



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

PROGRAMA DE POSTGRADO

**POTENCIAL DEL ASERRÍN GENERADO EN LA TRANSFORMACIÓN
PRIMARIA DE *Pinus patula* PARA LA FABRICACIÓN DE PELLETS**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

IVÁN DARÍO GONZÁLEZ MARTÍNEZ



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



Chapingo, México a 11 de Diciembre 2013

**POTENCIAL DEL ASERRÍN GENERADO EN LA TRANSFORMACIÓN
PRIMARIA DE *Pinus patula* PARA LA FABRICACIÓN DE PELLETS**

Por:

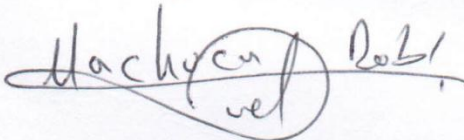
Iván Darío González Martínez

Esta tesis se realizó bajo la dirección de la Dra. Amparo Borja de la Rosa, fue aprobada por el siguiente comité asesor y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias, en Ciencias Forestales

Director: 

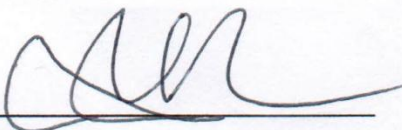
Dra. Amparo Borja de la Rosa

Asesor: 

© Dr. Roberto Machuca Velasco

Asesor: 

M.C. Alejandro Corona Ambriz

Asesor: 

Dr. Marcos Miguel González Peña

DEDICATORIA

Dedico esta tesis de maestría a mi madre María Mery Martínez, hermanas Claudia Liliana González Martínez y Milena González Martínez al igual que a mi sobrina Camila González Herrera quienes con compañía, apoyo y atención, han sido parte vital de mi formación profesional.

A Diana Carolina Ortiz quien durante estos dos años de ausencia y momentos difíciles me demostró su cariño y comprensión.

A la memoria de mi padre Néstor González Mora de quien guardo los valores de la responsabilidad, trabajo y dedicación con mis deberes.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y a la División de Ciencias Forestales por la oportunidad de capacitarme en otro nivel más de mi vida profesional.

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo financiero que facilitó el desarrollo de mis actividades académicas.

A la Dra. Amparo Borja de la Rosa por la colaboración y apoyo brindado para llevar a buen término esta investigación.

Al M.C. Roberto Machuca Velazco por su apoyo en el desarrollo de esta idea y sus constantes asesorías.

Al Dr. Marcos Miguel González por la colaboración brindada en las diferentes fases de esta investigación y su valioso conocimiento.

Al M.C. Alejandro Corona Ambriz por su apoyo en el análisis estadístico de los datos y la oportuna revisión de los resultados.

Al M.C. Mario Fuentes Salinas por las asesorías brindadas y el acompañamiento en el aserrío de la madera.

Al M.C. Gonzalo Novelo González por el acompañamiento en el diseño del ensayo para la elaboración de pellets en la maquina universal.

Al Ejido Villa Cuauhtémoc en cabeza del ingeniero Manuel Morales Martínez por la donación de la madera utilizada en esta investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS

Iván Darío González Martínez nació en Ulloa, Valle (Colombia), el 25 de abril de 1984. Realizó sus estudios de pregrado en el programa académico de Ingeniería Forestal en la Universidad del Tolima en la ciudad de Ibagué (Colombia); donde se formó cumpliendo con los requerimientos académicos satisfactoriamente y obteniendo su título con la pasantía en el Centro de Investigación para la Industria Papelera CENPAPEL, apoyando el desarrollo del Proyecto Agroindustrial Maderero y Papelero PAMPA.

Posteriormente, desarrolló sus actividades profesionales en el Centro Nacional de Investigación y Fomento Forestal CONIF, como joven investigador patrocinado por el Departamento Nacional de Ciencia y Tecnología COLCIENCIAS, en los proyectos titulados: “Modelos de crecimiento para especies forestales creciendo en la Costa Atlántica Colombiana” y “Desarrollo de un simulador de crecimiento para especie forestales creciendo en Colombia”.

POTENCIAL DEL ASERRÍN GENERADO EN LA TRANSFORMACIÓN PRIMARIA DE *Pinus patula* PARA LA FABRICACIÓN DE PELLETS

SAWDUST POTENCIAL GENERATED DURING *Pinus patula* PRIMARY TRANSFORMATION FOR PELLET FABRICATION

Iván Darío González Martínez¹, Amparo Borja de la Rosa², Roberto Machuca Velazco³ y Alejandro Corona Ambriz⁴, Marcos Miguel González Peña⁵

Resumen

El densificado de la biomasa es una estrategia para mejorarla como combustible, al disminuir su CH, e incrementar su densidad energética. También reduce los costos de almacenaje y transporte. En este estudio se evaluó el potencial del aserrín generado en la transformación primaria de la madera de pino para producir pellets en el laboratorio. Se derribaron 2 árboles, y se aserraron 4 trozas en una planta piloto. El aserrín representó el 16.8% del volumen sin corteza, y se clasificó en tres tamaños de malla: 0.84, 2.00 y 4.76 mm, representando el 65.4, 26.3 y 7.0% del peso del aserrín, respectivamente. Se fabricaron pellets individuales con aserrín de cada uno de los tamaños de partícula, y con una mezcla del material en la proporción descrita. Se usaron tres presiones de formación a 115°C: 147, 196 y 245 MPa, con el material al 15% de CH. Luego se determinó en los pellets: poder calorífico superior, densidad energética, resistencias a la compresión y al impacto, durabilidad, densidad normal y a granel, y CH. De las 12 combinaciones probadas, 9 cumplen con los parámetros relevantes a la norma europea de pellets EN 14961-2, i.e. poder calorífico, CH, durabilidad y densidad a granel. Aunque existen cambios significativos en las propiedades al aumentar la presión, desde la presión más baja, la evaluación del pellet es aceptable cuando se fabrican con la partícula fina, la media, o la mezcla. El análisis químico revela una biomasa con bajo contenido de cenizas y abundancia de lignina, lo que sumado a la alta densidad y poder calorífico del pellet, determinan un índice de valor del combustible muy superior al del aserrín y la madera.

Abstract

Densification is a traditional practice to improve the combustion properties of biomass by means of enhancing the energy density and reducing the moisture content (MC) of the feedstuff; this practice also reduces the fuel's costs of storage and transport. Herein, we examined the potential of pine sawdust from primary wood processing, for manufacturing pellets at the laboratory scale. Two trees were logged, and 4 logs were milled at a pilot sawmilling plant; sawdust from this operation was 16.8% of the original lumber volume without bark. Sawdust was then sifted to three meshes: 0.84, 2.00 and 4.76 mm, giving 65.4, 26.3 and 7.0% of the sawdust (w:w), respectively. Individual pellets were then manufactured with sawdust of each particle size, and with a mixture similar to the original particle size distribution. We tested three pelletizing pressures at 115°C, namely 147, 196 and 245 MPa, using sawdust at 15% MC. Physical and chemical pellet characterization included: high heating value, energy density, compression and impact strength, durability, normal and bulk densities, and MC. Nine out of twelve combination tested fulfilled the requirements of calorific value, MC, durability and bulk density set out in the European Standard EN 14961-2 for marketable pellets. Significant changes, mostly improvements, were determined in pellet properties as the pelletizing pressure increased, but pellets manufactured with the fine or medium particle fractions, or with the particle mix at the lowest pelletizing pressure complied readily with the relevant standard. A chemical analysis of the biomass reveals low ash and high lignin contents; this attributes, together with a high density and calorific value, bring about a much higher fuel value index for the pellet compared to the one of sawdust or the original wood.

