaborados con palma de aceite y palma de coco.

Con respecto a la Normativa NF EN 14961-2 que se muestra en la Tabla 1 esta no presenta algún valor o requisito que deben cumplir los pellets de calidad agroindustrial en cuanto a la propiedad de densidad unitaria.

- 4.2.2 Densidad aparente

A continuación se muestran los resultados obtenidos en forma gráfica de la densidad aparente para los pellets de rastrojo de piña, broza de café y la mezcla según los tratamientos evaluados en la presente investigación.



**Figura 24.** Densidad aparente obtenida para las diferentes biomásas estudiadas y tratamientos evaluados.

La figura anterior muestra los resultados de la propiedad densidad aparente para los diferentes tratamientos y biomásas estudiados en los pellets. Se puede apreciar como los pellets de rastrojo de piña obtuvieron los mayores valores de densidad aparente para todos los tratamientos, esto atribuye a que la biomasa de rastrojo de piña se pelletizó de mejor manera debido al contenido de lignina presente. En general los valores de densidad unitaria se mantuvieron en un rango de  $555 \text{ kg/m}^3$  a  $578 \text{ kg/m}^3$ , obteniendo los menores valores para los pellets elaborados con broza de café.

Se presentan los resultados obtenidos en forma tabulada de los pellets elaborados con rastrojo de piña, además se muestra la desviación estándar y la incertidumbre asociada de los resultados obtenidos:

**Tabla 12.** Densidad aparente obtenida para la biomasa de piña

| Tratamiento | Densidad aparente       |                       |                                |
|-------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
|             | $\rho_a(\text{kg/m}^3)$ | $\pm (\text{kg/m}^3)$ | Desv. Est. ( $\text{kg/m}^3$ ) |
| <b>A</b>    | 562,8                   | 5,9                   | 3,5                            |
| <b>B</b>    | 572,0                   | 6,6                   | 0,7                            |
| <b>C</b>    | 578,2                   | 6,6                   | 2,4                            |
| <b>D</b>    | 575,3                   | 5,8                   | 1,5                            |
| <b>E</b>    | 573,3                   | 6,7                   | 0,8                            |

Se obtuvo un valor de  $578,2 \text{ kg/m}^3$  para el tratamiento C (contenido de humedad 45 %, fibra entera de rastrojo de piña), este fue el mayor valor obtenido para densidad aparente y se puede apreciar en comparación con el tratamiento A y B como al aumentar contenido de humedad se aumenta la densidad aparente. También se puede observar en los tratamientos B, D y E como la densidad aparente es directamente proporcional al tamaño de partícula, a menor tamaño de partícula mayor es la densidad aparente como lo refleja el tratamiento D.

El análisis de varianza realizado para densidad aparente en los pellets elaborados con rastrojo de piña permite en base al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ) que se puede afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los

tratamientos estudiados. La comparación entre medias de los cinco tratamientos estudiados en los pellets de rastrojo de piña se muestra a continuación:

**Tabla 13.** Comparación de medias de la densidad aparente en pellets de rastrojo de piña

| Tratamiento   | Medias | n | E.E. | Comparación |
|---|--------|---|------|-------------|
| A   | 562,78 | 3 | 1,20 | A           |
| B   | 572,03 | 3 | 1,20 | B           |
| C   | 578,23 | 3 | 1,20 | C           |
| D   | 575,27 | 3 | 1,20 | B C         |
| E   | 573,35 | 3 | 1,20 | B           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p&gt;0,05</math>)</b> |        |   |      |             |

La tabla anterior nos muestra como se encontraron diferencias significativas en los diferentes tratamientos aplicados recalando las diferencias en los tratamientos A, B y C que son los tratamientos realizados a diferentes contenidos de humedad y mismo tamaño de partícula, lo cual ratifica la influencia del contenido de humedad sobre la densidad aparente obteniéndose los mayores valores en el contenido de humedad más alto (tratamiento C).

Los resultados de los pellets elaborados con broza de café se muestran a continuación de forma tabulada en donde también se muestra la desviación estándar y la incertidumbre asociada:

**Tabla 14.** Densidad aparente obtenida para la biomasa de broza de café

| Tratamiento | Densidad aparente       |                       |                                |
|-------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
|             | $\rho_a(\text{kg/m}^3)$ | $\pm (\text{kg/m}^3)$ | Desv. Est. ( $\text{kg/m}^3$ ) |
| A           | 555,3                   | 6,8                   | 2,3                            |
| B           | 560,9                   | 6,6                   | 1,5                            |
| C           | 570,3                   | 5,8                   | 0,4                            |
| D           | 568,1                   | 6,8                   | 1,6                            |
| E           | 565,4                   | 6,6                   | 3,3                            |



Con respecto a la densidad aparente en pellets elaborados con broza de café podemos observar la misma tendencia que se presentó para los pellets de rastrojo de piña, en donde la densidad aparente es proporcional al contenido de humedad y tamaño de partícula, a mayor contenido de humedad y menor tamaño de partícula se reporta un mayor valor de densidad aparente.

El análisis de varianza realizado para densidad aparente en los pellets elaborados con broza de café, en base al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ) permite afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados.

Se muestra a continuación la comparación de medias de la densidad aparente para los pellets de broza de café, en donde se ratifica la existencia de diferencias significativas entre tratamientos, a continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos de esta comparación:

**Tabla 15.** Comparación de medias de la densidad aparente en pellets de broza de café

| <b>Tratamiento</b>  | <b>Medias</b> | <b>n</b> | <b>E.E.</b> | <b>Comparación</b> |
|---|---------------|----------|-------------|--------------------|
| <b>A</b>  | 555,30        | 3        | 1,19        | A                  |
| <b>B</b>  | 560,88        | 3        | 1,19        | B                  |
| <b>C</b>  | 570,29        | 3        | 1,19        | D                  |
| <b>D</b>  | 568,06        | 3        | 1,19        | C D                |
| <b>E</b>  | 565,43        | 3        | 1,19        | C                  |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p &gt; 0,05</math>)</b> |               |          |             |                    |

La tabla anterior nos muestra como se encontraron diferencias significativas en cuatro de los cinco tratamientos aplicados a los pellets elaborados con broza de café. Si observamos los valores de las medias en la tabla anterior podemos ver el aumento de las medias a como se aumento el contenido de humedad y disminuyo el tamaño de partícula, resaltando el tratamiento D (contenido de humedad 35 % bh, tamaño de partícula 4,75mm).

Finalmente se muestran los resultados obtenidos para la propiedad densidad aparente para la mezcla de rastrojo de piña y broza de café, se muestra además desviación estándar e incertidumbre asociada:

**Tabla 16.** Densidad aparente obtenida para la mezcla rastrojo de piña y broza de café

| Tratamiento | Densidad aparente       |                       |                                |
|-------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
|             | $\rho_a(\text{kg/m}^3)$ | $\pm (\text{kg/m}^3)$ | Desv. Est. ( $\text{kg/m}^3$ ) |
| <b>A</b>    | 559,3                   | 5,8                   | 2,1                            |
| <b>B</b>    | 564,4                   | 6,2                   | 0,4                            |
| <b>C</b>    | 573,0                   | 5,8                   | 1,4                            |
| <b>D</b>    | 570,4                   | 6,6                   | 1,0                            |
| <b>E</b>    | 566,5                   | 6,6                   | 1,2                            |

La tabla anterior nos muestra los resultados obtenidos para densidad aparente de los pellets elaborados de la mezcla de broza de café y rastrojo de piña, se puede apreciar en los tratamientos A, B y C como se presenta una tendencia al aumentar contenido de humedad aumenta la densidad aparente, esto lo justifica el agua que contiene el pellet, a mayor contenido de humedad mayor cantidad de agua almacena el pellet y por ende mayor densidad aparente. También se puede observar en los tratamientos B, D y E como al disminuir el tamaño de partícula se obtienen mayores valores en densidad aparente, esto debido a que entre menor es el tamaño de partícula es mejor la cohesión entre la partículas y el proceso de pelletizado se da de mejor manera.

El análisis de varianza realizado para densidad aparente en los pellets elaborados con broza de café el valor de p obtenido cumple ( $p < 0,001$ ), se puede afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados.

La comparación entre medias de los cinco tratamientos estudiados en los pellets de mezcla entre rastrojo de piña y broza de café se muestra a continuación en donde podemos observar diferencias significativas en los diferentes tratamientos, no se encontró diferencias

significativas en el tratamiento B (contenido de humedad 35 %, broza entera) y el tratamiento E (contenido de humedad 35 %, tamaño de partícula 9,50 mm):

**Tabla 17.** Comparación de medias de la densidad aparente en pellets de mezcla rastrojo de piña y broza de café

| <b>Tratamiento</b>  | <b>Medias</b> | <b>n</b> | <b>E.E.</b> | <b>Comparación</b> |
|---|---------------|----------|-------------|--------------------|
| <b>A</b>  | 559,34        | 3        | 0,77        | A                  |
| <b>B</b>  | 564,40        | 3        | 0,77        | B                  |
| <b>C</b>  | 566,51        | 3        | 0,77        | D                  |
| <b>D</b>  | 570,38        | 3        | 0,77        | C                  |
| <b>E</b>  | 572,99        | 3        | 0,77        | B                  |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p&gt;0,05</math>)</b> |               |          |             |                    |

Se muestra comparación de medias entre tratamientos iguales para las tres biomásas estudiadas, rastrojo de piña, broza de café y la mezcla de las dos anteriores. Se aprecia la influencia de cada biomasa sobre la densidad aparente en un tratamiento en común:

**Tabla 18.** Comparación de medias de la densidad aparente en pellets de las diferentes biomásas estudiadas

| Tratamiento  | Biomasa          | Medias | n | E.E. | Comparación |
|--|------------------|--------|---|------|-------------|
| <b>A</b>   | Rastrojo de piña | 562,78 | 3 | 1,56 | B           |
|  | Broza de café    | 555,30 | 3 | 1,56 | A           |
|  | Mezcla           | 559,34 | 3 | 1,56 | A B         |
| <b>B</b>   | Rastrojo de piña | 572,03 | 3 | 0,57 | C           |
|  | Broza de café    | 560,88 | 3 | 0,57 | A           |
|  | Mezcla           | 564,40 | 3 | 0,57 | B           |
| <b>C</b>   | Rastrojo de piña | 578,23 | 3 | 0,95 | B           |
|  | Broza de café    | 570,29 | 3 | 0,95 | A           |
|  | Mezcla           | 572,99 | 3 | 0,95 | A           |
| <b>D</b>   | Rastrojo de piña | 575,27 | 3 | 0,81 | B           |
|  | Broza de café    | 568,06 | 3 | 0,81 | A           |
|  | Mezcla           | 570,38 | 3 | 0,81 | A           |
| <b>E</b>   | Rastrojo de piña | 573,35 | 3 | 1,20 | B           |
|  | Broza de café    | 565,43 | 3 | 1,20 | A           |
|  | Mezcla           | 566,51 | 3 | 1,20 | A           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p&gt;0,05)</b> |                  |        |   |      |             |

La tabla anterior nos muestra la comparación entre medias de un mismo tratamiento para las diferentes biomásas estudiadas, los mayores valores de densidad aparente se obtuvieron para rastrojo de piña, además se puede observar como no hay diferencias significativas en los tratamientos C, D y E para broza de café y la mezcla de rastrojo de piña y broza de café.

Según Tarasov, Shadi, & Leitch (2013) la densidad aparente depende del tamaño de pellet (tanto en longitud y diámetro), la densidad de pastilla única y el contenido de

humedad así como el tamaño de los gránulos afecta a la fuerza de los pellets, como una pastilla grande se puede romper fácilmente, en comparación con una más corta. En su estudio encontraron resultados de la densidad aparente similares a los reportados en esta investigación y también reportan la relación entre contenido de humedad y tamaño de partícula sobre la densidad aparente.

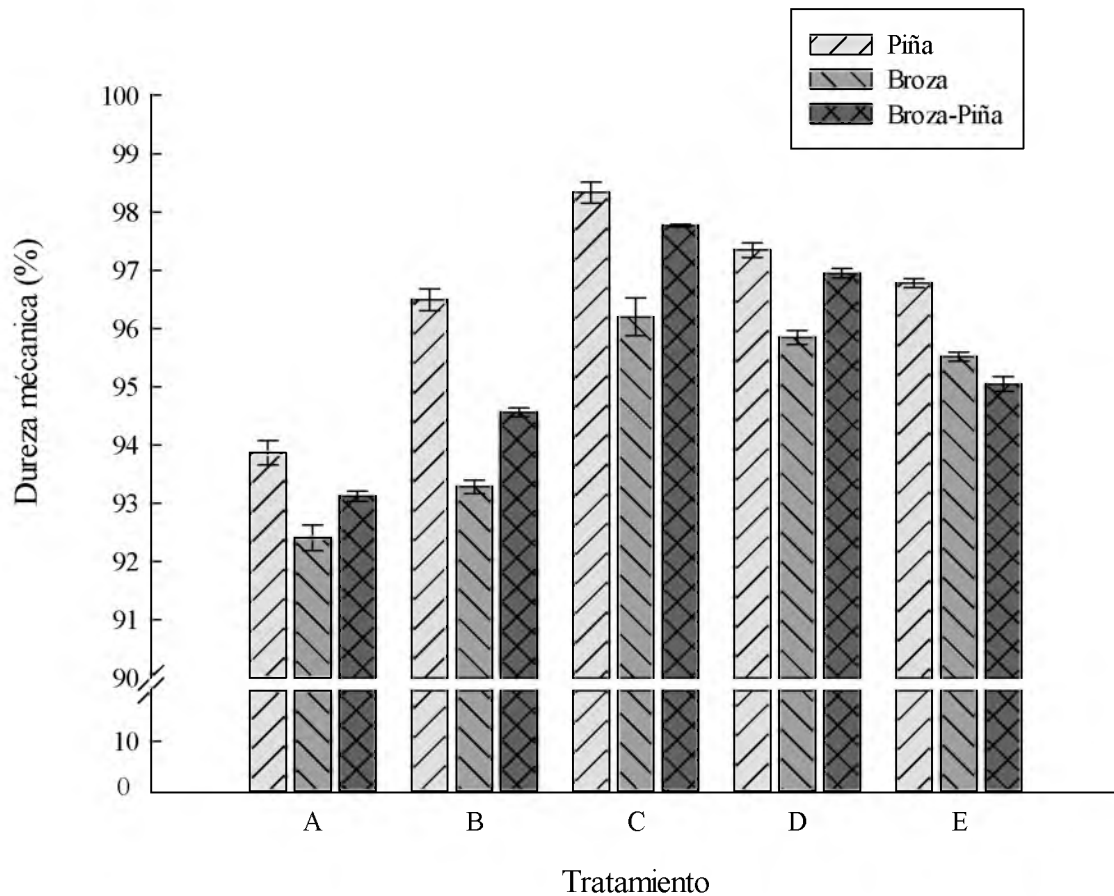
La humedad presente en la biomasa facilita la gelatinización del almidón, desnaturalización de la proteína y fibra, procesos de solubilización durante la extrusión, peletización, o la fabricación de briquetas de biomasa tratados con vapor es superior, como el calor adicional modifica propiedades fisicoquímicas (gelatinización del almidón, la desnaturalización de la proteína) hasta tal punto que la unión entre las partículas aumenta significativamente, lo que resulta en una mejor calidad densificación (Tumuluru et al., 2010).