CONTENIDO

CONTENIDO	<i>i</i>
LISTA DE CUADROS	<i>vi</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>viii</i>
1. INTRODUCCIÓN	<i>1</i>
2. OBJETIVOS	<i>5</i>
2.1. Objetivo general	<i>5</i>
2.2. Objetivos específicos	<i>5</i>
3. REVISIÓN DE LITERATURA	<i>6</i>
3.1. Descripción de las variables que intervienen en la formación de pellets	<i>6</i>
3.1.1. Biomasa utilizada en la formación de pellets	<i>7</i>
3.1.2. Pre-tratamientos	<i>8</i>
3.1.3. Tamaño de partícula	<i>10</i>
3.1.4. Contenido de humedad en la biomasa	<i>11</i>
3.1.5. Presión	<i>12</i>

3.1.6. <i>Temperatura</i>	15
3.1.7. <i>Aditivos aglomerantes</i>	16
3.2. <i>Evaluación física y química de los densificados</i>	19
3.2.1. <i>Dimensión de los pellets</i>	19
3.2.2. <i>Contenido de humedad en los pellets</i>	20
3.2.3. <i>Densidad</i>	21
3.2.4. <i>Poder calorífico y variables de combustión</i>	22
3.2.5. <i>Resistencia mecánica de los pellets</i>	24
3.2.5.1. <i>Durabilidad</i>	24
3.2.5.2. <i>Dureza</i>	25
3.2.5.3. <i>Resistencia al impacto</i>	26
3.2.6. <i>Densidad a granel</i>	27
3.2.7. <i>Composición química</i>	28
3.3. <i>Normas de calidad para pellets</i>	30
3.4. <i>La producción de residuos en la industria del aserrío</i>	32
4. MATERIALES Y MÉTODOS	35
4.1. Materiales	35
4.1.1. <i>Especie seleccionada</i>	35
4.1.2. <i>Equipos de asierre</i>	35
4.1.2.1. <i>Sierra banda</i>	36

4.1.2.2. Desorilladora	37
4.1.2.3. Cabeceadora.	37
4.1.4. Tamices y agitador de tamices	38
4.1.5. Molde unitario para pellets experimental	39
4.1.6. Maquina universal	41
4.1.7. Calorímetro	41
4.1.8. Aparato experimental para la durabilidad	41
4.1.9. Instrumentos de medición	42
4.1.10. Cristalería, reactivos y equipos de laboratorio	42
4.2. Métodos	44
4.2.1 Preparación del material y fabricación de los pellets	45
4.2.1.1. Colecta y asierre de trozas	45
4.2.1.2. Medición de residuos	46
4.2.1.3. Clasificación de aserrines	47
4.2.1.4. Control del contenido de humedad	48
4.2.1.5. Tratamientos y densificado de aserrines	48
4.2.2. Caracterización física de los pellets	52
4.2.2.1. Densidad normal de los pellets y la madera	52
4.2.2.2. Densidad a granel de los pellets y el aserrín.	54
4.2.2.3. Durabilidad de los pellets	55
4.2.2.4. Resistencia a la compresión de los pellets	55

4.2.2.5. Resistencia al impacto de los pellets	56
4.2.3. Caracterización química y energética de los pellets	57
4.2.3.1. Contenido de volátiles y carbono fijo	57
4.2.3.2. Contenido de extractivos	58
4.2.3.3. Contenido de lignina	60
4.2.3.4. Contenido de cenizas	62
4.2.3.5. Contenido de humedad en pellets	63
4.2.3.6. Poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI)	64
4.2.3.7. Densidad energética (DE)	66
4.2.3.8. Índice del Valor del Combustible (IVC)	66
4.2.4. Análisis estadístico	67
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
5.1. Medición de residuos de la transformación primaria	70
5.2. Clasificación de aserrines	71
5.3. Elaboración de pellets en laboratorio	72
5.4. Evaluación físico química de los pellets	73
5.5. Análisis estadístico de los tratamientos	75
5.5.1. Densidad normal	75

5.5.2. Densidad a granel	78
5.5.3. Contenido de humedad	80
5.5.4. Durabilidad	82
5.5.5. Resistencia a la compresión	85
5.5.6. Resistencia al impacto	87
5.5.7. Poder calorífico superior (PCS)	90
5.5.8. Densidad energética	92
5.5.9. Índice de valor del combustible (IVC)	95
5.6. Discusión general del análisis estadístico.	96
6. CONCLUSIONES	98
7. RECOMENDACIONES	100
8. LITERATURA CITADA	101
9. ANEXOS	115

LISTA DE CUADROS

<i>Cuadro 1. Características físicas, químicas y físico-químicas de los pellets y sus unidades de medida.</i>	19
<i>Cuadro 2. Parámetros de calidad para pellets. Norma EN 14961-2</i>	31
<i>Cuadro 3. Especificaciones técnicas de la sierra banda</i>	36
<i>Cuadro 4. Especificaciones técnicas de la desorilladora.</i>	37
<i>Cuadro 5. Especificaciones técnicas de la cabeceadora</i>	38
<i>Cuadro 6. Presiones de formación y tamaños de partícula utilizados en la elaboración de pellets de aserrín</i>	49
<i>Cuadro 7. Residuos y madera aserrada obtenidos en el aserrío de 4 trozas de Pinus patula.</i>	70
<i>Cuadro 8. Distribución de partículas obtenidas en el tamizado de aserrín de transformación primaria de Pinus patula.</i>	71
<i>Cuadro 9. Composición química del aserrín de P. patula.</i>	73
<i>Cuadro 10. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de densidad normal (kg/m^3) de los tratamientos (prueba de Tukey).</i>	77
<i>Cuadro 11. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de densidad a granel (kg/m^3) de los tratamientos (prueba de Tukey)</i>	79
<i>Cuadro 12. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de contenido de humedad (%) de los tratamientos (prueba de Tukey)</i>	82

Cuadro 13. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de durabilidad (%) de los tratamientos (prueba de Tukey).	84
Cuadro 14. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de resistencia a la compresión (N) de los tratamientos (prueba de Tukey	86
Cuadro 15. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de resistencia al impacto (índice) de los tratamientos (prueba de Tukey)	89
Cuadro 16. Poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI) de los pellets de aserrín de <i>P. patula</i>	91
Cuadro 17. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de densidad energética (GJ m^{-3}) de los tratamientos (prueba de Tukey)	94
Cuadro 18. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos del valor del combustible (índice) de los tratamientos (prueba de Tukey)	96

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Funcionamiento de una peletizadora de rodillos.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 2. Esquema de la formación de pellets sobre una matriz plana</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3. Molde unitario experimental para fabricación de pellets.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4. Esquema del molde unitario para la fabricación de pellets. A)</i> <i>Configuración para la fabricación del pellet. B) Configuración para la</i> <i>extracción del pellet.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 5. Esquema metodológico usado en la investigación</i>	<i>44</i>
<i>Figura 6. Separación de residuos.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 7. Clasificación de aserrines por tamaños de partícula</i>	<i>47</i>
<i>Figura 8. Control de temperatura con termocople tipo J</i>	<i>50</i>
<i>Figura 9. Suministro de aserrín dentro del cilindro de formación.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 10. Compresión del aserrín</i>	<i>52</i>
<i>Figura 11. Pellets elaborados en molde experimental. A) Mezcla de</i> <i>partículas. B) Partículas de tamaño ≤ 0.84 mm.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 12. Densidad normal en pellets de aserrín obtenida a diferentes</i> <i>niveles de presión y tamaño de partícula.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 13. Densidad a granel de los pellets a diferentes tratamientos de</i> <i>presión y tamaño de partícula.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 14. Contenido de humedad de los pellets a diferentes presiones y</i> <i>tamaños de partículas.....</i>	<i>81</i>

<i>Figura 15. Durabilidad de los pellets a diferentes niveles de presión y tamaño de partícula.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 16. Resistencia a la compresión de los pellets a diferentes niveles de presión y tamaño de partícula.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 17. Resistencia al impacto de los pellets a diferentes niveles de presión y tamaño de partícula.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 18. Poder calorífico superior de los pellets de aserrín de P. patula a diferentes niveles de presión y tamaño de partícula</i>	<i>90</i>
<i>Figura 19. Densidad energética de pellets a diferentes niveles de presión y tamaño de partícula.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 20. Índice de valor del combustible de los pellets a diferentes niveles de presión y temperatura.</i>	<i>95</i>

1. INTRODUCCIÓN

El sector forestal genera altos volúmenes de desperdicios como resultado de las actividades de aprovechamiento y transformación, los cuales tienen potencial energético debido a su composición lignocelulósica. Actualmente, tanto los desperdicios forestales como los residuos agrícolas originados a lo largo de la cadena productiva, han tomado mayor importancia como material energético, debido al balance neutro de nuevas emisiones de carbono, y a la necesidad de algunos países por encontrar fuentes alternativas que sustituyan a los combustibles fósiles.

Una forma de aprovechar el potencial de este tipo de biomasa es la producción de pellets, cuya técnica consiste en mejorar las propiedades energéticas de la biomasa a través de la compactación. De acuerdo con Kamikama et al. (2009), los pellets de madera tienen la ventaja como combustible sólido de poseer una densidad energética más alta y un menor contenido de humedad en comparación con las astillas y la leña. Por otro lado, los pellets reducen los costos de almacenaje y transporte debido a su alta densidad y forma homogénea. Esta forma de combustible poco conocido en algunos países como

México, está siendo adoptado ampliamente en aquellos sitios donde existe un alto potencial de residuos y donde el costo de los combustibles fósiles es cada vez mayor.

Los pellets son pequeños cilindros de no más de 4 cm de largo y entre 6 a 8 mm de diámetro, los cuales son elaborados con pequeñas partículas de biomasa bajo altas presiones y temperatura generalmente sin el uso de aditivos. Su forma y tamaño les permite ser manipulados y dosificados a granel por medios mecánicos o neumáticos. Estos pueden ser utilizados fácilmente en sistemas de co-combustión (con carbón mineral), gasificación y pirolisis (Kaliyan y Morey, 2009).

Aunque los residuos forestales representan una fuente de materia prima los pellets, en el caso de los residuos de campo tales como ramas y trozas no comerciales, se encuentran dispersos en el terreno y presentan mayor heterogeneidad en su forma y composición, representando costos adicionales para la reducción de tamaño, recolección y transporte. Según Figueroa *et al.* (2004), estos desperdicios representan aproximadamente el 47% la madera cosechada.

Por otro lado, los residuos producidos durante la transformación primaria de la madera, representan otra cantidad considerable de material que los aserraderos generan como parte del proceso de corte, dependiendo en mayor o menor cantidad de las características tecnológicas de los equipos de corte. De acuerdo con Nájera *et al.* (2010), el rendimiento de madera aserrada en trozas de *Pinus*

sp es del 57.5% sin corteza y 52.17% con corteza utilizando sierra banda de 8 pulgadas. Es decir que el material, más del 40%, restante se convierte en desperdicios del proceso.

Dentro de estos residuos, las costeras y recortes pueden tener un posterior aprovechamiento en la industria de los tableros, o en los talleres de segunda transformación debido a sus dimensiones. En el caso de las partículas más pequeñas (aserrín), aunque también es usado como materia prima para la industria de los tableros, en México se les ha dado otros usos junto con la corteza tales como: combustible, usado en los establos como piso para los animales o en algunos casos como material de desecho. Zavala (1996), menciona que durante el asierre de trozas en dos aserraderos de banda representativos de México, la proporción de costaneras y recortes encontrada fue entre el 20.76 y 30.32%, y de aserrín entre el 12.96 y 21.98% del total de volumen procesado.

Dentro de las ventajas de usar el aserrín de la transformación primaria para la producción de pellets, está no requerir de grandes inversiones para la reducción granulométrica y agregar valor a un subproducto con altos volúmenes de producción. Países como México tienen un gran potencial en el aprovechamiento energético de residuos de transformación primaria, debido al recurso forestal que posee y al alto número de aserraderos que existen. De acuerdo con la FAO (2006), el número de aserraderos instalados en México se estima en 1,250 unidades, con una producción diaria promedio de 20.000 pt (94 m³r) y un coeficiente de aserrío promedio inferior al 60%.

Dentro de las especies de mayor uso en México para la industria del aserrío, el *P. patula* es una de las más importantes especialmente en el centro del país, debido a que se distribuye en grandes masas de forma natural y actualmente se desarrollan programas de repoblación especialmente por los ejidos, que se encargan del manejo y aprovechamiento. Esta especie se distribuye principalmente en los estados de Tamaulipas, Querétaro, Hidalgo, México, Morelos, Tlaxcala, Puebla, Veracruz, Oaxaca y Chiapas (Farjon *et al.*, 1997). Por otro lado, el rápido crecimiento, propiedades tecnológicas y trabajabilidad de esta especie, hacen pensar que la producción de residuos se mantendrá de forma constante, lo que significa una oportunidad para que este subproducto pueda ser utilizado en la elaboración de pellets. Sin embargo, productos como estos solo son rentables en la actualidad para la exportación hacia países como Estados Unidos, Canadá y ciertos países de Europa, donde el uso de este combustible se ha masificado.

En el presente trabajo, se evalúa el potencial que tienen los aserrines generados en la transformación primaria de *P. patula* como materia prima para la elaboración de pellets, describiendo las bondades y desventajas del material, las principales variables a tener en cuenta antes y durante el proceso de densificado, así como las características de calidad encontradas y evaluadas con base a la norma EN 14961-2, que actualmente utilizada por los productores en Europa.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Conocer el potencial del aserrín generado en la transformación primaria de *Pinus patula* para la elaboración de pellets.

2.2. Objetivos específicos

- Estimar la proporción y características de las partículas de aserrín que se obtienen durante la transformación primaria de la madera de pino.
- Determinar las mejores condiciones de fabricación de pellets en laboratorio.
- Caracterizar física y químicamente los pellets producidos en el laboratorio
- Evaluar las propiedades energéticas de los pellets.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

La densificación de la biomasa ha llamado la atención debido a sus ventajas con respecto a la biomasa en bruto, pues mejora tanto las propiedades físicas como las de combustión (Obernberger y Thek, 2004). Por un lado, puede reducir los costos de transporte, manejo y almacenamiento debido a la forma y tamaño uniforme y, por otro lado, pueden ser utilizados para la combustión, co-combustión, gasificación y pirolisis como otros productos originados a partir de biomasa (Kaliyan y Morey, 2009). Actualmente, los densificados o pellets se utilizan tanto en procesos industriales como la calefacción en viviendas, principalmente en países industrializados.