La información anterior ratifica los resultados obtenidos en el presente estudio, se obtuvo un mejor pelletizado en los tratamientos con mayor contenido de humedad y con los menores tamaños de partícula estudiados.

Con respecto a la densidad aparente la Normativa NF EN 14961-2 de combustibles sólidos para pellets de residuos agroindustriales reporta un valor mayor o igual a  $650 \text{ kg/m}^3$  como se muestra en la Tabla 1, los resultados obtenidos en este proyecto rondan de  $555,30 \text{ kg/m}^3$  a  $578,23 \text{ kg/m}^3$  valores que están por debajo de la normativa. La diferencia encontrada respecto a densidad aparente entre la normativa y la presente investigación se atribuye a diferencias en tamaño de partícula, contenido de humedad y tipo de biomasa utilizada en los tratamientos evaluados lo cual se refleja en la diferencia de valores de densidad aparente.

- 4.2.3 Dureza mecánica

Se muestran los resultados obtenidos en forma gráfica de la dureza mecánica para los pellets de rastrojo de piña, broza de café y la mezcla según los tratamientos evaluados en la presente investigación.



**Figura 25.** Dureza mecánica obtenida para las diferentes biomásas estudiadas y tratamientos evaluados.

Se presenta en la figura anterior los resultados de la dureza mecánica, esta propiedad es muy importante para el transporte y almacenamiento de pellets. En la figura anterior se aprecia como los pellets de rastrojo de piña presentan los mayores porcentajes de dureza mecánica lo cual indica que en términos de transporte y almacenamiento son los que van a conservar de mejor manera su estructura física.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la propiedad dureza mecánica para la biomasa de piña en los diferentes tratamientos aplicados, además se muestra la desviación estándar y la incertidumbre de las mediciones:

**Tabla 19.** Dureza mecánica obtenida para la biomasa de pïña

| Tratamiento | Dureza mecánica |       |                |
|-------------|-----------------|-------|----------------|
|             | DU (%)          | ± (%) | Desv. Est. (%) |
| <b>A</b>    | 93,9            | 0,6   | 0,2            |
| <b>B</b>    | 96,5            | 0,6   | 0,2            |
| <b>C</b>    | 98,3            | 0,4   | 0,2            |
| <b>D</b>    | 97,3            | 0,6   | 0,1            |
| <b>E</b>    | 96,8            | 0,6   | 0,1            |

Con respecto a la dureza mecánica podemos observar en la tabla anterior una relación directa entre contenido de humedad y tamaño de partícula según muestran los valores obtenidos en los diferentes tratamientos. Al aumentar contenido de humedad y disminuir tamaño de partícula la dureza mecánica incrementa siendo el tratamiento C y D los que reportaron los mayores valores 98,3 % y 97,3 % respectivamente.

El análisis de varianza realizado para dureza mecánica en los pellets elaborados con rastrojo de pïña nos reporta un valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ), se puede afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados. La comparación entre medias de los cinco tratamientos estudiados en los pellets de rastrojo de pïña se muestra a continuación:

**Tabla 20.** Comparación de medias de la dureza mecánica en pellets de rastrojo de pïña

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | Comparación |
|-------------|--------|---|------|-------------|
| <b>A</b>    | 93,87  | 3 | 0,09 | A           |
| <b>B</b>    | 96,49  | 3 | 0,09 | B           |
| <b>C</b>    | 98,33  | 3 | 0,09 | D           |
| <b>D</b>    | 97,35  | 3 | 0,09 | C           |
| <b>E</b>    | 96,78  | 3 | 0,09 | B           |

**Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )**

Se encontraron diferencias significativas para cuatro de los cinco tratamientos evaluados, se observa el efecto del contenido de humedad sobre la dureza mecánica en los

tratamientos A, B y C. No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos B (fibra entera de rastrojo de piña) y E (partícula de 9,50 mm) que fueron realizados con igual contenido de humedad pero tamaños de partícula distintos, lo cual nos lleva a la conclusión que no hay diferencia significativa en realizar pellets con fibra entera de rastrojo o tamaño de partícula de 9,50 mm).

La tabla anterior nos permite ratificar como el contenido de humedad y tamaño de partícula influyen en la dureza mecanica, obteniendo diferencias significativas en 4 de los cinco tratamientos evaluados. A continuación los resultados obtenidos para la de broza de café para los diferentes tratamientos aplicados, además se muestra la desviación estándar y la incertidumbre de las mediciones:

**Tabla 21.** Dureza mecánica obtenida para la biomasa de broza de café

| Tratamiento | Dureza mecánica |       |                |
|-------------|-----------------|-------|----------------|
|             | DU (%)          | ± (%) | Desv. Est. (%) |
| A           | 92,4            | 0,2   | 0,2            |
| B           | 93,3            | 0,4   | 0,1            |
| C           | 96,2            | 0,4   | 0,3            |
| D           | 95,8            | 0,2   | 0,1            |
| E           | 95,5            | 0,4   | 0,1            |

La dureza mecánica es una propiedad importante para proyectar el comportamiento de pellets en almacenamiento y transporte, la tabla anterior nos muestra los valores reportados para los diferentes tratamientos, el tratamiento C (45 % bh de contenido de humedad y broza de café entera) fue el que presentó el mayor valor de dureza mecánica con un valor de 96,2 %.

El análisis de varianza realizado para dureza mecánica en los pellets elaborados con broza de café reportó valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ), se puede afirmar que existe interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados, esto se visualiza de mejor manera en la comparación de medias que se muestra a continuación:



**Tabla 22.** Comparación de medias de la dureza mecánica en pellets de broza de café

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | Comparación |
|-------------|--------|---|------|-------------|
| A           | 92,29  | 3 | 0,11 | A           |
| B           | 93,28  | 3 | 0,11 | B           |
| C           | 96,20  | 3 | 0,11 | D           |
| D           | 95,84  | 3 | 0,11 | C           |
| E           | 95,51  | 3 | 0,11 | C           |

**Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p>0,05$ )**

En la tabla anterior podemos resaltar la influencia del contenido de humedad sobre la dureza mecánica aspecto que se observa en los tratamientos A, B y C. Además en base a los valores de las medias para los diferentes tratamientos se muestra la relación entre contenido de humedad y tamaño de partícula sobre el dureza mecánica, tamaños de partícula menores y contenido de humedad más altos reportan los mayores valores de dureza mecánica.

Finalmente se muestran los resultados obtenidos de la dureza mecánica en la mezcla de rastrojo de piña y broza de café para los diferentes tratamientos evaluados:

**Tabla 23.** Dureza mecánica obtenida para la mezcla

| Tratamiento | Dureza mecánica |       |                |
|-------------|-----------------|-------|----------------|
|             | DU (%)          | ± (%) | Desv. Est. (%) |
| A           | 93,1            | 0,2   | 0,1            |
| B           | 94,6            | 0,2   | 0,1            |
| C           | 97,8            | 0,4   | 0,0            |
| D           | 96,9            | 0,4   | 0,1            |
| E           | 95,1            | 0,2   | 0,1            |

La dureza mecánica para la mezcla rastrojo de piña y broza de café presentó como máximo valor el obtenido en el tratamiento C (contenido de humedad 45 %, fibra entera de rastrojo de piña con fibra entera-broza de café entera) con un valor de 97,8 %. Los tratamientos B, D y E muestran como la dureza mecánica es proporcional al tamaño de partícula, a mayor tamaño de partícula se obtiene un menor valor de dureza mecánica como

lo muestra el tratamiento B (contenido de humedad 35 %, tamaño de partícula fibra entera de rastrojo de piña con fibra entera-broza de café entera).

En base al análisis de varianza realizado para dureza mecánica en los pellets elaborados la mezcla rastrojo de piña y broza de café y al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ), se puede afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados.

Se muestra a continuación la comparación de medias de la dureza mecánica para la mezcla mencionada anteriormente, en donde se ratifica la existencia de diferencias significativas entre tratamientos, a continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos de esta comparación:

**Tabla 24.** Comparación de medias de la dureza mecánica en pellets de rastrojo de piña

| <b>Tratamiento</b>  | <b>Medias</b> | <b>n</b> | <b>E.E.</b> | <b>Comparación</b> |
|---|---------------|----------|-------------|--------------------|
| <b>A</b>  | 93,12         | 3        | 0,05        | A                  |
| <b>B</b>  | 94,56         | 3        | 0,05        | B                  |
| <b>C</b>  | 97,76         | 3        | 0,05        | E                  |
| <b>D</b>  | 96,95         | 3        | 0,05        | D                  |
| <b>E</b>  | 95,05         | 3        | 0,05        | C                  |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p &gt; 0,05</math>)</b> |               |          |             |                    |

Para los pellets elaborados con la mezcla de rastrojo de piña y broza de café se obtuvo diferencias significativas en todos los tratamientos evaluados, ratificando el efecto del tamaño de partícula y contenido de humedad sobre la dureza mecánica.

Se presenta un análisis de varianza y una comparación de medias entre tratamientos iguales para las tres biomásas estudiadas, rastrojo de piña, broza de café y la mezcla de las dos biomásas anteriores. Mediante este análisis se puede apreciar la influencia de cada biomasa sobre la dureza mecánica en un tratamiento en común. A continuación se presentan los resultados de la comparación entre medias:

**Tabla 25.** Comparación de medias de la dureza mecánica en pellets de las diferentes biomásas estudiadas

| Tratamiento   | Biomasa          | Medias | n | E.E. | Comparación |
|---|------------------|--------|---|------|-------------|
| <b>A</b>  | Rastrojo de piña | 93,87  | 3 | 0,11 | C           |
|   | Broza de café    | 92,29  | 3 | 0,11 | A           |
|   | Mezcla           | 93,12  | 3 | 0,11 | B           |
| <b>B</b>  | Rastrojo de piña | 96,49  | 3 | 0,08 | C           |
|   | Broza de café    | 93,28  | 3 | 0,08 | A           |
|   | Mezcla           | 94,56  | 3 | 0,08 | B           |
| <b>C</b>  | Rastrojo de piña | 98,33  | 3 | 0,12 | C           |
|   | Broza de café    | 96,20  | 3 | 0,12 | A           |
|   | Mezcla           | 97,76  | 3 | 0,12 | B           |
| <b>D</b>  | Rastrojo de piña | 97,35  | 3 | 0,06 | C           |
|   | Broza de café    | 95,84  | 3 | 0,06 | A           |
|   | Mezcla           | 96,95  | 3 | 0,06 | B           |
| <b>E</b>  | Rastrojo de piña | 96,78  | 3 | 0,06 | C           |
|   | Broza de café    | 95,51  | 3 | 0,06 | B           |
|   | Mezcla           | 95,05  | 3 | 0,06 | A           |
| Medias con una letra común no son significativamente diferentes<br>( $p > 0,05$ ) |                  |        |   |      |             |

La tabla anterior nos muestra la comparación entre medias de las diferentes biomásas estudiadas para un mismo tratamiento, se puede observar como en todos los tratamientos encontramos diferencias significativas, lo cual nos lleva a la conclusión de que el tipo de biomasa influye de forma directa sobre el valor de dureza mecánica obteniéndose los mayores valores en pellets de rastrojo de piña.

El índice de la durabilidad o dureza mecánica es un parámetro de calidad define como la capacidad de los materiales densificadas permanecer intacta cuando se maneja

durante el almacenamiento y el transporte. Por lo tanto, la durabilidad de pellets depende de la fuerza física y la resistencia a la trituración (Tumuluru et al., 2010).

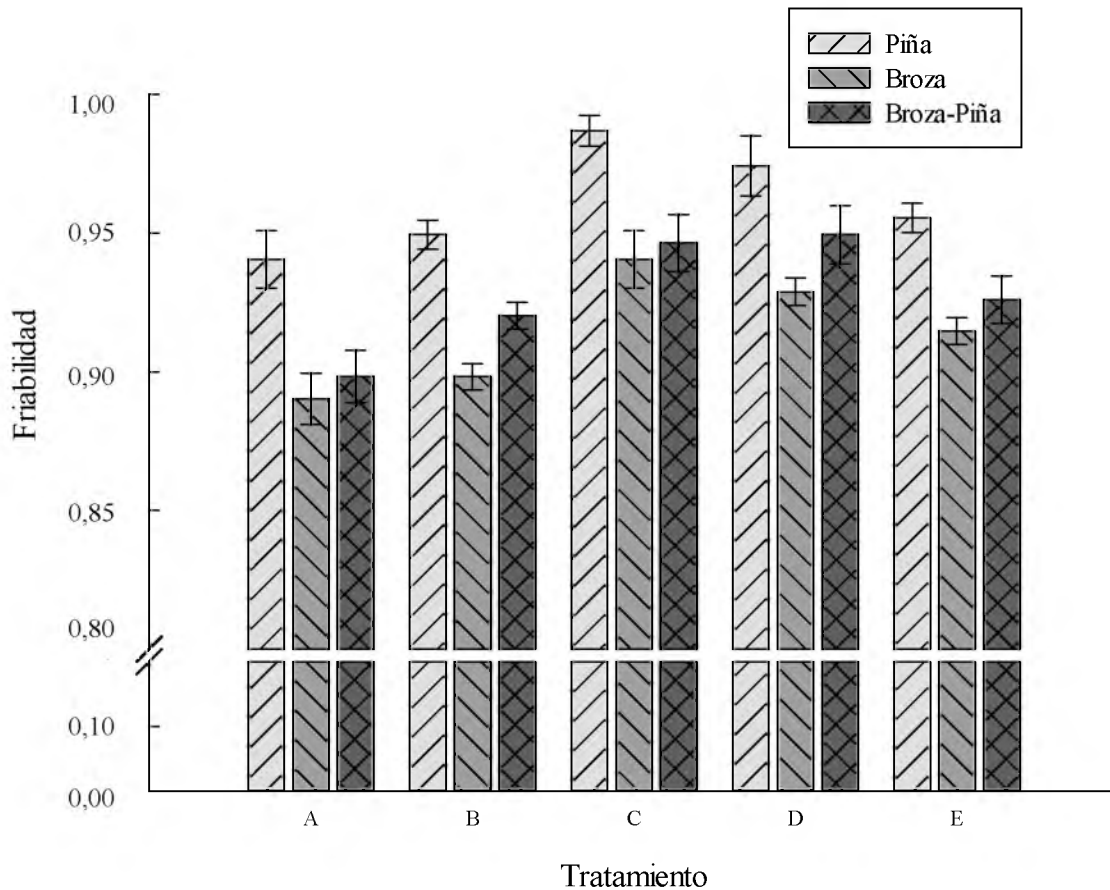
Según Tumuluru et al. (2010) en general, la densidad y la durabilidad de los gránulos es inversamente proporcional al tamaño de partícula más pequeño desde partículas tienen una mayor área de superficie durante la densificación. Estudios sobre la alfalfa, llegaron a la conclusión de que los materiales medianas o finos son deseables en la granulación, ya que, en estos tamaños que tienen una mayor área de superficie para la adición de humedad durante el acondicionamiento de vapor, lo que resulta en un aumento de la gelatinización del almidón y mejor unión. La información anterior la ratifica las pruebas realizadas a las diferentes biomásas estudiadas en la presente investigación en donde se obtuvo el mayor valor de dureza mecánica en el tratamiento C el cual contenía el mayor porcentaje de humedad, así como en el tratamiento E el cual evaluó el menor tamaño de partícula en los tratamientos.