3.1. Descripción de las variables que intervienen en la formación de pellets

El conocimiento de las variables de formación y las características del material usado en la elaboración de pellets, es requerido para obtener productos de calidad que cumplan con la normatividad vigente para usos energéticos. En este sentido Mani *et al.* (2006), menciona que la formación de pellets depende básicamente de las propiedades físicas de las partículas, la presión y la temperatura. Sin embargo, existen otros aspectos de igual importancia los cuales se describen a continuación.

3.1.1. Biomasa utilizada en la formación de pellets

La técnica de la densificación ha servido para que el uso de residuos agrícolas y forestales tengan un valor agregado como bioenergético (Bhattacharya, 2003). Debido al aumento en la última década del consumo de pellets como combustible, las materias primas que se utilizan en mayor cantidad para su elaboración son virutas de corte y aserrín (Ståhl y Berghel, 2011). Los pellets de madera tienen varias ventajas como combustible sólido en comparación con las astillas y la leña, como son, una mayor densidad de energía (por volumen), menor contenido de humedad, y mejores propiedades de manipulación, Además, los residuos generados durante la transformación de la madera se pueden densificar con un consumo de energía relativamente bajo (Kamikama *et al.*, 2009), particularmente en las coníferas, como la especie utilizada en el presente trabajo.

En este sentido se pueden encontrar un alto número de investigaciones que abarcan el uso de diferentes tipos de biomasa. En un estudio realizado por Martinsson y Östernberg (2004), para la producción de pellets a partir de madera de raleo, madera de desecho y residuos de cosecha del Sauce, llegaron a la conclusión de que las propiedades de calidad de pellets elaborados con estas materias primas eran las mismas de los pellets de aserrín, con la excepción de que las materias primas utilizadas en el estudio tienen un contenido de cenizas superior.

Ståhl y Berghel (2011), investigaron la fabricación de pellets tomando como materia prima el aserrín de *Pinus sylvestris* mezclado con torta de colza. Mani *et al.* (2006), ensayaron como materias primas paja de trigo, paja de cebada, rastrojo de maíz y el pasto varilla. Arzola *et al.* (2012), utilizaron cuesco de palma de aceite generado durante la extracción para la elaboración de pellets. Kamikawa *et al.* (2009), fabricaron pellets de madera y corteza de las especies *Cryptomeria japonica* y *Larix kaempferi*. Soto y Nuñez (2008), utilizaron carbonilla de carbón y aserrín de *Pinus radiata* como material aglomerante.

Estas y muchas otras investigaciones dan cuenta del amplio número de las formas de biomasa provenientes de residuos de cosechas o procesos industriales que pueden ser utilizados para la elaboración de densificados.

3.1.2. Pre-tratamientos

En algunas ocasiones la biomasa antes de ser peletizada, pasa por algún tipo de tratamiento con el propósito de optimizar el densificado o las características finales de los pellets. Stelte *et al.*, (2013), mencionan que el método de torrefacción de la materia prima acerca las características energéticas y de manejo de los pellets de carbón. La torrefacción es una pirolisis leve en ausencia de oxígeno que remueve fracciones de carbohidratos debido a la depolimerización y degradación térmica especialmente de las hemicelulosas. De acuerdo a este autor, las mejores propiedades térmicas, de adsorción y de

resistencia, se presentan en los pellets fabricados con pre-tratamientos a una temperatura de 250 °C.

La torrefacción se puede realizar tanto en seco como en húmedo. Biswas *et al.* (2011) y Lam *et al.* (2013), evaluaron la elaboración de pellets con vapor; encontrando que el pre-tratamiento en húmedo mejora las cualidades de resistencia y adsorción en contraste con los pellets cuya torrefacción se realizó en seco. Así mismo, mencionan que a temperaturas mayores a 275°C se producen pellets defectuosos, lo que indica que altas temperaturas tiene efecto adverso en la capacidad aglomerante y natural de la biomasa. En este sentido, Grover y Mishra (1996), reiteran que el precalentamiento de la biomasa debe ser máximo de 300°C para evitar la descomposición del material.

De acuerdo con Briggs *et al.* (1999), el aumento en el tiempo retención de la materia prima dentro de una cámara acondicionador de vapor entre 5 a 15 s, aumenta la durabilidad de los pellets en cinco puntos porcentuales respecto a la biomasa no tratada.

Cuando se modifica la matriz lignocelulosica de la biomasa a través de métodos químicos, físico químicos (explosión de vapor, microondas y calor de radio frecuencia), o pre-tratamientos biológicos, las características de compresión y compactación de los pellets pueden ser mejoradas (Kashaninejad y Tabil, 2011). La matriz de celulosa, hemicelulosa y lignina pueden romperse en pequeñas moléculas amorfas a través de la hidrólisis ácida o alcalina (Vlasenko *et al.*, 1997). Los pre-tratamientos biológicos donde se usan microorganismos

tales como el hongo café o blanco, también permiten la degradación de alguno de los compuestos de la madera (Fan *et al.*, 1987).

3.1.3. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula influye de manera importante en la durabilidad de los pellets, siendo mayor la resistencia mecánica cuando estos son fabricados con partículas más finas (Kaliyan y Morey, 2009).

Jannasch *et al.* (2001), evaluaron el proceso de peletización de pasto varilla encontrando que la dureza del pellet aumentó moderadamente con una disminución de tamaño de partícula de 3.2 a 2.8 mm. En este mismo sentido Ahn *et al.* (2012), examinaron a través de un diseño factorial pellets elaborados con residuos de alerce y tulipwood, encontrando que los tamaños de partícula <1.41 mm fueron más durables que los fabricados con tamaño de partícula entre 1.41 y 3.17 mm. Así mismo Franke y Rey (2006), sugieren que tamaños de partículas de madera entre 0.5 a 0.7 mm son los más apropiado para la producción de pellets duraderos. Estos autores mencionan que partículas mayores a 1.0 mm pueden actuar como puntos de ruptura en los pellets y que partículas demasiado finas causan problemas de producción.

Lehtikangas (2000), indica por otro lado, que las partículas demasiado finas y el polvo, pueden perturbar los sistemas de alimentación de calderas y contribuir a generar fuego y riesgo de explosión durante la manipulación, almacenamiento o

transbordo. Por lo tanto, una mezcla de diferentes tamaños de partícula daría una óptima calidad de los pellets debido a la ocupación de espacios.

3.1.4. Contenido de humedad en la biomasa

Previo a que la biomasa sea peletizada, esta debe tener un contenido de humedad específico que permita un densificado óptimo. Li y Liu (2000), reportaron que la resistencia de los pellets de madera se ve afectada directamente por el contenido de humedad. Ahn *et al.* (2012), mencionan que el contenido de humedad de las partículas de aserrín entre el 9,0 y 13,0%, aumenta la durabilidad de los pellets. Esto sucede porque el agua ayuda a desarrollar las fuerzas de Van der Waals al aumentar el área de contacto entre las partículas (Grover y Mishra, 1996).

Cuanto el contenido inicial de agua de la biomasa se encuentre en el mínimo optimo, menor será la cantidad de calor necesario para la evaporación y más alta la cantidad de calor disponible para el proceso de compactación (Carone *et al.*, 2011). En cualquier caso, la presencia de una cantidad mínima de agua también es necesaria para que la presión capilar y las fuerzas interfaciales, promuevan la unión de partículas aumentando la durabilidad de los pellets (Thomas y Poel, 1996 y Moritz *et al.*, 2002).

Ståhl y Berghel (2011), mencionan que la producción de pellets a nivel industrial usa un contenido de humedad entre el 8 y 12% antes de que comience el proceso de peletizado. Sin embargo, estos mismos autores encontraron que la

humedad depende de la materia prima que se utilice, pues para la elaboración de pellets mezclando torta de colza y aserrín de *Pinus* sp, se necesita un contenido de humedad de aproximadamente 14% para obtener pellets de buena calidad.

Stelte *et al.* (2011), encontraron que la durabilidad mecánica de los pellets fue mejor utilizando contenidos de humedad entre el 5 y 15% en base húmeda, mientras que los pellets elaborados con más del 20% de humedad en base humedad no lograron ninguna estabilidad mecánica.

En cualquiera de los casos, cuando se requiere aumentar el contenido de humedad en las partículas, el agua añadida a través de vapor tiene mejores resultados que la de la adición directa de agua (Thomas *et al.*, 1998).

3.1.5. Presión

Debido a la aplicación de altas presiones y temperaturas, puentes sólidos se pueden desarrollar por la difusión de moléculas de una partícula a otra en los puntos de contacto. Puentes sólidos también se pueden formar entre las partículas debido a la cristalización de algunos de los ingredientes, reacción química, endurecimiento de aglutinantes o la solidificación de los componentes fundidos. Estos puentes se forman principalmente después de enfriamiento o secado de productos densificados. Fuerzas de corto alcance tales como enlaces químicos libres, puentes de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals u otras como la electrostáticas y las fuerzas magnéticas, pueden causar que las

partículas sólidas se adhieran entre sí cuando se encuentran suficientemente cerca (Kaliyan y Morey, 2009).

Pietsch (2002), menciona que las fuerzas de unión que actúan entre las partículas individuales en los productos densificados se pueden clasificar en cinco grupos principales. Ellos son: (i) puentes sólidos, (ii) fuerzas de atracción entre las partículas sólidas, (iii) puntos de enclavamiento mecánico, (iv) fuerzas de adhesión y cohesión y (v) fuerzas interfaciales y presión capilar.

Li y Liu (2000), estudiaron el comportamiento de densificado del aserrín, corteza y viruta tanto de roble como de álamo en un rango de presión de 34 a 138 MPa, encontraron que al aumentar la presión también aumento la resistencia a la abrasión, resistencia al impacto y resistencia a la compresión.

Arzola *et al.* (2012), menciona haber obtenido pellets de mejor calidad a una presión de trabajo de 100 MPa. Sin embargo, esto fue logrado con la adición de almidón como aglomerante a una temperatura de 85 °C.

Las altas presiones de formación son refutadas por Stelte *et al.* (2011b), quien encontró que presiones mayores a 250 MPa tienen poca influencia en el aumento de la densidad de pellets. Esto es respaldado en parte por Dec (2002) y Dec *et al.* (2003), al mencionar que en una prensa de rodillos las presiones de formación se encuentran en el rango de 100 – 200 MPa.

Luego de que la presión es retirada, el material tiende a expandirse, aumentando de tamaño. Mani *et al.* (2006), analizaron los datos de relajación y determinaron el módulo asintótico. De acuerdo con ellos, la paja de cebada tuvo

el mayor módulo asintótico entre todos, indicando con esto que los pellets elaborados con esta biomasa fueron más rígidos que los demás. Así mismo, concluyeron que los módulos asintóticos aumentaron linealmente con un aumento de la fuerza de compresión.

Para la compresión y evaluación de pellets en laboratorio Nielsen *et al.* (2009), utilizaron un prensa cilíndrica unitaria de pistón para peletizar aserrín de *Fagus sylvatica* y *Pinus sylvestris*. Esta prensa fue adaptada a una maquina universal Instron 4485 utilizando 300 MPa de carga a una velocidad de compresión y de expulsión de 127 mm min⁻¹, manteniendo la fuerza de compresión máxima por 10 segundos. Esta misma prensa y las mismas condiciones de presión fueron utilizados por Stelte *et al.*, (2011a), con la diferencia que la velocidad fue disminuida a 100 mm min⁻¹ para comprimir paja de trigo (*T. aestivum* L.). Carone *et al.* (2011), mencionan haber utilizado la misma prensa con presiones hasta de 176 MPa a una velocidad de compresión de 30 mm min⁻¹, manteniendo 10 segundos la carga completa para comprimir residuos de olivo. Otros autores como Tabil (1996), Biswas *et al.* (2011), Lam *et al* (2011), Li y Liu (2012) y Arzola *et al.* (2012), reportan haber utilizado una prensa cilíndrica unitaria similar a las anteriormente mencionadas, elaborada de forma experimental.

Como se ha evidenciado, el rango de presiones y prensas utilizadas experimentalmente es amplio teniendo en cuenta el abanico de opciones de biomasa con que se vaya a trabajar.

3.1.6. Temperatura

Al aumentar la temperatura y el contenido de humedad, disminuye los requerimientos de energía para la producción de pellets. Esto, debido a que las propiedades aglomerantes de la biomasa se alteran produciendo pellets más resistentes (Nielsen *et al.*, 2009). Cuando la biomasa se calienta, la lignina se vuelve suave y a veces se funde exhibiendo propiedades aglomerantes (Thomas *et al.*, 1998). Sin embargo, el reblandecimiento de la lignina sólo tiene lugar si el material que la contiene se encuentra a un contenido de humedad adecuado (Lehmann *et al.*, 2012).

Ahn *et al.* (2012), realizaron análisis de Rayos X en pellets fabricados con partículas de alerce y tulipwood, mostrando que la lignina se extiende a lo largo de los densificados uniendo las partículas debido al aumento de temperatura y el tiempo de compactación. Sin embargo, el grado de calentamiento en la prensa de pellets depende del tipo de madera, la composición, tamaño de partícula y del contenido de humedad (Nielsen, 2009).

Lehmann *et al.* (2012), menciona que la temperatura en una prensa de matriz plana alcanza entre 100 y 115 °C. En este mismo sentido Nielsen *et al.* (2009), mencionan que durante el proceso de peletización la temperatura puede ser más alta, alcanzando entre 110 y 130 °C.

Ahn *et al.* (2012), fabricaron pellets de serrín en una peletizadora tipo pistón a temperaturas entre 120, 150 y 180°C durante 1 y 3 min, examinando los efectos de la temperatura de peletización y el tiempo en la durabilidad de los pellets de

madera, encontrando que los pellets tratados a 180 °C exhibieron mayor durabilidad.

Stelte *et al.* (2011) estudiaron la resistencia de pellets elaborados con biomasa de haya, abeto y paja, y su relación con los mecanismos de adhesión entre partículas a través del tipo y la calidad de los enlaces. Estos autores determinaron que los pellets fabricados a 100 °C reflejaron mayor resistencia mecánica y características de unión que los fabricados a 20 °C.