En cuanto a la influencia del contenido de humedad sobre la durabilidad Mani, Tabil, & Sokhansanj (2003) observaron que la humedad en la biomasa durante el proceso de densificación actúa como un aglutinante y aumenta la unión a través de fuerzas de van der Waals, aumentando de este modo el área de contacto de la partícula. En base a la información anterior se ratifica la acción del contenido de humedad sobre la dureza mecánica, a mayor contenido de humedad mayor unión a través de las fuerzas de Van der Waals y mayor acción de aglutinante por parte de la humedad, lo cual se refleja en la dureza mecánica.

Con respecto a la dureza mecánica la Normativa NF EN 14961-2 de combustibles sólidos habla de resistencia mecánica y exige valores por encima de 92 % como lo muestra la Tabla 1, los resultados obtenidos en nuestra investigación se pueden observar en la tabla anterior en donde podemos observar que todas las biomásas y todos los tratamientos evaluados están por encima del 92 % que exige la norma.

- 4.2.4 Friabilidad

A continuación se muestran los resultados obtenidos en forma gráfica de friabilidad para los pellets de rastrojo de pinya, broza de café y la mezcla según los tratamientos evaluados en la presente investigación.



**Figura 26.** Friabilidad obtenida en los diferentes tratamientos evaluados para las diferentes biomazas.

La friabilidad es otra propiedad de suma importancia para conocer el comportamiento de los pellets y con esto planificar el almacenamiento y transporte de los mismos. La friabilidad muestra la resistencia al golpeteo de los pellets, en la figura anterior se nos muestra como los pellets de rastrojo de pinya para los diferentes tratamientos

presentan los mayores valores de friabilidad, aspecto que se puede atribuir a la fibra y lignina presente en el rastrojo de piña que permite una mejor cohesión entre partículas.

Se presentan los resultados obtenidos en forma tabulada de los pellets elaborados con rastrojo de piña para la propiedad de friabilidad, además se muestra la desviación estándar y la incertidumbre asociada de los resultados obtenidos:

**Tabla 26.** Friabilidad obtenida para la biomasa de piña

| Tratamiento | Friabilidad |      |            |
|-------------|-------------|------|------------|
|             | Friabilidad | ±    | Desv. Est. |
| <b>A</b>    | 0,94        | 0,21 | 0,01       |
| <b>B</b>    | 0,95        | 0,24 | 0,01       |
| <b>C</b>    | 0,99        | 0,27 | 0,01       |
| <b>D</b>    | 0,97        | 0,41 | 0,01       |
| <b>E</b>    | 0,96        | 0,24 | 0,01       |

Los valores de friabilidad se reportan con valores que van desde 0 a 1, siendo 1 el pellets con la friabilidad ideal, la friabilidad al igual que la dureza mecánica es importante para el transporte y almacenamiento de pellets, además la friabilidad es un parámetro que nos muestra la resistencia al golpeteo. Se obtuvieron valores de 0,94 a 0,99 siendo el tratamiento C el que presentó este valor de 0,99 que se acerca al ideal, además en la tabla anterior se puede apreciar en los resultados como la friabilidad es proporcional al contenido de humedad y tamaño de partícula.

El análisis de varianza realizado para friabilidad en los pellets elaborados con rastrojo de piña, nos reporta en base al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ) que se puede afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados.

La comparación entre medias de los cinco tratamientos estudiados en los pellets de rastrojo de piña se muestra a continuación:

**Tabla 27.** Comparación de medias de la friabilidad en pellets de rastrojo de piña

| Tratamiento   | Medias | n | E.E.                  | Comparación |
|---|--------|---|-----------------------|-------------|
| A   | 0,94   | 3 | $4,9 \times 10^{-03}$ | A           |
| B   | 0,95   | 3 | $4,9 \times 10^{-03}$ | A           |
| C   | 0,99   | 3 | $4,9 \times 10^{-03}$ | B           |
| D   | 0,97   | 3 | $4,9 \times 10^{-03}$ | B           |
| E   | 0,95   | 3 | $4,9 \times 10^{-03}$ | A           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p &gt; 0,05</math>)</b> |        |   |                       |             |

En base a los resultados que muestra la tabla anterior se puede apreciar la diferencia significativa entre los tratamientos D y E que son tratamientos con diferente tamaño de partícula pero igual contenido de humedad. Si se observa las medias reportadas también se puede apreciar un pequeño efecto del contenido de humedad sobre los valores de friabilidad, a mayor contenido de humedad mayor humedad obtenida.

Los resultados de los pellets elaborados con broza de café se muestran a continuación de forma tabulada en donde también se muestra la desviación estándar y la incertidumbre asociada:

**Tabla 28.** Friabilidad obtenida para la biomasa de broza de café

| Tratamiento | Friabilidad |      |            |
|-------------|-------------|------|------------|
|             | Friabilidad | ±    | Desv. Est. |
| A           | 0,89        | 0,42 | 0,01       |
| B           | 0,90        | 0,23 | 0,00       |
| C           | 0,94        | 0,25 | 0,01       |
| D           | 0,93        | 0,23 | 0,00       |
| E           | 0,91        | 0,47 | 0,00       |

Para los pellets elaborados con broza de café se obtuvieron valores inferiores a los reportados para rastrojo de piña, obteniendo el tratamiento C el mayor valor de friabilidad con 0,94. De la tabla anterior también se puede apreciar como al aumentar el contenido de

humedad aumenta la friabilidad y como al disminuir el tamaño de partícula también se aumenta la friabilidad en los pellets de rastrojo de piña.

El análisis de varianza realizado para friabilidad en los pellets elaborados con broza de café en base al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ), nos permite afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados.

Se muestra a continuación la comparación de medias de la friabilidad para los pellets de broza de café, en donde se ratifica la existencia de diferencias significativas entre tratamientos, a continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos de esta comparación:

**Tabla 29.** Comparación de medias de la friabilidad en pellets de broza de café

| Tratamiento   | Medias | n | E.E.                  | Comparación |
|---|--------|---|-----------------------|-------------|
| A   | 0,89   | 3 | $4,7 \times 10^{-03}$ | A           |
| B   | 0,90   | 3 | $4,7 \times 10^{-03}$ | A           |
| C   | 0,94   | 3 | $4,7 \times 10^{-03}$ | C           |
| D   | 0,93   | 3 | $4,7 \times 10^{-03}$ | B C         |
| E   | 0,92   | 3 | $4,7 \times 10^{-03}$ | B           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p &gt; 0,05</math>)</b> |        |   |                       |             |

Los valores obtenidos para la propiedad de friabilidad en pellets elaborados con broza de café muestran diferencias significativas que ratifican la hipótesis de la influencia del contenido de humedad y tamaño de partícula sobre la friabilidad.

Finalmente se muestran los resultados obtenidos para la propiedad friabilidad para la mezcla de rastrojo de piña y broza de café, se muestra además desviación estándar e incertidumbre asociada:



**Tabla 30.** Friabilidad obtenida para la mezcla rastrojo de piña y broza de café

| Tratamiento | Friabilidad |      |            |
|-------------|-------------|------|------------|
|             | Friabilidad | ±    | Desv. Est. |
| <b>A</b>    | 0,90        | 0,29 | 0,01       |
| <b>B</b>    | 0,92        | 0,42 | 0,00       |
| <b>C</b>    | 0,94        | 0,45 | 0,01       |
| <b>D</b>    | 0,95        | 0,22 | 0,01       |
| <b>E</b>    | 0,93        | 0,42 | 0,01       |

El procedimiento de realizar la mezcla de rastrojo de piña y broza de café permitió incrementar el valor de friabilidad obtenido en la mezcla en comparación con los pellets realizados de broza de café. Al igual que en las biomásas anteriores se determinó la relación directa entre contenido de humedad y tamaño de partícula sobre la friabilidad de los pellets.

El análisis de varianza realizado para friabilidad en los pellets elaborados con broza de café y rastrojo de piña en base al valor de  $p$  obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ) permite afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados.

La comparación entre medias de los cinco tratamientos estudiados en los pellets de mezcla entre rastrojo de piña y broza de café se muestra a continuación, se puede observar como solo se presentaron diferencias significativas entre el tratamiento A con respecto a los otros tratamientos, sin embargo si observamos los valores en las medias podemos observar cómo tanto contenido de humedad y tamaño de partícula influyen levemente sobre la friabilidad:

**Tabla 31.** Comparación de medias de la friabilidad en pellets de mezcla rastrojo de piña y broza de café

| <b>Tratamiento</b>  | <b>Medias</b> | <b>n</b> | <b>E.E.</b> | <b>Comparación</b> |
|---|---------------|----------|-------------|--------------------|
| <b>A</b>  | 0,90          | 3        | 0,01        | A                  |
| <b>B</b>  | 0,92          | 3        | 0,01        | B                  |
| <b>C</b>  | 0,94          | 3        | 0,01        | B                  |
| <b>D</b>  | 0,95          | 3        | 0,01        | B                  |
| <b>E</b>  | 0,93          | 3        | 0,01        | B                  |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p&gt;0,05</math>)</b> |               |          |             |                    |

A continuación se muestra un análisis de varianza y una comparación de medias entre tratamientos iguales para las tres biomásas estudiadas, rastrojo de piña, broza de café y la mezcla de las dos anteriores. Este análisis permite apreciar la influencia de cada biomasa sobre la friabilidad en un tratamiento en común.

A continuación se presentan los resultados de la comparación entre medias donde se puede observar como para los diferentes tratamientos la mejor friabilidad se obtuvo para los pellets elaborados con rastrojo de piña, es importante recalcar como el uso de mezclas permite mejorar las propiedades físicas de los pellets, en este caso la friabilidad obtenida de la mezcla es superior a la de los pellets de broza de café.

También se obtuvo diferencias significativas entre la piña con respecto a la broza de café y la mezcla para todos los tratamientos, lo cual nos muestra la relación directa entre la friabilidad y la biomasa utilizada en los pellets:

**Tabla 32.** Comparación de medias de la friabilidad en pellets de las diferentes biomásas estudiadas

| Tratamiento   | Biomasa          | Medias | n | E.E.                  | Comparación |
|---|------------------|--------|---|-----------------------|-------------|
| A   | Rastrojo de pïña | 0,94   | 3 | 0,01                  | B           |
|   | Broza de caf e   | 0,89   | 3 | 0,01                  | A           |
|   | Mezcla           | 0,90   | 3 | 0,01                  | A           |
| B   | Rastrojo de pïña | 0,95   | 3 | $3,3 \times 10^{-03}$ | C           |
|   | Broza de caf e   | 0,90   | 3 | $3,3 \times 10^{-03}$ | A           |
|   | Mezcla           | 0,92   | 3 | $3,3 \times 10^{-03}$ | B           |
| C   | Rastrojo de pïña | 0,99   | 3 | 0,01                  | B           |
|   | Broza de caf e   | 0,94   | 3 | 0,01                  | A           |
|   | Mezcla           | 0,94   | 3 | 0,01                  | A           |
| D   | Rastrojo de pïña | 0,97   | 3 | 0,01                  | B           |
|   | Broza de caf e   | 0,93   | 3 | 0,01                  | A           |
|   | Mezcla           | 0,95   | 3 | 0,01                  | A           |
| E   | Rastrojo de pïña | 0,95   | 3 | $3,3 \times 10^{-03}$ | B           |
|   | Broza de caf e   | 0,92   | 3 | $3,3 \times 10^{-03}$ | A           |
|   | Mezcla           | 0,93   | 3 | $3,3 \times 10^{-03}$ | A           |
| <b>Medias con una letra com n no son significativamente diferentes<br/>(<math>p &gt; 0,05</math>)</b> |                  |        |   |                       |             |

Se acepta como "buena" una resistencia al golpeteo (friabilidad) con un valor de 0,93 o superior. Esto indica que al arrojar 100 pellet al suelo cer mico se obtienen s lo 7 pellets rotos en 2 partes (Soto & Nu ez, 2008). En base a la informaci n anterior podemos observar como la mayor a de las biomásas estudiadas y tratamientos aplicados cumplen con valores por encima de 0,93 siendo los pellets de broza de caf e para los contenidos de humedad menores los que no cumplen esta condici n.

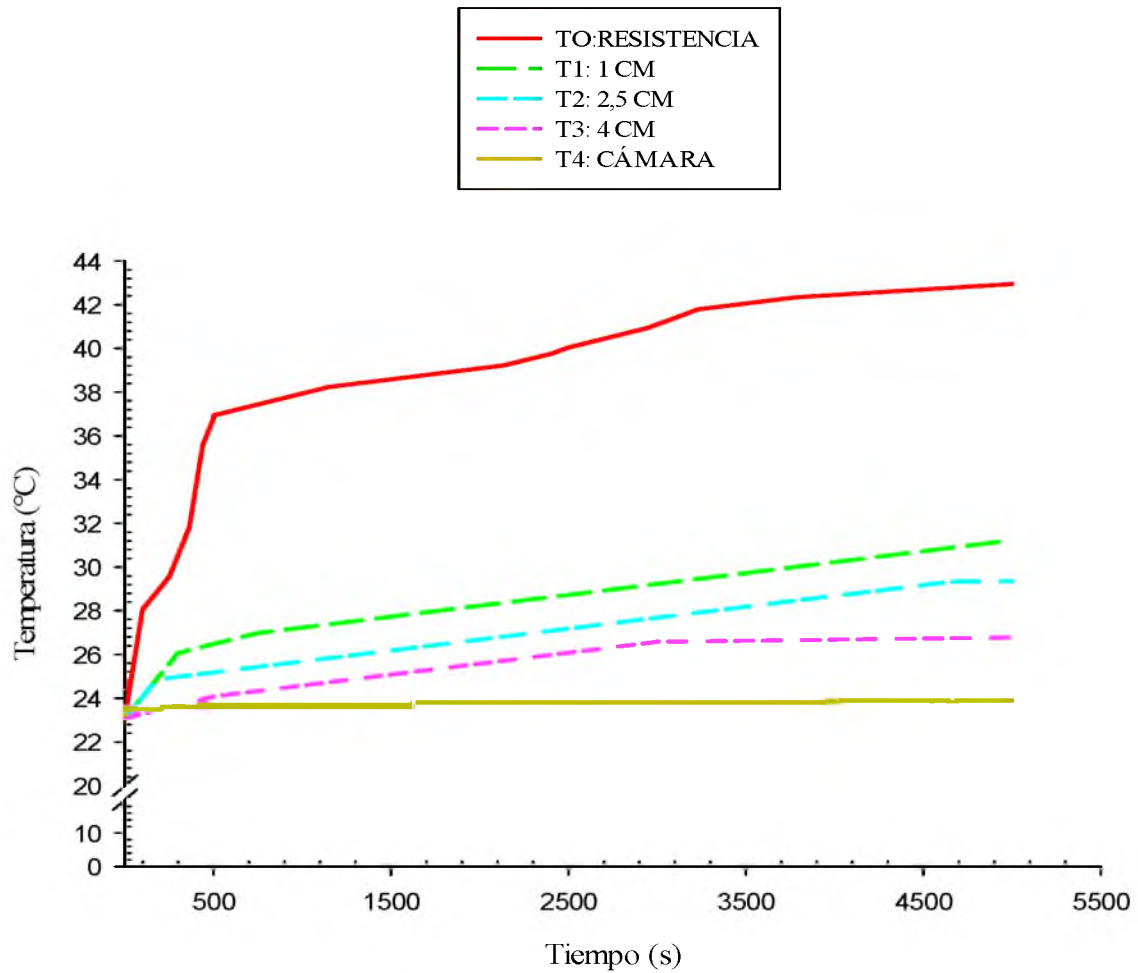
La mezcla de broza de café y rastrojo de piña dio resultados satisfactorios en cuanto a la friabilidad, la propiedad de adhesión natural que presenta el rastrojo de piña se reflejó en los resultados de friabilidad de la mezcla obteniéndose valores por encima de 0,93. Se observó también como tamaño de partícula y contenido de humedad se reflejan en los valores de friabilidad obtenidos, reportando los mejores resultados para tamaños de partícula menores y los mayores contenidos de humedad estudiados.