Kaliyan y Morey (2009), mencionan que la temperatura aplicada o generada durante el proceso de peletizado se encarga de activar la acción de aglomerantes aplicados en la formación de pellets, así como de promover la deformación plásticas de partículas termoplásticas. Este calor se puede dar por fricción, flujo de calor (resistencia o aceite), o por acondicionamiento con vapor. Cualquiera que sea el caso, se encargan de gelatinizar los almidones y desnaturizar las proteínas, cuando se usan como aglomerantes.

3.1.7. Aditivos aglomerantes

Las propiedades aglomerantes de las materias primas se relacionan con la cantidad de lignina, hemicelulosa y extractivos de la especie utilizada (Kaliyan y Morey, 2009). Cuando la resistencia y durabilidad de los pellets no cumplen con las normas de calidad o requisitos de comercialización, el uso de aditivos en el rango de 0,5 a 5% (en peso), son añadidos para aumentar la calidad de los pellets (Tabil, 1996).

Arzola *et al.* (2012), investigaron el peletizado de cuesco de palma de aceite adicionando un agente aglutinante hasta el 25% en masa, manteniendo el tamaño promedio de partícula por debajo de 1 mm y el contenido de humedad hasta el 18,7% (b.s.). Como resultados, mostraron que la durabilidad alcanzada con la adición de aglomerante entre un 15 y 25%, fue del 98.91% para un contenido de humedad del 10.7%, y cuando el contenido de humedad fue aumentada al 18.7%, la durabilidad disminuyó al 67.81%. Estos investigadores concluyen que peletizar el cuesco de palma sin aglomerante no tiene resultados favorables.

Lehmann *et al.* (2012), investigaron las propiedades mecánicas de los pellets de madera mezclados con una proporción de *Miscanthus* de hasta 0.20 kg kg⁻¹, fécula de papa como aglutinante de hasta 0.02 kg kg⁻¹ y dos procesos diferentes de molienda (tritución de impacto en condiciones secas y trituración de cizallamiento bajo condiciones de humedad). Los resultados mostraron que para la producción de pellets con trituración del material adicionado con *Miscanthus* por el método de impacto, es necesaria la adición de un aglutinante. Por otro lado, cuando se utiliza una trituración de cizallamiento de la materia prima, no es necesaria la adición de aglutinante para cumplir con los criterios de calidad, incluso con una proporción de *Miscanthus* de 0.20 kg kg⁻¹. Según estos autores, la trituración de cizallamiento conduce a un producto altamente fibroso creando un alto potencial para crear uniones más firmes. Otro efecto según los autores, podría ser la activación mecano-química de las sustancias aglutinantes como las proteínas en las materias primas durante la etapa de preparación

húmeda. Los investigadores concluyen que la durabilidad de los pellets fue levemente aumentada por la adición de *Miscanthus*, y solo se vió influenciada por la adición de almidón de papa. En este sentido Kaliyan y Morey (2009), menciona que el almidón natural tiene menor capacidad de unión que el almidón gelatinizado, el cual se obtiene en presencia de calor y humedad durante la peletización.

Carone *et al.* (2011), mencionan que las proteínas también desempeñan un papel importante como elemento aglomerante entre diferentes partículas durante la compactación. La re-cristalización después del enfriamiento o la transición vítrea, puede crear puntos de unión fijos entre partículas. Wood (1987), observó que la proteína cruda aumento la dureza y durabilidad de los pellets en comparación con la proteína desnaturalizada. Sin embargo, encontró que almidón (crudo o pregelatinizado) en combinación con proteína cruda, tuvieron efectos mínimos en la durabilidad del pellet.

Por otro lado Hill y Pulkinen (1988), reportaron no haber encontrado cambios en la durabilidad de los pellets de alfalfa con contenidos de proteína entre 14.5 y 20%, y que sólo se presentaba mayor durabilidad cuando el contenido de proteína alcanzaba el 80%. Estos datos contrastan con los de Briggs (1999), quien encontró que el pellet para el consumo de aves con un contenido de proteína entre 16.3 a 21%, incrementó la durabilidad de 76 a 89%.

3.2. Evaluación física y química de los densificados

De acuerdo con Camps y Marcos (2008), las principales características al momento de evaluar los pellets se muestran en el cuadro 1:

Cuadro 1. Características físicas, químicas y físico-químicas de los pellets y sus unidades de medida.

Físicas	1. Forma.	***
	2. Tamaño.	***
	3. Aspecto (color, brillo).	***
	4. Densidad.	Kg dm ⁻³
	5. Humedad.	%
	6. Friabilidad.	Índice
Químicas	1. Composición química elemental.	%
	2. Composición química por compuestos.	%
	3. Poder calorífico.	kJ kg ⁻¹ , kcal kg ⁻¹
Físico-químicas	1. Coeficiente de conductividad térmica.	W m.s ⁻¹
	2. Temperatura y tiempos de combustión e inflamación.	°C, s
	3. Temperatura máxima de llama.	°C
	4. Potencia calorífica	J kg.s ⁻¹ , W kg ⁻¹
	5. Densidad energética	kJ dm ⁻³

Dentro de las variables y metodologías para evaluar la calidad y características energéticas en los pellets se mencionan las siguientes:

3.2.1. Dimensión de los pellets

A diferencia de las briquetas, los pellets son elaborados de menor tamaño para poder ser manipulados con medios mecánicos y facilitar su movimiento.

Mani *et al.* (2006), menciona que los pellets de biomasa usualmente se encuentran entre 6 a 8 mm de diámetro y 12 a 15 mm de longitud. Lehtikangas (2000), reporta haber elaborado pellets con residuos de abeto rojo y pino escocés de 6 mm de diámetro y 15 mm de longitud. Temmerman *et al.* (2006), estudiaron la durabilidad de pellets comerciales entre 6 y 10 mm de diámetro con una longitud de dos veces el diámetro. Nielsen *et al.* (2009), coincide con los demás autores en que el diámetro puede encontrarse entre 6.0 y 8.0 mm pero con longitudes entre 5.0 - 40.0 mm.

Carone *et al.* (2011), mencionan una vez los pellets salen de la prensa, aumentan ligeramente de diámetro y longitud. Ståhl y Berghel (2011) y Lehtikangas (2001), mencionan que el largo final de los pellets es influenciado por el contenido de humedad. En cualquiera de los casos y como se mencionó anteriormente, el tamaño de los pellets debe facilitar su manipulación pero a la vez mantener su integridad física.

3.2.2. Contenido de humedad en los pellets

La humedad es importante desde el punto de vista del aprovechamiento energético, pues es la que más influye en el poder calorífico de los biocombustibles, junto a la especie. Los pellets al igual que la madera son higroscópicos y tienden a perder su integridad durante el transporte y el almacenaje.

Ståhl y Berghel (2011), indican que al final del peletizado, el contenido de humedad es aproximadamente del 6 al 8%. Además, los pellets que tienen un contenido de humedad bajo (alrededor de 8% base húmeda), garantizan un almacenamiento seguro (Mani *et al.* 2006).

Hartley y Wood (2007), evaluaron las propiedades higroscópicas a diferentes humedades para pellets de aserrín de abeto rojo (*Picea spp.*), abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) y pino (*Pinus contorta* Dougl. Ex Loud.), utilizando el método de las soluciones saturadas de sales. Ellos encontraron una relación lineal entre la humedad y el contenido de humedad de equilibrio en el rango de 11 a 80%. En el rango de humedad del 93 al 100% de humedad, los pellets se desintegraron.

Aunque el método del secado en estufa es el más utilizado y fácil de implementar para obtener el contenido de humedad, Lehmann *et al.* (2012), determinaron el contenido de humedad de la materia prima y los pellets usando un analizador de humedad termo-gravimétrico (tipo Mytron FAB-1/2), a 110 °C de forma rápida.

3.2.3. Densidad

La densidad de los pellets es un factor característico de este producto, pues optimiza el almacenamiento y transporte del material al requerir menos espacio. Lehmann *et al.* (2012), mencionan que este aumento en la densidad del

material se logra con la fuerza de compresión durante el proceso de peletizado, la cual reduce el número de espacios entre partículas (Carone *et al.*, 2011).

Lehmann *et al.* (2012), midieron la densidad real de los pellets utilizando un dispositivo experimental de desplazamiento de mercurio en cinco muestras representativas de cada tratamiento. Temmerman *et al.* (2006), estudiaron tres formas de medir la densidad de los pellets encontrando una mejor repetitividad y reproducibilidad en el método de desplazamiento de líquidos respecto al método estereométrico.

3.2.4. Poder calorífico y variables de combustión

El poder calorífico también llamado valor calorífico, es el parámetro más importante para caracterizar una sustancia como combustible, pues representa el número de unidades de energía que una unidad de masa puede producir durante la combustión (cal/g, kcal/kg o kJ/kg).

De acuerdo con Telmo y Lousada (2011), el valor calorífico de la madera puede ser expresado en Valor Calorífico Superior (base seca), que significa el valor absoluto de energía en una combustión considerando el calor del vapor de agua que se desprende del material cuando este se condensa. Por otro lado, el Valor Calorífico Inferior (base seca), significa el valor absoluto de energía en una combustión donde todos los productos de la reacción del agua permanecen en forma de vapor. Finalmente, estos autores mencionan que la medida más práctica del contenido de energía de una muestra es el Valor Calorífico Inferior

(base húmeda), en el cual mide el calor desprendido considerando el contenido de humedad se evapora.

Estos mismos autores midieron el valor calorífico superior tanto en especies blandas como en especies duras, encontrando para las primeras un valor entre 19.7 y 20.4 GJ kg⁻¹, y para las segundas un intervalo entre 17.6 y 20.8 GJ kg⁻¹. El Valor Calorífico Inferior para las maderas blandas se encontró desde 15.6 hasta 16.9 GJ kg⁻¹ y para las maderas duras entre 14.4 -17.9 GJ kg⁻¹. Para este estudio fue utilizado un calorímetro isoperibolico de bomba.

Kamikawa *et al.* (2009), describe que a diferencia de otros autores que utilizan la calorimetría de combustión y el análisis termogravimétrico, estos evaluaron las características de combustión de pellets de madera y de corteza de *Cryptomeria japonica* y *Larix kaempferi* en un calorímetro de cono. De acuerdo con estos investigadores, el calorímetro de cono puede estimar varios parámetros tales como: los cambios de la tasa de liberación de calor (HRR), disminución de peso durante la combustión, el tiempo de ignición, tiempo de llama, tiempo de la muestra en apagarse, calor de combustión, y porcentaje de residuos. Los resultados obtenidos de este estudio muestran que el tiempo de ignición está directamente relacionado a la densidad de los pellets, el calor de la combustión depende de la parte del árbol que se utilice, y que el calor de la flama en pellets de corteza fue menor que en pellets de madera. Sin embargo, el calor total liberado por ambos es casi igual. Además, mencionan que el tiempo en que tarda en quemarse el pellets está estrechamente relacionado con el peso residual luego de que la flama se apaga.

3.2.5. Resistencia mecánica de los pellets

La resistencia al daño está estrechamente relacionada al proceso de producción en aspectos previamente revisados tales como: los componentes de la materia prima, el contenido de humedad, tamaño de partícula, la aplicación de vapor o precalentamiento, la adición de aglutinantes, la mezcla de materias primas, y el equipo de densificación (Kaliyan y Morey, 2009), mencionan que las fuerzas que causan daños a los pellets durante la manipulación, el transporte y el almacenamiento, se pueden dividir en tres clases generales: compresión (aplastamiento), impacto (rotura), y de cizallamiento (abrasión).

3.2.5.1. Durabilidad

La durabilidad mecánica es un parámetro de calidad que define la capacidad del biocombustible densificado para permanecer intacto cuando es manipulado y sometido a choque y fricción. Para medir la durabilidad o resistencia abrasiva a la que los pellets son sometidos, se puede utilizar un dispositivo de volteo, medidor Holmen o un equipo Lignotester (McMullen *et al.*, 2005). Temmerman *et al.* (2006), analizaron estos métodos en la durabilidad mecánica en 26 tipos de pellets fabricados de madera, paja, heno y *Miscanthus*, encontrando que los valores medidos de durabilidad y su variabilidad se ven influidas por método utilizado. Por otra parte, determinaron que la variabilidad de los resultados depende de tipo del densificado propiamente. Igualmente mencionan que el dispositivo de volteo permitió alcanzar niveles de precisión aceptables (1%) con

un número limitado de repeticiones. Del mismo modo, la investigación estableció que no se encontró relación entre la dureza y la densidad de los pellets.

Toscano *et al.* (2013), determinaron la durabilidad de pellets de aserrín de pino mezclados con *Miscanthus* utilizando la norma DIN EN 15210-1 (2009), la cual consiste en tamizar 0.5 kg de pellets en una malla de 3.15 mm antes y después de someterlos a choque y fricción en una caja rígida a 50 rpm durante 500 vueltas. La durabilidad es el resultado de la relación entre masa inicial y la masa final expresado en porcentaje. Carone *et al.* (2011), evaluaron la durabilidad de los pellets hechos con desechos de poda de olivo bajo estos mismos parámetros.

Mina-Boac *et al.* (2006), menciona que pellets con una durabilidad inicial de 93% se puede manejar con seguridad en los sistemas mecánicos con una menor producción de las finos. Los pellets que se desintegran fácilmente producen altas emisiones de polvos, los sistemas de alimentación de calderas se bloquean, y aumentan el riesgo de incendio y explosión durante la manipulación, transporte o almacenamiento (Temmerman *et al.*, 2006).

3.2.5.2. Dureza

La prueba de dureza simula la fuerza de compresión debido al peso de los demás pellets durante el almacenamiento o transporte.

Kaliyan y Morey (2008), mencionan que la prueba de dureza o resistencia a la compresión, se realiza con pellets individuales colocados entre dos placas paralelas con áreas mayores que el área proyectada del pellet. Un aumento de la carga se aplica a una tasa constante hasta que el espécimen de prueba falla por craqueo o frenado, registrando el ensayo en curva de carga - deformación. Obenberger y Thek (2004) y Temmerman *et al.* (2006), encontraron que no hay relación entre la dureza con la densidad del pellet.

3.2.5.3. Resistencia al impacto

La resistencia al impacto también llamada resistencia al golpe, simula la caída y el vaciado de pellets en camiones cuando se manipulan, permitiendo establecer la altura de caída máxima que evite la ruptura inmediata (Pietsch, 2002). Camps y Marcos (2008), mencionan que el método de golpe o ruptura consiste en dejar caer sobre una superficie dura, una cantidad de 100 pellets a una altura de 100 cm, y posteriormente contar el número de pellets que se rompen para obtener a partir allí un índice de golpeteo. Cuando el índice sea igual a la unidad indica la mayor resistencia al impacto.