La friabilidad en los pellets no es evaluada en la Normativa NF EN 14961-2 de combustibles sólidos, sin embargo esta evalúa un parámetro como resistencia o dureza mecánica que también influye en conocer el comportamiento y estado del pellet en procesos como almacenamiento y transporte. Los valores de dureza mecánica sobrepasaron para todos los tratamientos y biomásas estudiados lo exigido por la normativa.

### **4.3 Propiedades térmicas**

Se evaluaron tres propiedades térmicas en base a las normativas internacionales para pellets elaborados con residuos agroindustriales, se muestra de manera gráfica en primera instancia los resultados obtenidos, posteriormente de forma tabulada en donde se adjunta incertidumbre y desviación estándar de los resultados. Posteriormente se presenta el análisis de varianza y la comparación entre medias que permiten apreciar de una mejor manera la existencia o no de diferencias significativas entre los tratamientos estudiados.

A continuación se muestra el perfil de temperaturas obtenido para el equipo utilizado para determinar las propiedades térmicas, el análisis de las propiedades térmicas al igual que las físicas se realizó por triplicado para cada tratamiento y se reporta el promedio de las mediciones.



**Figura 27.** Perfil de temperatura para determinación de propiedades térmicas con equipo experimental.

A continuación se muestra en la siguiente tabla la conductividad térmica, la difusividad térmica y calor específico calculada para los diferentes tratamientos evaluados en pellets elaborados con rastrojo de piña, se muestra la desviación estándar y la incertidumbre de las mediciones, es importante aclarar que la conductividad térmica determinada por estos procedimientos corresponde a la conductividad térmica efectiva que se conoce como  $K$ , en esta se consideran parámetros como densidad, porosidad, contenido de humedad, además para la difusividad térmica y calor específico se tiene la misma metodología y consideraciones.

**Tabla 33.** Propiedades térmicas para pellets elaborados con rastrojo de piña, conductividad térmica (k), difusividad térmica ( $\alpha$ ) y calor específico (Cp)

| Tratamiento | Propiedades térmicas |              |                       |  |                          |                                   |                             |                |                         |
|-------------|----------------------|--------------|-----------------------|--|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------|-------------------------|
|             | K<br>(W/m·K)         | ±<br>(W/m·K) | Desv. Est.<br>(W/m·K) | $\alpha(10^{-7})$<br>(m <sup>2</sup> /s) | ±<br>(m <sup>2</sup> /s) | Desv. Est.<br>(m <sup>2</sup> /s) | C <sub>p</sub><br>(kJ/kg·K) | ±<br>(kJ/kg·K) | Desv. Est.<br>(kJ/kg·K) |
| <b>A</b>    | 0,247                | 0,006        | 0,002                 | 1,648                                    | 0,52                     | 0,04                              | 2,665                       | 0,058          | 0,042                   |
| <b>B</b>    | 0,275                | 0,005        | 0,003                 | 2,209                                    | 0,46                     | 0,06                              | 2,177                       | 0,062          | 0,037                   |
| <b>C</b>    | 0,338                | 0,005        | 0,006                 | 3,483                                    | 0,50                     | 0,12                              | 1,680                       | 0,062          | 0,021                   |
| <b>D</b>    | 0,305                | 0,006        | 0,006                 | 2,818                                    | 0,52                     | 0,13                              | 1,884                       | 0,060          | 0,042                   |
| <b>E</b>    | 0,284                | 0,005        | 0,002                 | 2,394                                    | 0,48                     | 0,03                              | 2,070                       | 0,058          | 0,018                   |

De la tabla anterior podemos observar como se refleja la variación de contenido de humedad y tamaño de partícula en el valor obtenido de conductividad térmica en los diferentes tratamientos. La difusividad al ser una propiedad que depende de la conductividad térmica como se mostró en la metodología presenta la misma tendencia, con una relación directa con el contenido de humedad y tamaño de partícula. Por su parte el calor específico es inversamente proporcional al contenido de humedad, a mayor contenido de humedad menor valor de calor específico fue obtenido.

El análisis de varianza realizado para conductividad térmica en los pellets elaborados con rastrojo de piña informa en base al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ), se puede afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados, no se realiza análisis de varianza y comparación de medias a difusividad térmica y calor específico debido a que son parámetros que dependen de la conductividad térmica y presentan el mismo comportamiento o tendencia observadas en la conductividad térmica.

**Tabla 34.** Comparación de medias de conductividad térmica en pellets de rastrojo de pña

| Tratamiento | Medias | n | E.E.                  | Comparación |
|-------------|--------|---|-----------------------|-------------|
| <b>A</b>    | 0,25   | 3 | $2,4 \times 10^{-03}$ | A           |
| <b>B</b>    | 0,27   | 3 | $2,4 \times 10^{-03}$ | B           |
| <b>C</b>    | 0,34   | 3 | $2,4 \times 10^{-03}$ | E           |
| <b>D</b>    | 0,31   | 3 | $2,4 \times 10^{-03}$ | D           |
| <b>E</b>    | 0,28   | 3 | $2,4 \times 10^{-03}$ | C           |

**Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )**

La tabla anterior nos muestra las medias y la comparación obtenida para los diferentes tratamientos aplicados a los pellets de rastrojo de pña, en donde podemos observar que se presentaron diferencias significativas para todos los tratamientos, lo cual nos lleva al conclusión de que tanto contenido de humedad como tamaño de partícula influyen de manera directa sobre el valor de conductividad térmica.

A continuación los resultados obtenidos en propiedades térmicas para la de broza de café en los diferentes tratamientos aplicados, además se muestra la desviación estándar y la incertidumbre de las mediciones:

**Tabla 35.** Propiedades térmicas para pellets elaborados con broza de café, conductividad térmica (k), difusividad térmica ( $\alpha$ ) y calor específico ( $C_p$ )

| Tratamiento | Propiedades térmicas |              |                       |  |                          |                                   |                    |                |                         |
|-------------|----------------------|--------------|-----------------------|--|--------------------------|-----------------------------------|--------------------|----------------|-------------------------|
|             | K<br>(W/m·K)         | ±<br>(W/m·K) | Desv. Est.<br>(W/m·K) | $\alpha(10^{-7})$<br>(m <sup>2</sup> /s) | ±<br>(m <sup>2</sup> /s) | Desv. Est.<br>(m <sup>2</sup> /s) | $C_p$<br>(kJ/kg·K) | ±<br>(kJ/kg·K) | Desv. Est.<br>(kJ/kg·K) |
| <b>A</b>    | 0,214                | 0,005        | 0,001                 | 0,989                                    | 0,54                     | 0,02                              | 3,904              | 0,060          | 0,063                   |
| <b>B</b>    | 0,232                | 0,004        | 0,004                 | 1,350                                    | 0,56                     | 0,09                              | 3,073              | 0,062          | 0,129                   |
| <b>C</b>    | 0,278                | 0,004        | 0,003                 | 2,279                                    | 0,56                     | 0,07                              | 2,144              | 0,060          | 0,039                   |
| <b>D</b>    | 0,253                | 0,005        | 0,001                 | 1,761                                    | 0,52                     | 0,03                              | 2,527              | 0,060          | 0,022                   |
| <b>E</b>    | 0,245                | 0,004        | 0,002                 | 1,607                                    | 0,54                     | 0,035                             | 2,698              | 0,062          | 0,025                   |

Se muestran los resultados obtenidos de conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico para los pellets elaborados con broza de café. Se puede apreciar cómo se presenta una relación directa entre contenido de humedad y tamaño de partícula sobre la difusividad térmica y conductividad térmica. También es importante mencionar como se obtuvo el mayor valor de calor específico para el tratamiento A ( broza de café entera, contenido de humedad 25 %) lo cual nos permite al comparar con los tratamientos B y C observar como a menor contenido de humedad se obtiene un mayor calor específico.

El análisis de varianza realizado para conductividad térmica en los pellets elaborados con broza de café en base al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ) permite afirmar que existe interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados, esto se visualiza de mejor manera en la comparación de medias que se muestra a continuación:

**Tabla 36.** Comparación de medias de la conductividad térmica en pellets de broza de café

| Tratamiento   | Medias | n | E.E.                  | Comparación |
|---|--------|---|-----------------------|-------------|
| A   | 0,21   | 3 | $1,5 \times 10^{-03}$ | A           |
| B   | 0,23   | 3 | $1,5 \times 10^{-03}$ | B           |
| C   | 0,28   | 3 | $1,5 \times 10^{-03}$ | E           |
| D   | 0,25   | 3 | $1,5 \times 10^{-03}$ | D           |
| E   | 0,25   | 3 | $1,5 \times 10^{-03}$ | C           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p &gt; 0,05</math>)</b> |        |   |                       |             |

De igual manera que en pellets elaborados con rastrojo de piña se observa en la tabla anterior como existen diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, resaltando el efecto del contenido de humedad y tamaño de partícula sobre la conductividad térmica, a mayor contenido de humedad y menor tamaño de partícula es mayor la conductividad térmica.

Finalmente se muestran los resultados obtenidos de la conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico en la mezcla de rastrojo de piña y broza de café para los diferentes tratamientos evaluados:



**Tabla 37.** Propiedades térmicas para pellets elaborados con broza de café y rastrojo de piña, conductividad térmica ( $k$ ), difusividad térmica ( $\alpha$ ) y calor específico ( $C_p$ )

| Tratamiento | Propiedades térmicas |              |                       |  |                          |                                   |                    |                |                         |
|-------------|----------------------|--------------|-----------------------|--|--------------------------|-----------------------------------|--------------------|----------------|-------------------------|
|             | K<br>(W/m·K)         | ±<br>(W/m·K) | Desv. Est.<br>(W/m·K) | $\alpha(10^{-7})$<br>(m <sup>2</sup> /s) | ±<br>(m <sup>2</sup> /s) | Desv. Est.<br>(m <sup>2</sup> /s) | $C_p$<br>(kJ/kg·K) | ±<br>(kJ/kg·K) | Desv. Est.<br>(kJ/kg·K) |
| <b>A</b>    | 0,222                | 0,006        | 0,001                 | 1,151                                    | 0,48                     | 0,02                              | 3,456              | 0,060          | 0,046                   |
| <b>B</b>    | 0,245                | 0,006        | 0,001                 | 1,614                                    | 0,50                     | 0,01                              | 2,695              | 0,058          | 0,013                   |
| <b>C</b>    | 0,287                | 0,004        | 0,002                 | 2,450                                    | 0,50                     | 0,04                              | 2,045              | 0,058          | 0,025                   |
| <b>D</b>    | 0,268                | 0,006        | 0,001                 | 2,075                                    | 0,50                     | 0,02                              | 2,267              | 0,060          | 0,020                   |
| <b>E</b>    | 0,254                | 0,004        | 0,001                 | 1,783                                    | 0,48                     | 0,03                              | 2,514              | 0,058          | 0,027                   |

Para el caso de pellets elaborados con la mezcla de rastrojo de piña y broza de café se obtuvo para conductividad térmica y difusividad térmica el máximo valor en el tratamiento C con un valor de 0,287 W/m·K y  $2,450 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s. Para el calor específico se obtuvieron mayores valores conforme se disminuyó el contenido de humedad siendo el tratamiento A el de mayor valor con 3,456 kJ/kg·K.

El análisis de varianza realizado para conductividad térmica en los pellets elaborados de la mezcla rastrojo de piña y broza de café, nos permite en base al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ) afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados.

Se muestra a continuación la comparación de medias de la conductividad térmica para la mezcla mencionada anteriormente, en donde se ratifica la existencia de diferencias significativas entre tratamientos, a continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos de esta comparación:

**Tabla 38.** Comparación de medias de la conductividad térmica en pellets de la mezcla de rastrojo de piña y broza de café

| <b>Tratamiento</b>  | <b>Medias</b> | <b>n</b> | <b>E.E.</b>           | <b>Comparación</b> |
|---|---------------|----------|-----------------------|--------------------|
| <b>A</b>  | 0,22          | 3        | $8,7 \times 10^{-04}$ | A                  |
| <b>B</b>  | 0,25          | 3        | $8,7 \times 10^{-04}$ | B                  |
| <b>C</b>  | 0,29          | 3        | $8,7 \times 10^{-04}$ | E                  |
| <b>D</b>  | 0,27          | 3        | $8,7 \times 10^{-04}$ | D                  |
| <b>E</b>  | 0,25          | 3        | $8,7 \times 10^{-04}$ | C                  |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p &gt; 0,05</math>)</b> |               |          |                       |                    |

La tabla anterior nos muestra la comparación de media para la mezcla de rastrojo de piña y broza de café, se ha encontrado diferencias significativas en todos los tratamientos evaluados, además se corrobora la influencia del tamaño de partícula y contenido de humedad sobre la conductividad térmica.

Se presenta un análisis de varianza y una comparación de medias entre tratamientos iguales para las tres biomásas estudiadas, rastrojo de piña, broza de café y la mezcla de las dos anteriores. Mediante este análisis se puede apreciar la influencia de cada biomasa sobre la conductividad térmica en un tratamiento en común.

A continuación se presentan los resultados de la comparación entre medias de la conductividad térmica en pellets de las diferentes biomásas estudiadas:

**Tabla 39.** Comparación de medias de la conductividad térmica en pellets de las diferentes biomásas estudiadas

| Tratamiento  | Biomasa          | Medias | n | E.E.                  | Comparación |
|--|------------------|--------|---|-----------------------|-------------|
| <b>A</b>   | Rastrojo de piña | 0,25   | 3 | $9,2 \times 10^{-04}$ | C           |
|  | Broza de café    | 0,21   | 3 | $9,2 \times 10^{-04}$ | A           |
|  | Mezcla           | 0,22   | 3 | $9,2 \times 10^{-04}$ | B           |
| <b>B</b>   | Rastrojo de piña | 0,27   | 3 | $1,7 \times 10^{-03}$ | C           |
|  | Broza de café    | 0,23   | 3 | $1,7 \times 10^{-03}$ | A           |
|  | Mezcla           | 0,27   | 3 | $1,7 \times 10^{-03}$ | B           |
| <b>C</b>   | Rastrojo de piña | 0,34   | 3 | $2,4 \times 10^{-03}$ | B           |
|  | Broza de café    | 0,28   | 3 | $2,4 \times 10^{-03}$ | A           |
|  | Mezcla           | 0,29   | 3 | $2,4 \times 10^{-03}$ | A           |
| <b>D</b>   | Rastrojo de piña | 0,31   | 3 | $2,1 \times 10^{-03}$ | C           |
|  | Broza de café    | 0,25   | 3 | $2,1 \times 10^{-03}$ | A           |
|  | Mezcla           | 0,27   | 3 | $2,1 \times 10^{-03}$ | B           |
| <b>E</b>   | Rastrojo de piña | 0,28   | 3 | $1,0 \times 10^{-03}$ | C           |
|  | Broza de café    | 0,25   | 3 | $1,0 \times 10^{-03}$ | A           |
|  | Mezcla           | 0,25   | 3 | $1,0 \times 10^{-03}$ | B           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p&gt;0,05)</b> |                  |        |   |                       |             |

La tabla anterior nos muestra las diferencias significativas encontradas de la comparación entre los pellets elaborados con diferentes biomásas para un mismo tratamiento, es importante mencionar como la mayor conductividad térmica se obtuvo para rastrojo de piña y como al realizar la mezcla de biomásas se mejoro la conductividad térmica en comparación a los pellets elaborados de broza de café.

Según los estudios realizados por Bitra et al. (2010) la conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico pueden relacionarse directamente con el contenido de

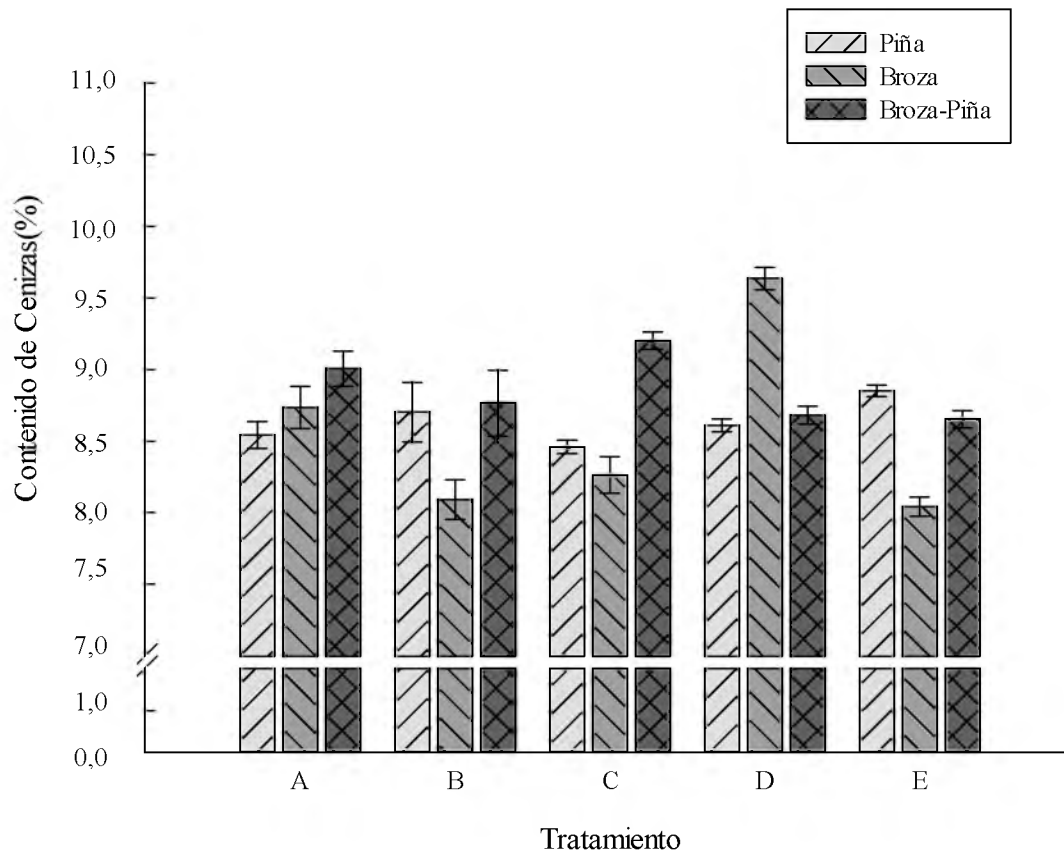
humedad de pelletizado, ellos encontraron como el calor específico y conductividad térmica aumentaron con el aumento del contenido de humedad, aspecto que se obtuvo para los pellets de rastrojo de piña, broza de café y mezcla para los diferentes tratamientos evaluados. Con respecto a calor específico normalmente la conducta típica de sólidos y materiales a granulados, es que el calor específico disminuya con el aumento de la difusividad térmica de estos, lo que corresponde al comportamiento aquí determinado (Sjostrom & Blomqvist, 2014).

Por su parte Sadeghi (2012) reportan que la disminución del contenido de humedad de 18,2 a 11,8 % (bh) producen la reducción no lineal de la conductividad térmica. Los valores promedio de conductividad térmica variaron desde 0,1509 a 0,2143  $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$  en diferentes contenidos de humedad. Guo et al. (2012) obtuvieron en su estudio el estimado de conductividad térmica que varió de 0,146 a 0,192  $W / (m \cdot K)$  con el aumento de contenido de humedad, además el calor específico estimado varió de 1,074 a 1,253  $kJ / (kg \cdot K)$  en el intervalo ensayado, obteniendo los mayores valores para contenidos de humedad menores.

#### **4.4 Propiedades fisicoquímicas**

- 4.4.1 Contenido de cenizas

A continuación se muestran los resultados obtenidos en forma gráfica del contenido de cenizas para los pellets de rastrojo de piña, broza de café y la mezcla según los tratamientos evaluados en la presente investigación.



**Figura 29.** Contenido de cenizas obtenida para las diferentes biomásas estudiadas y tratamientos evaluados.

La figura anterior nos muestra los resultados obtenidos para contenido de cenizas en las diferentes biomásas y tratamientos estudiados en los pellets, se puede apreciar como no se presentó alguna tendencia de resultados en base a los diferentes tratamientos aplicados, tampoco se observa efecto alguno de la biomasa en el contenido de cenizas.

Se presentan los resultados obtenidos en forma tabulada de los pellets elaborados con rastrojo de piña, además se muestra la desviación estándar y la incertidumbre asociada de los resultados obtenidos:

**Tabla 40. Contenido de cenizas obtenidas para la biomasa de piña**

| Tratamiento | Contenido de cenizas |       |               |
|-------------|----------------------|-------|---------------|
|             | % Masa b.s.          | ± (%) | Des. Est. (%) |
| A           | 8,54                 | 0,02  | 0,09          |
| B           | 8,70                 | 0,02  | 0,21          |
| C           | 8,46                 | 0,02  | 0,05          |
| D           | 9,84                 | 0,02  | 0,05          |
| E           | 8,85                 | 0,02  | 0,05          |

La tabla anterior nos muestra los resultados de contenido de cenizas obtenidas en los pellets elaborados con rastrojo de piña, no se observa el efecto alguno de los tratamientos en los resultados, se obtuvieron valores uniformes para todos los tratamientos estudiados.

El análisis de varianza realizado para contenido de cenizas en los pellets elaborados con rastrojo de piña da el valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ), se puede afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados.

La comparación entre medias de los cinco tratamientos estudiados en los pellets de rastrojo de piña se muestra a continuación:

**Tabla 41. Comparación de medias del contenido de cenizas en pellets de rastrojo de piña**

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | Comparación |
|-------------|--------|---|------|-------------|
| A           | 8,54   | 3 | 0,06 | A           |
| B           | 8,70   | 3 | 0,06 | A B         |
| C           | 8,46   | 3 | 0,06 | A           |
| D           | 9,84   | 3 | 0,06 | C           |
| E           | 8,85   | 3 | 0,06 | B           |

**Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )**

La tabla anterior nos muestra los resultados de la comparación de medias de contenido de cenizas para los pellets de rastrojo de piña, no se observa en los datos de medias una tendencia marcada del efecto del contenido de humedad o tamaño de partícula,

sin embargo se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos B, D y E lo cual se debe a la variación del tamaño de partícula.

Los resultados de los pellets elaborados con broza de café se muestran a continuación de forma tabulada en donde también se muestra la desviación estándar y la incertidumbre asociada:

**Tabla 42.** Contenido de cenizas obtenidas para la biomasa de broza de café

| Tratamiento | Contenido de cenizas |       |               |
|-------------|----------------------|-------|---------------|
|             | % Masa b.s.          | ± (%) | Des. Est. (%) |
| <b>A</b>    | 4,37                 | 0,02  | 0,07          |
| <b>B</b>    | 4,71                 | 0,02  | 1,12          |
| <b>C</b>    | 4,13                 | 0,02  | 0,06          |
| <b>D</b>    | 7,71                 | 0,02  | 0,06          |
| <b>E</b>    | 6,03                 | 0,02  | 0,05          |

Con respecto al contenido de cenizas en los pellets elaborados con broza de café podemos observar como al comparar los tratamientos B, D y E que presentan el mismo contenido de humedad pero diferente tamaño de partícula se observa una tendencia al disminuir el tamaño de partícula incrementa el contenido de cenizas, siendo el tratamiento D con un valor de 7,71 % el que presentó mayor contenido de cenizas.

En base al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ), se puede afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados. Se muestra a continuación la comparación de medias del contenido de cenizas para los pellets de broza de café, en donde se ratifica la existencia de diferencias significativas entre tratamientos, a continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos de esta comparación:

**Tabla 43.** Comparación de medias del contenido de cenizas en pellets de broza de café

| Tratamiento   | Medias | n | E.E. | Comparación |
|---|--------|---|------|-------------|
| <b>A</b>  | 4,37   | 3 | 0,29 | A           |
| <b>B</b>  | 4,71   | 3 | 0,29 | A           |
| <b>C</b>  | 4,13   | 3 | 0,29 | A           |
| <b>D</b>  | 7,71   | 3 | 0,29 | C           |
| <b>E</b>  | 6,03   | 3 | 0,29 | B           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p&gt;0,05</math>)</b> |        |   |      |             |

Los resultados obtenidos en la tabla anterior no muestran diferencias significativas entre los tratamientos con diferente contenido de humedad como lo son A, B y C. Por su parte con respecto al tamaño de partícula si se encontraron diferencias significativas para los tres tratamientos evaluados B, D y E lo cual nos confirma el efecto del tamaño de partícula sobre el contenido de cenizas en pellets de broza de café.

Finalmente se muestran los resultados obtenidos para la propiedad contenido de cenizas para la mezcla de rastrojo de piña y broza de café, se muestra además desviación estándar e incertidumbre asociada:

**Tabla 44.** Contenido de cenizas obtenidas para la mezcla rastrojo de piña y broza de café

| Tratamiento | Contenido de cenizas |       |               |
|-------------|----------------------|-------|---------------|
|             | % Masa b.s.          | ± (%) | Des. Est. (%) |
| <b>A</b>    | 7,21                 | 0,02  | 0,10          |
| <b>B</b>    | 7,01                 | 0,02  | 0,18          |
| <b>C</b>    | 7,36                 | 0,02  | 0,05          |
| <b>D</b>    | 8,68                 | 0,02  | 0,06          |
| <b>E</b>    | 6,92                 | 0,02  | 0,05          |

El comportamiento de contenido de cenizas para pellets elaborados con la mezcla de rastrojo de piña y broza de café no presentó una tendencia o efecto alguno del contenido de humedad sobre el contenido de cenizas como lo muestra los tratamientos A, B y C que presentan resultados muy similares. Se observa al comparar los resultados de los



tratamientos B, D y E como el tamaño de partícula se refleja en el valor del contenido de cenizas, obteniendo los mayores valores en tratamientos con menor tamaño de partícula.

El análisis de varianza realizado para contenido de cenizas en los pellets elaborados con broza de café nos permite en base al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ), afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados. La comparación entre medias de los cinco tratamientos estudiados en los pellets de mezcla entre rastrojo de piña y broza de café se muestra a continuación:

**Tabla 45.** Comparación de medias del contenido de cenizas en pellets de mezcla rastrojo de piña y broza de café

| Tratamiento   | Medias | n | E.E. | Comparación |
|---|--------|---|------|-------------|
| A   | 7,21   | 3 | 0,06 | B           |
| B   | 7,01   | 3 | 0,06 | A           |
| C   | 7,36   | 3 | 0,06 | B           |
| D   | 8,68   | 3 | 0,06 | C           |
| E   | 6,92   | 3 | 0,06 | A           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p &gt; 0,05</math>)</b> |        |   |      |             |

A continuación se presentan los resultados de la comparación entre medias para tratamientos iguales para las tres biomásas estudiadas:

**Tabla 46.** Comparación de medias de contenido de cenizas en pellets de las diferentes biomosas estudiadas

| Tratamiento  | Biomasa          | Medias | n | E.E. | Comparación |
|--|------------------|--------|---|------|-------------|
| A  | Rastrojo de piña | 8,54   | 3 | 0,05 | C           |
|  | Broza de café    | 4,37   | 3 | 0,05 | A           |
|  | Mezcla           | 7,21   | 3 | 0,05 | B           |
| B  | Rastrojo de piña | 8,70   | 3 | 0,39 | C           |
|  | Broza de café    | 4,71   | 3 | 0,39 | A           |
|  | Mezcla           | 7,01   | 3 | 0,39 | B           |
| C  | Rastrojo de piña | 8,46   | 3 | 0,03 | C           |
|  | Broza de café    | 4,13   | 3 | 0,03 | A           |
|  | Mezcla           | 7,36   | 3 | 0,03 | B           |
| D  | Rastrojo de piña | 9,84   | 3 | 0,03 | C           |
|  | Broza de café    | 7,71   | 3 | 0,03 | A           |
|  | Mezcla           | 8,68   | 3 | 0,03 | B           |
| E  | Rastrojo de piña | 8,85   | 3 | 0,03 | C           |
|  | Broza de café    | 6,03   | 3 | 0,03 | A           |
|  | Mezcla           | 6,92   | 3 | 0,03 | B           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p&gt;0,05)</b> |                  |        |   |      |             |

En base a la tabla anterior podemos concluir que el tipo de biomasa con que se realizan los pellets influye de manera directa sobre los valores de contenido de cenizas, se obtuvieron diferencias significativas para todos los tratamientos evaluados y se reportaron los mayores valores de contenido de cenizas para los pellets elaborados con rastrojo de piña.

Los materiales biomásicos presentan, en general, un contenido de cenizas muy inferior al carbón. Este es mayor en los materiales herbáceos (paja de cereales, cascara de

arroz) que en los leñosos (astilla de pino), sobrepasando en los primeros frecuentemente el 10% del peso seco de su biomasa (Carrasco, 2008). Por su parte Carrillo (2015) reporta contenidos de cenizas de 1,29 % b.s a 1,33 % b.s para pellets elaborados con residuos forestales.

Por su parte Moya (2014) en su estudio encontró para pellets elaborados con broza de café a un contenido de humedad de 10,10 % b.h un contenido de cenizas de 6,74 % b.s y para pellets elaborados con rastrojo de piña valores desde 6,88 hasta 9,42 % b.s valores que concuerdan con los encontrados en la presente investigación.

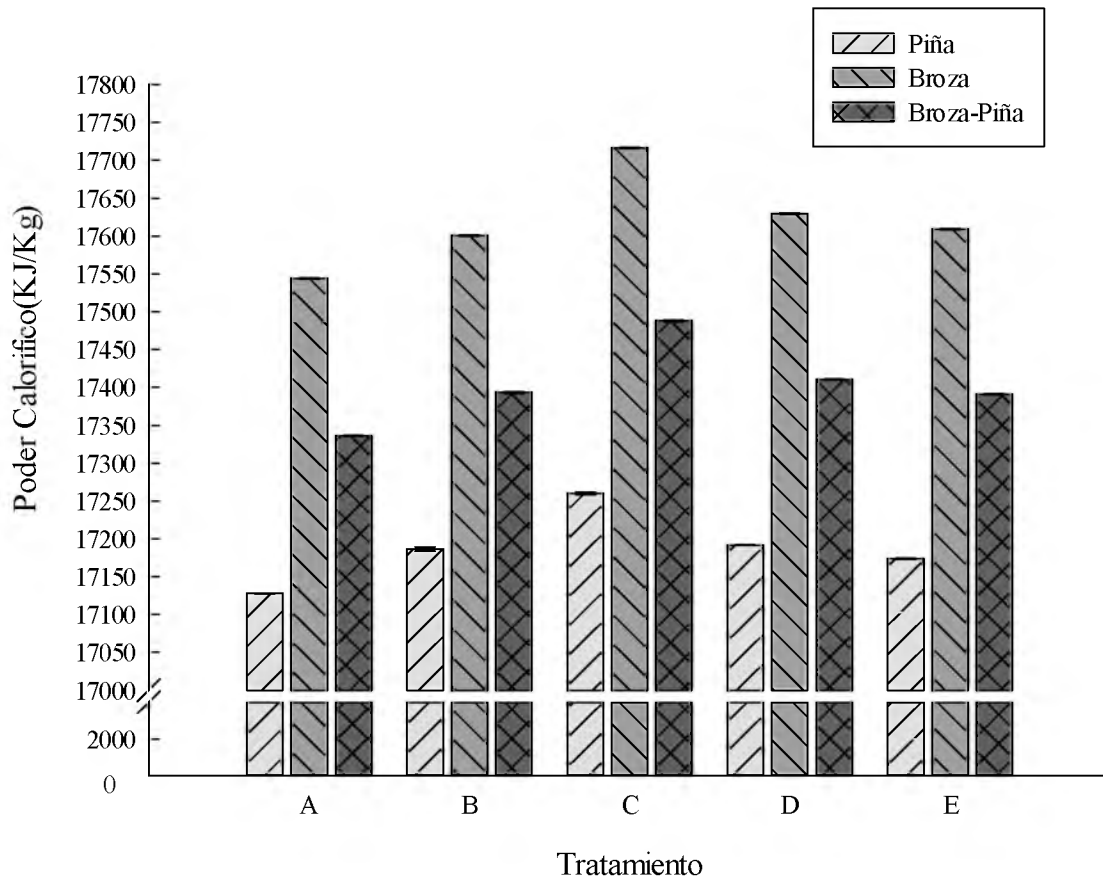
Los resultados obtenidos en la presente investigación confirman la información anterior sobre el contenido de cenizas en pellets de residuos biomásicos y en este caso de materiales herbáceos como rastrojo de piña, se obtuvieron valores en el rango de 4,13 a 9,84 % b.s. Es importante mencionar como a través de los diferentes tratamientos no se encontró una relación entre contenido de humedad y tamaño de partícula sobre el contenido de cenizas, pero si se observó como los mayores valores de contenido de cenizas corresponden a los pellets elaborados con rastrojo de piña.

Según Carrasco (2008) el inconveniente que presentan las cenizas de la biomasa y en particular, las de los materiales herbáceos y algunos residuos agroindustriales, es su alto contenido de álcalis, potasio principalmente y una baja relación Ca/K. Esta circunstancia se asocia a la formación durante la combustión de compuestos eutécticos de bajo punto de fusión, que se volatilizan y terminan formando aglomerados en el hogar de los combustores o depósitos en las partes más frías de los mismos causando importantes problemas de funcionamiento.

Con respecto al contenido de cenizas la normativa NF EN 14961-2 de combustibles sólidos especifica como valor máximo de contenido de cenizas para pellets elaborados con residuos agroindustriales 7 %, los resultados obtenidos en el presente estudio se muestran en la tabla anterior en la cual podemos observar como la gran mayoría de tratamientos sobrepasan el contenido de cenizas.

- 4.4.2 Poder calorífico

A continuación se muestran los resultados obtenidos en forma gráfica de poder calorífico para los pellets de rastrojo de piña, broza de café y la mezcla según los tratamientos evaluados en la presente investigación.



**Figura 28.** Poder calorífico obtenido para las diferentes biomásas estudiadas y tratamientos evaluados.

La figura anterior nos muestra los resultados de poder calorífico para los pellets de rastrojo de piña, broza de café y la mezcla de ambos, se muestran además los resultados de los diferentes tratamientos evaluados. Se observa la tendencia como al incrementar el contenido de humedad y disminuir el tamaño de partícula aumenta el poder calorífico para todas las biomásas estudiadas.

Se presentan los resultados obtenidos en forma tabulada de los pellets elaborados con rastrojo de piña para la propiedad de poder calorífico, además se muestra la desviación estándar y la incertidumbre asociada de los resultados obtenidos:

**Tabla 47.** Poder calorífico obtenido para la biomasa de piña

| Tratamiento | Poder calorífico |           |                    |
|-------------|------------------|-----------|--------------------|
|             | PCS[kJ/kg]       | ± [kJ/kg] | Desv. Est. [kJ/kg] |
| <b>A</b>    | 17 128           | 15        | 1                  |
| <b>B</b>    | 17 186           | 15        | 3                  |
| <b>C</b>    | 17 260           | 13        | 2                  |
| <b>D</b>    | 17 192           | 12        | 1                  |
| <b>E</b>    | 17 173           | 15        | 1                  |

Se observa de la tabla anterior la relación directa entre contenido de humedad y tamaño de partícula sobre el poder calorífico, a mayor contenido de humedad y menor tamaño de partícula en los tratamientos se obtuvo un poder calorífico mayor.

El análisis de varianza realizado para poder calorífico en los pellets elaborados con rastrojo de piña, nos permite en base al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ), afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados. La comparación entre medias de los cinco tratamientos estudiados en los pellets de rastrojo de piña se muestra a continuación:

**Tabla 48.** Comparación de medias de poder calorífico en pellets de rastrojo de piña

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | Comparación |
|-------------|--------|---|------|-------------|
| <b>A</b>    | 17 128 | 3 | 0,93 | A           |
| <b>B</b>    | 17 186 | 3 | 0,93 | C           |
| <b>C</b>    | 17 260 | 3 | 0,93 | E           |
| <b>D</b>    | 17 192 | 3 | 0,93 | D           |
| <b>E</b>    | 17 173 | 3 | 0,93 | B           |

**Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )**

De la tabla anterior se observa cómo se presentan diferencias significativas en los cinco tratamientos evaluados en los pellets de rastrojo de piña, se observa al comparar tratamiento A, B y C como el contenido de humedad influye de manera directa sobre el poder calorífico, además se observa en los tratamientos B, D y E como a menor tamaño de partícula mayor poder calorífico es obtenido.

Los resultados de los pellets elaborados con broza de café se muestran a continuación de forma tabulada en donde también se muestra la desviación estándar y la incertidumbre asociada:

**Tabla 49.** Poder calorífico obtenido para la biomasa de broza de café

| Tratamiento | Poder calorífico |           |                    |
|-------------|------------------|-----------|--------------------|
|             | PCS[kJ/kg]       | ± [kJ/kg] | Desv. Est. [kJ/kg] |
| <b>A</b>    | 17 544           | 17        | 1                  |
| <b>B</b>    | 17 601           | 15        | 1                  |
| <b>C</b>    | 17 716           | 15        | 0                  |
| <b>D</b>    | 17 630           | 18        | 1                  |
| <b>E</b>    | 17 609           | 15        | 1                  |

Para pellets elaborados con broza de café se encontró en el tratamiento C (contenido de humedad 45 % bh, broza de café entera) el mayor valor de poder calorífico con un valor de 17 716 kJ/kg. En la tabla podemos observar como el tratamiento B y A presentan valores inferiores y esto se atribuye a la disminución del contenido de humedad, lo cual nos muestra como el poder calorífico se ve influenciado directamente por el contenido de humedad.

El análisis de varianza realizado para poder calorífico en los pellets elaborados con broza de café en base al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ) se puede afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados. Se muestra a continuación la comparación de medias de poder calorífico para los pellets de broza de café, en donde se ratifica la existencia de diferencias significativas

entre tratamientos, a continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos de esta comparación:

**Tabla 50.** Comparación de medias de poder calorífico en pellets de broza de café

| Tratamiento   | Medias | n | E.E. | Comparación |
|---|--------|---|------|-------------|
| <b>A</b>  | 17 544 | 3 | 0,46 | A           |
| <b>B</b>  | 17 601 | 3 | 0,46 | B           |
| <b>C</b>  | 17 716 | 3 | 0,46 | E           |
| <b>D</b>  | 17 629 | 3 | 0,46 | D           |
| <b>E</b>  | 17 609 | 3 | 0,46 | C           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p&gt;0,05</math>)</b> |        |   |      |             |

La comparación de medias para broza de café sigue el mismo comportamiento que para rastrojo de piña, se obtuvo diferencias significativas para todos los tratamientos evaluados y una relación directa entre el contenido de humedad y tamaño de partícula sobre el poder calorífico, a mayor contenido de humedad y menor tamaño de partícula mayor fue el poder calorífico obtenido.

Finalmente se muestran los resultados obtenidos para la propiedad poder calorífico para la mezcla de rastrojo de piña y broza de café, se muestra además desviación estándar e incertidumbre asociada:

**Tabla 51.** Poder calorífico obtenido para la mezcla rastrojo de piña y broza de café

| Tratamiento | Poder calorífico |           |                    |
|-------------|------------------|-----------|--------------------|
|             | PCS[kJ/kg]       | ± [kJ/kg] | Desv. Est. [kJ/kg] |
| <b>A</b>    | 17 336           | 13        | 1                  |
| <b>B</b>    | 17 393           | 13        | 1                  |
| <b>C</b>    | 17 489           | 13        | 1                  |
| <b>D</b>    | 17 410           | 12        | 1                  |
| <b>E</b>    | 17 391           | 13        | 1                  |

La mezcla de pellets de broza de café y rastrojo de piña nos confirma como el poder calorífico es proporcional al contenido de humedad y tamaño de partícula como se puede

observar en la tabla anterior. Se obtuvo el mayor valor de poder calorífico 17 489 kJ/kg para la mezcla C que es la que presenta mayor contenido de humedad.

El análisis de varianza realizado para poder calorífico en los pellets elaborados con broza de café y rastrojo de piña reporta en base al valor de p obtenido que cumple ( $p < 0,001$ ), que se puede afirmar la existencia de una interacción estadísticamente significativa para los tratamientos estudiados.

La comparación entre medias de los cinco tratamientos estudiados en los pellets de mezcla entre rastrojo de piña y broza de café se muestra a continuación:

**Tabla 52.** Comparación de medias del poder calorífico en pellets de mezcla rastrojo de piña y broza de café

| Tratamiento   | Medias | n | E.E. | Comparación |
|---|--------|---|------|-------------|
| A   | 17 336 | 3 | 0,54 | A           |
| B   | 17 393 | 3 | 0,54 | C           |
| C   | 17 489 | 3 | 0,54 | E           |
| D   | 17 410 | 3 | 0,54 | D           |
| E   | 17 391 | 3 | 0,54 | B           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p &gt; 0,05</math>)</b> |        |   |      |             |

Se encontraron diferencias significativas en los diferentes tratamientos evaluados, además se confirma la relación encontrada en los pellets de rastrojo de piña y broza de café, a mayor contenido de humedad y menor tamaño de partícula se obtuvieron mayores valores de poder calorífico.

A continuación se muestra un análisis de varianza y una comparación de medias entre tratamientos iguales para las tres biomásas estudiadas, rastrojo de piña, broza de café y la mezcla de las dos anteriores. Este análisis permite apreciar la influencia de cada biomasa sobre la friabilidad en un tratamiento en común, a continuación se presentan los resultados de la comparación entre medias:



**Tabla 53.** Comparación de medias de poder calorífico en pellets de las diferentes biomásas estudiadas

| Tratamiento  | Biomasa          | Medias | n | E.E.  | Comparación |
|--|------------------|--------|---|-------|-------------|
| A  | Rastrojo de piña | 17 128 | 3 | 25,81 | A           |
|  | Broza de café    | 17 544 | 3 | 25,81 | C           |
|  | Mezcla           | 17 406 | 3 | 25,81 | B           |
| B  | Rastrojo de piña | 17 186 | 3 | 12,58 | A           |
|  | Broza de café    | 17 601 | 3 | 12,58 | C           |
|  | Mezcla           | 17 379 | 3 | 12,58 | B           |
| C  | Rastrojo de piña | 17 262 | 3 | 17,12 | A           |
|  | Broza de café    | 17 716 | 3 | 17,12 | C           |
|  | Mezcla           | 17 431 | 3 | 17,12 | B           |
| D  | Rastrojo de piña | 17 191 | 3 | 10,57 | A           |
|  | Broza de café    | 17 629 | 3 | 10,57 | C           |
|  | Mezcla           | 17 373 | 3 | 10,57 | B           |
| E  | Rastrojo de piña | 17 172 | 3 | 16,94 | A           |
|  | Broza de café    | 17 609 | 3 | 16,94 | C           |
|  | Mezcla           | 17 430 | 3 | 16,94 | B           |
| <b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p&gt;0,05)</b> |                  |        |   |       |             |

De la tabla anterior se observa que se presentan diferencias significativas en todos los tratamientos, lo cual nos lleva a la conclusión que el poder calorífico depende directamente de la biomasa utilizada para la elaboración de pellets. Además es importante mencionar como los pellets de broza de café presentaron los valores más altos de poder calorífico en todos los tratamientos.

En general, el valor de poder calorífico de los pellets y briquetas depende de las condiciones de proceso como la temperatura, el tamaño de partícula, y en el pretratamiento

de alimentación. En general, los pellets con mayor densidad tienen un mayor poder calorífico. Los valores caloríficos típicos de pellets de madera rangos de 17 y 18 MJ / kg (Ttumuluru et al., 2010). En base a la información anterior podemos observar como todos los tratamientos estudiados se encuentran en el rango de 17 y 18 MJ/kg, además se verifica que los pellets con mayor densidad presentaron los valores más altos de poder calorífico.

La propiedad de poder calorífico se vio influenciada por el contenido de humedad y el tamaño de partícula evaluado en los diferentes tratamientos, además se obtuvo los mayores valores de poder calorífico para los pellets elaborados con broza de café. Además del tipo y tamaño de la madera de que se trate, el contenido de agua también tiene una enorme importancia en lo que respecta a la utilización de la madera para producir energía a partir de biomasa. Dado que la biomasa sin contenido de agua no existe en la naturaleza, durante el proceso de combustión siempre se evaporará cierta cantidad de agua (Gaber et al., 2014).

Según Rojas (2014) el poder calorífico de los pellets se sitúa entre 4 200 y 4 500 kcal/kg, lo que es equivalente a 17 573 y 18 828 kJ/kg valores muy cercanos a los encontrados en la investigación, es importante aclarar que no se encuentra con un estudio de pellets elaborados con rastrojo de piña y broza de café por lo cual las comparaciones son respecto a pellets elaborados de residuos agroindustriales o residuos forestales.

En base a la normativa NF EN 14961-2 de combustibles sólidos se puede afirmar como todos los tratamientos y biomasas evaluadas cumplen con el valor exigido de 14 900 kJ/kg aspecto que se puede observar en la tabla anterior en donde el rango de los resultados es de 17 128 a 17 716 kJ/kg, lo cual está muy por encima del requerido.

- 4.4.3 Análisis último, proximal y de metales

Se muestra a continuación el análisis último, proximal y de metales realizado a pellets de de rastrojo de piña y broza de café. El análisis se realizó en el Laboratorio de Química de la Atmósfera, de la Escuela de Química, Universidad Nacional que fue el único

lugar en donde contaban con todos los equipos y procedimientos para realizar el presente análisis.

Es importante aclarar como el análisis se realizó a dos muestras de pellets, muestra C para rastrojo de piña y muestra a 12 % contenido de humedad bh para broza de café con tamaño de partícula de broza entera. Además se adjuntan los valores mínimos requeridos según la normativa y el cumplimiento o no de los pellets de rastrojo de piña y broza de café:

**Tabla 54.** Comparación de valores obtenidos en análisis último, próximo y de metales para pellets de rastrojo de piña y broza de café con valores requeridos según la normativa.

| Parámetro                                 | Tipo de muestra según biomasa |                       |                          |                          |                       |                          |
|---|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
|   | Pellets de rastrojo de piña   |                       |                          | Pellets de broza de café |                       |                          |
|   | Valor obtenido                | Valor según Normativa | Cumple o no la Normativa | Valor obtenido           | Valor según Normativa | Cumple o no la Normativa |
| Azufre $\pm 0,0006$ % m/m                 | 0,4145                        | $\leq 0,2\%$          | No                       | 0,1745                   | $\leq 0,2\%$          | Si                       |
| Cloruros $\pm 0,002$ % m/m                | 1,369                         | $\leq 0,3\%$          | No                       | 0,1111                   | $\leq 0,3\%$          | Si                       |
| Nitrógeno $\pm 0,004$ % m/m               | 2,026                         | $\leq 2\%$            | No                       | 1,770                    | $\leq 2\%$            | Si                       |
| Hidrógeno $\pm 0,01$ % m/m                | 4,14                          | -                     | Si                       | 5,73                     | -                     | Si                       |
| Carbono $\pm 0,01$ % m/m                  | 35,89                         | -                     | Si                       | 42,52                    | -                     | Si                       |
| Oxígeno $\pm 0,01$ % m/m                  | 44,11                         | -                     | Si                       | 42,01                    | -                     | Si                       |
| Arsénico (As) $\pm 0,3$ mg/kg             | 1,2                           | $\leq 1$ mg/kg        | No                       | 0,30                     | $\leq 1$ mg/kg        | Si                       |
| Níquel (Ni) $\pm 0,6$ mg/kg               | 15,7                          | $\leq 15$ mg/kg       | No                       | 5                        | $\leq 15$ mg/kg       | Si                       |
| Plata (Ag) $\pm 0,3$ mg/kg                | 12,6                          | --                    | Si                       | 15,7                     | --                    | Si                       |
| Cromo (Cr) $\pm 1$ mg/kg                  | 16                            | $\leq 10$ mg/kg       | No                       | 4                        | $\leq 10$ mg/kg       | Si                       |
| Bario (Ba) $\pm 0,2$ mg/kg                | 39,4                          | --                    | Si                       | 62,7                     | --                    | Si                       |
| Cadmio (Cd), L.M.C= 0,002 mg/L            | --                            | $\leq 0,5$ mg/kg      | -                        | --                       | $\leq 0,5$ mg/kg      | -                        |
| Plomo (Pb) $\pm 1$ mg/kg                  | 15                            | $\leq 10$ mg/kg       | No                       | 15                       | $\leq 10$ mg/kg       | Si                       |
| Lignina ácida insoluble $\pm 0,004\%$ m/m | 21,285                        | --                    | --                       | 34,737                   | --                    | --                       |
| Holocelulosa $\pm 0,0003\%$ m/m           | 42,470                        | --                    | --                       | 20,6655                  | --                    | --                       |
| Hemicelulosa $\pm 0,0004\%$ m/m           | 9,3634                        | --                    | --                       | 7,6476                   | --                    | --                       |

Con respecto al análisis último, próximo y de metales podemos observar en la Tabla 54 como contenido de nitrógeno, cloruros y azufre exceden el valor permitido para los pellets elaborados con rastrojo de piña. Por su parte los pellets elaborados con broza de café cumplen los parámetros establecidos por la norma NF EN 14961-2 de combustibles sólidos para contenido de nitrógeno, cloruros y azufre.

El aumento de las concentraciones de los elementos Cl y S puede ser el resultado de una contaminación química por, p.ej. insecticidas, adhesivos, pegamentos, lacas, colorante o conservantes de la biomasa en la materia prima o resultado de la utilización de aditivos. Las concentraciones de estos elementos deben limitarse debido a sus influencias negativas en el proceso de combustión. Altas cantidades de S y Cl pueden causar problemas con respecto a las emisiones (HCl y SO<sub>x</sub>), además del depósito y la corrosión (Oberberger & Thek, 2004).

La presencia en alta concentración de los elementos anteriores puede afectar la eficiencia global de reactores en procesos de combustión, además de causar problemas de encrustamiento y corrosión del reactor. Con respecto a hidrógeno, carbono y oxígeno la normativa de combustibles sólidos no especifica un límite o restricción para estos elementos.

Es importante recalcar los valores de carbono e hidrógeno obtenidos tanto para pellets elaborados de rastrojo de piña y broza de café, carbono como hidrogeno son susceptibles a oxidarse durante la combustión por reacciones de tipo exotérmicas (liberan agua y tienden a formar CO<sub>2</sub>) lo cual influye directamente sobre el poder calorífico de los pellets y por ende sobre la eficiente del sistema.

Metales pesados como níquel, arsénico y cromo en los pellets de broza de café cumplen de manera satisfactoria los límites establecidos por la normativa de combustibles sólidos, los pellets elaborados de rastrojo de piña exceden por poco estos límites como se puede apreciar en la Tabla 54 donde la normativa establece para arsénico un valor  $\leq 1\text{mg/kg}$ , se obtuvo 1,2 mg/kg. En el caso de níquel y cromo los límites de la normativa

son respectivamente  $\leq 15$  mg/kg y  $\leq 10$  mg/kg, se obtuvieron valores de  $\leq 15,7$  mg/kg y  $\leq 16$  mg/kg.

Los metales pesados tienen un fuerte impacto en la ceniza calidad, así como en las emisiones de partículas. Por lo tanto, con respecto a las razones ecológicas, la pesada contenido de metales en los combustibles de biomasa debe ser limitada, especialmente en relación con su utilización en pequeña escala sistemas, que por lo general no están equipados con dispositivos de precipitación de polvo (Oberberger & Thek, 2004).

La plata y bario son dos elementos que la normativa NF EN 14961-2 de combustibles sólidos no considera o presenta restricción alguna, en el caso de pellets elaborados con rastrojo de piña se obtuvieron valores de 12,6 mg/kg y 39,4 mg/kg respectivamente. Para pellets de broza de café los valores obtenidos para plata y bario son de 15,7 mg/kg y 62,7 mg/kg respectivamente.

Finalmente con respecto a la lignina ácida insoluble, holocelulosa y celulosa se conoce el uso como aglutinantes naturales que contiene la biomasa, especialmente la lignina que mediante sus propiedades adhesivas aumenta la dureza mecánica y friabilidad de pellets o briquetas. La normativa utilizada en la presente investigación para evaluar la calidad de los pellets de rastrojo de piña y broza de café no estipula restricciones acerca de lignina, holocelulosa y celulosa presente en la biomasa.

Los valores de lignina determinados para los pellets de rastrojo de piña y broza de café concuerdan con lo establecido por Tumuluru et al. (2010) que menciona la lignina como una característica típica de la biomasa no relacionada con los alimentos, presente en árboles, hierbas, y materiales de desecho, se conoce que polímeros a base de madera comprenden valores de lignina (10-25 %). Para el prensado en caliente de material de madera, la conclusión es que la fuerza de unión en los productos a base de madera depende principalmente de la conversión de celulosa a un estado amorfo. Los valores encontrados de lignina para pellets de rastrojo de piña y broza de café corresponden a 21,285 % y 34,737

% respectivamente, en el caso de broza de café se considera beneficioso el alto porcentaje obtenido de lignina por sus propiedades de aglutinante.

Según Tumuluru et al. (2010) la lignina entre sus funciones en una planta proporciona muchos fines estructurales, tales como actuar como pegamento para las fibras de celulosa. La lignina es el componente que permite la adhesión en la madera y actúa como un agente rigidizador y de aumento de volumen. Las propiedades adhesivas de la lignina térmicamente ablandado se cree que contribuir considerablemente a las características de resistencia de briquetas hechas de materiales lignocelulósicos.

## CONCLUSIONES

El rastrojo de piña y broza de café presentan un alto potencial para ser utilizados con fines energéticos. Se cuenta con gran cantidad de residuos que actualmente son un problema para el productor, por lo cual su utilización con fines energéticos da un valor tanto al rastrojo de piña como a la broza de café, ayudando de alguna forma a solventar la problemática de manejo de residuos.

Los residuos de rastrojo de piña y broza de café fueron densificados de forma exitosa bajo los diferentes tratamientos estudiados. Se corroboró su alta disponibilidad y alto potencial energético para la elaboración de pellets.

Se determinó como las propiedades físicas presentaron la mayor influencia debido al contenido de humedad y tamaño de partícula, se obtuvieron resultados más satisfactorios cuando se empleó un mayor contenido de humedad y menor tamaño de partícula en el proceso de densificación. Esto se presentó en todas las propiedades físicas evaluadas.

Se observó de forma significativa la variación en las propiedades físicas para un mismo tratamiento debido al efecto de la biomasa utilizada para elaborar los pellets. Además se obtuvo una mejora en las propiedades físicas de los pellets elaborados con mezclas en comparación con los valores de broza de café.

Los pellets elaborados con rastrojo de piña presentaron los mayores valores para densidad unitaria, densidad aparente, dureza mecánica y friabilidad para los cinco tratamientos evaluados en la presente investigación.

En las propiedades térmicas se determinó como la conductividad térmica presenta una relación directa con el contenido de humedad obteniéndose los mayores valores para los contenidos de humedad más altos. También en segundo caso de significancia se observó la influencia del tamaño de partícula sobre la conductividad térmica. Se presentó un aumento en el valor de conductividad térmica conforme se disminuyó el tamaño de partícula.



Con respecto a las propiedades fisicoquímicas, en el contenido de cenizas no se encontró alguna relación marcada o diferencia significativa respecto a la influencia del contenido de humedad y tamaño de partícula. Los valores más altos de contenido de cenizas se obtuvieron para los pellets elaborados de rastrojo de piña para todos los tratamientos.

El poder calorífico es uno de los parámetros a tener en cuenta para conocer cuanta energía podría obtenerse de la biomasa. En el caso del presente trabajo, los valores obtenidos para los diferentes tratamientos superaron el valor mínimo recomendado por la norma NF EN 14961-2 de combustibles sólidos.

Se encontraron diferencias significativas en los valores de poder calorífico en los diferentes tratamientos evaluados. El poder calorífico presentó una relación directamente proporcional con el contenido de humedad, tamaño de partícula y biomasa utilizada. Se encontró el mayor poder calorífico en pellets de broza de café, con el menor tamaño de partícula y el mayor contenido de humedad estudiado.

Respecto al análisis último, próximo y de metales se determinó de manera óptima el contenido en los pellets de rastrojo de piña y broza de café. Se comparó en base a la normativa NF EN 14961-2 de biocombustibles sólidos aprobando la mayoría de parámetros que exige la normativa. Los pellets elaborados con broza de café son de mayor calidad al cumplir todos los parámetros que exige la normativa.

En base al estudio, elaboración y caracterización de los pellets de la presente investigación estudio se puede concluir que el rastrojo de piña y la broza de café, así como la mezcla de las biomásas anteriores son residuos con las condiciones aceptables para ser utilizados con fines energéticos.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda ampliar el presente estudio con biomásas con potencial energético que no hayan sido estudiadas, así como ampliar la mezcla de biomásas con la finalidad de mejorar las propiedades de los pellets.

Se recomienda evaluar en las mismas condiciones del presente estudio el efecto del uso de aglutinantes sobre la densificación y analizar el efecto del mismo sobre las propiedades de los pellets.

Se aconseja analizar en un estudio con las mismas condiciones el efecto de la variación del diámetro del pellet sobre las propiedades resultantes de los mismos.

Se recomienda tomando en consideración el alto contenido de humedad de la biomasa estudiar métodos de extracción mecánica de la humedad con la finalidad de minimizar el secado de la biomasa.

Es de suma importancia realizar el análisis de los residuos líquidos de las biomásas estudiadas, al contar con un alto contenido de humedad sería óptimo un sistema dual en el que la parte líquida se aproveche en algún proceso industrial y la seca en la elaboración de pellets.

Se recomienda evaluar los pellets de la presente investigación en procesos como combustión y gasificación, esto con la finalidad de estudiar el comportamiento en un reactor y verificar sus beneficios y posibles inconvenientes.

Se recomienda realizar investigaciones similares con cultivos energéticos y ampliar el estudio analizando el efecto de temperatura, presión, diámetro, uso de aglutinantes y mezclas.

Realizar un balance energético simulando un proceso industrial con la finalidad de determinar la viabilidad o no del uso de rastrojo de piña y broza de café para elaborar pellets con fines energéticos.

Buscar colaboradores que permitan ampliar el estudio del análisis último, próximo y de metales para pellets de rastrojo de piña y broza de café con la finalidad de enriquecer el presente análisis y conocer más de la caracterización de los pellets.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, M., & Rodríguez, J. (1994). Impacto ambiental del procesamiento del café en Costa Rica. *Agronomía costarricense*, 18(2), 217-225. Recuperado de [http://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v18n02\\_217.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_agr/v18n02_217.pdf)
- Alpizar, J. (2007). *Utilización de la biomasa residual del cultivo de piña (Ananas comosus) para la desproteínización enzimática de los desechos de la actividad*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional, Costa Rica.
- AMBIENTICO. (2006). Piña en Costa Rica: producción y ambiente. *Ambientico*, 158, 1-10. Recuperado de <http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/ambientico/158.pdf>
- Arauz, L. (2011). *Decimoctavo Informe Estado De La Nación En Desarrollo Humano Sostenible. Agricultura: prácticas y desafíos ambientales 2011*. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación. Recuperado de [http://workspace.unpan.org/sites/Internet/Documents/agricultura\\_desaf%C3%ADos.pdf](http://workspace.unpan.org/sites/Internet/Documents/agricultura_desaf%C3%ADos.pdf)
- Bitra, V. S. P., Banu, S., Ramakrishna, P., Narender, G., & Womac, A. R. (2010). Moisture dependent thermal properties of peanut pods, kernels, and shells. *Biosystems Engineering*, 106(4), 503–512. doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.05.016
- BP. (2015). *Infografía BP statistical review of world energy 2015*. Londres, Inglaterra. Recuperado de [http://www.bp.com/content/dam/bp-country/es\\_es/downloads/PDF/Infografia%20Statistical%20Review%202015.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp-country/es_es/downloads/PDF/Infografia%20Statistical%20Review%202015.pdf)
- BUN-CA. (2002). *Manuales sobre energía renovable: biomasa*. San José, Costa Rica. Recuperado de <http://www.enersilva.org/libros/manual%20biomasa.pdf>
- Cabral, J., Tatiane, D., Braga, M., Mitiko, M., Behling, C., Dias, P., & Dilicio, J. (2012). *Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais*. Brasília, Brasil: Embrapa Agroenergía. Recuperado de <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/78690/1/DOC-13.pdf>

- Camps, M., & Marcos, F. (2008). *Los biocombustibles*. España: Mundi-Prensa.
- Camps, M., & Marcos, F. (2012). *Biocombustibles Sólidos Densificados*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- CANAPEP. (2016). *Estadísticas*. Recuperado de <http://canapep.com/estadisticas/>
- Carrasco, J. (2008). *Combustión directa de la biomasa*. Madrid, España: eoi. Recuperado de [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45279/componente45278.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45279/componente45278.pdf)
- Carrillo, T. (2015). *Caracterización de pellets con fines energéticos elaborados a partir de residuos forestales*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Clarke, S., & Preto, F. (2011). *Biomass densification for energy production*. Ontario, Canada: OMAFRA. Recuperado de [http://www.biomassinnovation.ca/pdf/Factsheet\\_OMAFRA\\_BiomassDensification.pdf](http://www.biomassinnovation.ca/pdf/Factsheet_OMAFRA_BiomassDensification.pdf)
- Codina, M. (2010). *Masías sostenibles: aprovechamientos energéticos forestales*. Solsona, España: CTFC. Recuperado de [http://docplayer.es/storage/28/12512563/1467187731/XFL\\_gjbSFcH9N3AljV4C9w/12512563.pdf](http://docplayer.es/storage/28/12512563/1467187731/XFL_gjbSFcH9N3AljV4C9w/12512563.pdf)
- Coto, O. (2013a). *Evaluación de la Generación de Residuos Agrícolas Orgánicos (RAO) en Costa Rica e Identificación de Sector Prioritario*. (Informe 1 Proyecto Uso de los Residuos Agrícolas Orgánicos como Fuente de Energía: Aprovechamiento de Recursos y Reducción de Gases de Efecto Invernadero en Costa Rica). San José, Costa Rica: FITTACORI. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/proyectos/proy-residuos-agricolas-org/productos/Informe%20RAO%20CR%20Producto%201.pdf>
- Coto, O. (2013b). *Prácticas Actuales de Tratamiento y Disposición de los Residuos Agrícolas Orgánicos en Costa Rica*. (Informe 2 Proyecto Uso de los Residuos Agrícolas Orgánicos como Fuente de Energía: Aprovechamiento de Recursos y Reducción de Gases de Efecto Invernadero en Costa Rica). San José, Costa Rica:

- FITTACORI. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/proyectos/proy-residuos-agricolasorg/productos/Informe%20RAO%20CR%20Producto%202.pdf>
- Coto, O. (2014). *Valoración de reducciones de emisiones en cadenas de conversión energética de RAOs en Costa Rica y en el sector café*. (Informe 5 Proyecto Uso de los Residuos Agrícolas Orgánicos como Fuente de Energía: Aprovechamiento de Recursos y Reducción de Gases de Efecto Invernadero en Costa Rica). San José, Costa Rica: FITTACORI. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/proyectos/proy-residuos-agricolasorg/productos/Informe%20RAO%20CR%20Producto%203.pdf>
- DGE Bruxelles. (2012). *Plan de desarrollo sostenible: Fabricación de pellets*. España: Adeco Bureba. Recuperado de [https://adecobureba.files.wordpress.com/2012/12/plan-de-negocio\\_fabricacion-de-pellets.pdf](https://adecobureba.files.wordpress.com/2012/12/plan-de-negocio_fabricacion-de-pellets.pdf)
- ekoheat. (2014). *Caldera de pellets*. República de Irlanda: ekopower. Recuperado de [http://www.ekopower.eu/images/uploads/docs/Prospecto\\_Ekoheat\\_2014\\_ESP.pdf](http://www.ekopower.eu/images/uploads/docs/Prospecto_Ekoheat_2014_ESP.pdf)
- Gaber, M., Handlos, M., & Metschina, C. (2014). *Manual de la biomasa: Sistemas de garantía de calidad y medidas de control de calidad*. Austria: Biomass Trade CentreII. Recuperado de <http://www.biomasstradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/upload/...manual...pdf>.
- García, F. (2011). *Manual de estadísticas energéticas*. Quito, Ecuador: Olade. Recuperado de [http://biblioteca.olade.org/iah/fulltext/Bjnbr/v32\\_2/old0179.pdf](http://biblioteca.olade.org/iah/fulltext/Bjnbr/v32_2/old0179.pdf)
- González, Y., Rincón, N., Camargo, J., Dévora, G., & Sierra, F. (2014). Caracterización de materiales lignocelulósicos residuales de palma de aceite y palma de coco para la fabricación de pellets. *Avances*, 11(1), 83-91.
- González, J. (2009). *Energías renovables*. Barcelona, España: Reverté.

- Guo, W., Lim, C. J., Bi, X., Sokhansanj, S., & Melin, S. (2013). Determination of effective thermal conductivity and specific heat capacity of wood pellets. *Fuel*, *103*, 347–355. doi:10.1016/j.fuel.2012.08.037
- Guo, W., Lim, J., Sokhansanj, S., Bi, X., & Melin, S. (2009). Determination of thermal conductivity of wood pellets using line heat source method. 2009 *Reno, Nevada, June 21 - June 24, 2009*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers. doi:10.13031/2013.27366
- IDAE. (2007). *Energía de la biomasa*. Madrid, España. Recuperado de [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10374\\_Energia\\_de\\_la\\_biomasa\\_07\\_28e17c9c.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10374_Energia_de_la_biomasa_07_28e17c9c.pdf)
- IDAE. (2009). *Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios*. Madrid, España. Recuperado de [http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/Eficiencia Energetica/RIT E/Reconocidos/Reconocidos /Biomasa.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RIT E/Reconocidos/Reconocidos /Biomasa.pdf)
- IDAE. (2012). *Mapa Tecnológico: Calor y Frío renovables*. España. Recuperado de [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Calor\\_y\\_Frio\\_Renovables\\_Biomasa\\_11012012\\_global\\_v2\\_09570f12.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Calor_y_Frio_Renovables_Biomasa_11012012_global_v2_09570f12.pdf)
- IEA. (2007). *Manual de estadísticas energéticas*. París, Francia. Recuperado de [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/statistics\\_manual\\_spanish.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/statistics_manual_spanish.pdf)
- IEA. (2015). *Energy and Climate Change*. París, Francia. Recuperado de [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyand ClimateChange.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChange.pdf)
- INTI. (2011). *Aspectos de la generación de calor por combustión de desechos foresto-industriales densificados*. España. Recuperado de [http://www.inti.gob.ar/e-renovables/erBI/pdf/Informe\\_pellets2011.pdf](http://www.inti.gob.ar/e-renovables/erBI/pdf/Informe_pellets2011.pdf)

- IRENA. (2013). *Renewable power generation costs in 2012: an overview*. Bonn, Alemania. Recuperado de [http://costing.irena.org/media/2769/Overview\\_Renewable-Power-Generation-Costs-in-2012.pdf](http://costing.irena.org/media/2769/Overview_Renewable-Power-Generation-Costs-in-2012.pdf)
- IRENA. (2015). *Renewable energy capacity statistics 2015*. Bonn, Alemania. Recuperado de [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Statistics\\_2015.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2015.pdf)
- Karunanithy, C., Wang, Y., Muthukumarappan, K., & Pugalendhi, S. (2012). Physiochemical characterization of briquettes made from different feedstocks. *Biotechnology Research International*, 20(12), 1-2. doi:10.1155/2012/165202. Recuperado de <http://www.hindawi.com/journals/btri/2012/165202/>
- Lee, S. M., Ahn, B. J., Choi, D. H., Han, G.-S., Jeong, H.-S., Ahn, S. H., & Yang, I. (2013). Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Biomass and Bioenergy*, 48, 1–9. doi:10.1016/j.biombioe.2012.10.015
- Mani, S., Tabil, L., & Sokhansanj, S. (2003). An overview of compaction of biomass grinds. *Powder Handling & Processing*, 15(20), 1-9. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/230704670\\_An\\_overview\\_of\\_compaction\\_of\\_biomass\\_grinds](https://www.researchgate.net/publication/230704670_An_overview_of_compaction_of_biomass_grinds)
- Merino, L. (2009). *Energías Renovables para todos: Las energías renovables*. España: Sacal.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2007). *Cadena agroalimentaria del cultivo de piña en distrito de Chires de Puriscal*. San José, Costa Rica. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00059.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2010). *Manual de buenas practicas de manufactura en el beneficio bio café oro de Tarrazú S.A.* San José, Costa Rica.



Recuperado de [http:// www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual/bibliotecavirtual/a00205.pdf](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual/bibliotecavirtual/a00205.pdf)

Ministerio de Ambiente y Energía. (2013). *Plan de acción de producción y comercio responsable de piña en Costa Rica*. San José, Costa Rica. Recuperado de [www.undp.org/content/dam/gp-commodities/docs/UNDP-GCP-CRNAP-2016.pdf](http://www.undp.org/content/dam/gp-commodities/docs/UNDP-GCP-CRNAP-2016.pdf)

Mora, S., & Borbón, M. (2015). *Desempeño del sector Agropecuario 2015*. San José, Costa Rica: SEPSA. Recuperado de [http://www.infoagro.go.cr/MarcoInstitucional/Documents/AEEI/AEEI-035%20-2015%20DESEMPENO\\_SECTOR\\_2015.pdf](http://www.infoagro.go.cr/MarcoInstitucional/Documents/AEEI/AEEI-035%20-2015%20DESEMPENO_SECTOR_2015.pdf)

Moura, J., Devilla, I., & Martins, D. (2010). *Seminário de Iniciação Científica. Propiedades térmicas dos grãos de quinoa (Chenopodium quinoa, Wild)*. Goiás, Brasil. Recuperado de [http://www.prp2.ueg.br/sic2010/fronteira/arquivos/trabalhos\\_2009/ciencias\\_agrarias/sic/propiedades\\_termicas.pdf](http://www.prp2.ueg.br/sic2010/fronteira/arquivos/trabalhos_2009/ciencias_agrarias/sic/propiedades_termicas.pdf)

Moya, R. (2014). *Producción de briquetas y pellets: aspectos técnicos*. San José, Costa Rica: ITCR. Recuperado de [http://www.cicr.com/wp-content/uploads/2016/04/211\\_aproduccion\\_de\\_briquetas\\_de\\_biomasa\\_roger\\_moya\\_itcr.pdf](http://www.cicr.com/wp-content/uploads/2016/04/211_aproduccion_de_briquetas_de_biomasa_roger_moya_itcr.pdf)

Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653–669. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>

Ortiz, L. (2008). *Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España*. Pontevedra, España: CIDEU

Quesada, K., Alvarado, P., Sibaja, R., & Vega, J. (2003). Utilización del rastrojo de piña (Ananás comosus) como refuerzo de una resina poliéster comercial. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 6(2), 157-179.

ragt-energie. (2016). *Revisión de normas*. Francia. Recuperado de <http://www.ragt-energie.fr/fr/activites/normalisation.php>

- Ramaswamy, H., Raghavan, V., Chakraverty, A., & Mujumdar, A. (2003). *Handbook of postharvest technology*. New York, USA: Marcel Dekker Inc. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/280900291/Handbook-of-Postharvest-Technology>
- Ramírez, F., Carazo, E., Roldán, C., & Villegas, G. (2007). *Encuesta de oferta y consumo energético nacional de la biomasa en Costa Rica año 2006*. San José, Costa Rica: DSE. Recuperado de <http://www.dse.go.cr/es/03Publicaciones/02Estadisticas/encuestaBiomasa2008.pdf>
- Rojas, A. (2004). *Prefactibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Chile, Santiago, Chile. Recuperado de [http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2004/rojas\\_a2/sources/rojas\\_a2.pdf](http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2004/rojas_a2/sources/rojas_a2.pdf)
- Sadeghi, A. (2012). Thermal Conductivity of Feed Pellets. *JAST*, 14, 975-984. Recuperado de [http://jast.modares.ac.ir/article\\_4868\\_4495680f36733541378\\_ca55e5e9dd791.pdf](http://jast.modares.ac.ir/article_4868_4495680f36733541378_ca55e5e9dd791.pdf)
- Segura, C. (2007). *Producción de pellets en Chile y tecnologías de combustión*. Concepción: UDT. Recuperado de [http://www.mma.gob.cl/1304/articles-55266\\_PresentacionPellets.pdf](http://www.mma.gob.cl/1304/articles-55266_PresentacionPellets.pdf)
- Sjöström, J., & Blomqvist, P. (2014). Direct measurements of thermal properties of wood pellets: Elevated temperatures, fine fractions and moisture content. *Fuel*, 134, 460–466. doi:10.1016/j.fuel.2014.05.088.
- Soto, G., & Nuñez, M. (2008). Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de pinus radiata (D. Don), como material aglomerante. *Maderas*, 10(2), 129-137. Recuperado de [http://www.scielo.cl/pdf/maderas/v10n2/art\\_05.pdf](http://www.scielo.cl/pdf/maderas/v10n2/art_05.pdf)

Tarasov, D., Shahi, C., & Leitch, M. (2013). Effect of Additives on Wood Pellet Physical and Thermal Characteristics: A Review. *ISRN Forestry, 2013*, 1–6. doi:10.1155/2013/ 876939

Tumuluru, J., Wright, C., Kenny, K., & Hess, J. (2010). *A Review on Biomass Densification Technologies for Energy Application*. USA: INL. Recuperado de <https://inldigital.library.inl.gov/sti/4886679.pdf>