Al - Widyan y Al-Jalil (2001), utilizaron una prueba de resistencia a la caída para determinar la durabilidad de pellets fabricados con biomasa de olivo. Los pellets se dejaron caer a una altura de 1,85 m sobre una placa de metal 4 veces. La masa retenida con respecto a la masa inicial fue tomada como la durabilidad. Este mismo método fue utilizado por Li and Liu (2000), modificando la norma

ASTM D440-86 desarrollada para carbón. A diferencia de los primeros autores, estos disminuyeron el número de caídas a dos veces.

3.2.6. Densidad a granel

Las altas densidades de los pellets resultan en altas densidades a granel y, por lo tanto, en una alta densidad de energía. La densidad a granel es un factor importante para la logística y espacio de almacenamiento (Lehmann *et al.*, 2012).

La densidad de la paja suelta es de alrededor de 40 kg m^{-3} , mientras que la densidad más alta de residuos de madera no procesada es de alrededor de 250 kg m^{-3} (Demirbas, 2001). De acuerdo con Obernberger y Thek (2004), la densificación puede dar lugar a productos con densidad a granel de 600-800 kg m^{-3} aproximadamente, es decir, hasta 10 veces mayor que la densidad de la biomasa. De acuerdo con la norma EN14961-2, el requisito mínimo para la densidad a granel de pellets de biomasa es de 600 kg m^{-3} . Mani *et al.* (2006), confirman que una densidad a granel mayor a 600 kg m^{-3} es eficiente para el transporte y almacenamiento de los pellets.

Ahn *et al.* (2012), mencionan que la densidad de los pellets fabricados con biomasa de alerce y tulipwood oscilaron entre 624 y 670 kg m^{-3} , para pellets con diámetro y longitud promedio de 7 mm y 20 mm, respectivamente.

Lehmann *et al.* (2012), mencionan haber determinado las densidades a granel cribando los pellets en un tamiz de 3.15 mm para posteriormente vaciarlos en un recipiente de volumen conocido previamente tarado retirando el exceso de material de la parte superior. Después calcularon la densidad a partir de la masa de los pellets y el volumen conocido del recipiente. Este mismo método fue utilizado por Ståhl y Berghel (2011), los cuales midieron la densidad a granel usando tres repeticiones por cada tratamiento.

3.2.7. Composición química

La composición química de los pellets condiciona variables tales como: el poder calorífico, los gases emitidos durante la combustión y la composición de las cenizas (Camps y Marcos, 2008).

Uno de los parámetros más importantes a evaluar en los pellets es el contenido de cenizas (material inorgánico), pues en altas cantidades representa problemas durante la combustión de la biomasa tales como: escoria, aglomeración del lecho, encrustamientos y corrosión en el equipo de combustión disminuyendo su rendimiento (Werkelin *et al.*, 2010). Esto puede ocurrir cuando los pellets son elaborados con corteza, ya que generan una alta cantidad de cenizas en comparación con los pellets fabricados con residuos de madera (Kamikawa *et al.*, 2009).

Filbakk *et al.* (2011), estudiaron el contenido de cenizas en pellets elaborados con residuos de pino y diferentes proporciones de corteza, encontrando que se

excede hasta en cinco veces el porcentaje de cenizas cuando se agrega una alta proporción de corteza, colocando a estos pellets en la peor de las categorías.

Toscano *et al.* (2013), estudiaron el contenido de cenizas, azufre, cloro, potasio y magnesio de pellets comerciales, encontrando que aproximadamente la mitad de ellos no cumplió con los parámetros establecidos en la norma EN 14961-2, para pellets de calidad A1.

Otro de las variables al caracterizar químicamente la biomasa es la presencia de lignina, pues en altas cantidades, confiere un mayor poder calorífico al material durante la combustión debido a que se encuentra formada por polímeros de alto contenido energético. Stevens y Gardner (2010), estudiaron la adición de lignina proveniente del licor negro del proceso Kraft y lignina IAT en la formación de pellets, encontrando que el segundo tipo de lignina le confirió mayor poder calorífico.

Por otro lado, la presencia de lignina actúa como aglomerante de las partículas durante el precalentamiento del material; dado el bajo punto de derretimiento, cercano a los 140°C (Mani *et al.*, 2006)

Stelte *et al.* (2011b), realizaron un análisis químico para biomasa de haya, abeto y paja, retirando los extractivos con acetona en un aparato Soxhlet, determinaron el contenido de lignina Klason y obtuvieron el contenido de cenizas. Estos autores encontraron que la paja tiene un contenido de extractivos, cenizas y lignina más alto que las especies maderables, 4.4%, 4.6%

y 29.6% respectivamente. De las dos especies maderables, el abeto tuvo un porcentaje más alto de lignina (21.6%).

Mani *et al.* (2006), analizaron el contenido de cenizas, lignina, proteína, celulosa y hemicelulosa en paja de trigo, paja de cebada, restos de maíz y pasto. Los resultados mostraron que en todos los casos, el contenido de cenizas estuvo por encima del 5%. El contenido de lignina fue mayor en la paja de trigo y en el pasto (7.61 y 7.43% respectivamente). La celulosa en la mayoría se encontró alrededor del 43% excepto en los restos de maíz donde fue del 31%. La presencia de hemicelulosas fue mayor en el pasto seguido por la paja de cebada (30 y 27.8% respectivamente).

El análisis químico de la biomasa permite entonces, evaluar previamente el material y a través de sus compuestos, pronosticar las cualidades o desventajas que tendrán los pellets.

3.3. Normas de calidad para pellets

Uno de los mercados más grandes en la producción y consumo de pellets es el europeo, en el cual hasta hace poco existían diferentes normativas dependiendo del país de origen. Sin embargo, en la actualidad normas como la SS 187120 de Suecia, la DIN 51731 y ÖNORM M7135, usadas en Alemania y Austria, han mudado a una norma unificada denominada EN14961-2 (cuadro 2), encaminada a regular las características y calidad de los pellets que se comercializan en Europa (Forero *et al.*, 2012).

Cuadro 2. Parámetros de calidad para pellets. Norma EN 14961-2

Parámetros	Clases		
	Enplus-A1	Enplus-A2	EN-B
Origen	Madera de tronco. Residuos de madera sin tratamiento químico	Arboles enteros sin raíces. Madera de tronco. Residuos de aprovechamiento. Corteza. Madera sin tratamiento químico.	Madera de bosque virgen. Subproductos y residuos del procesamiento de la madera. Madera usada.
Diámetro (mm)	6 - 8	6 - 8	6 - 8
Longitud (mm)	3.15 - 40.0	3.15 - 40.0	3.15 - 40.0
Humedad (% masa b.h.)	≤10	≤10	≤10
Cenizas (% masa b.h.)	≤ 0.7	≤ 1.5	≤ 3.0
PCI (MJ kg ⁻¹ b.s.)	16.5 – 19.0	16.3 – 19.0	16.0 – 19.0
S (% masa b.s.)	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.04
N (% masa b.s.)	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0
Cl (% masa b.s.)	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.03
As (mg kg ⁻¹)	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0
Cd (mg kg ⁻¹)	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5
Cr (mg kg ⁻¹)	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Cu (mg kg ⁻¹)	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Hg (mg kg ⁻¹)	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1
Pb (mg kg ⁻¹)	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zn (mg kg ⁻¹)	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Contenido de finos (%)	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0
Densidad a granel (kg m ⁻³)	≥ 600	≥ 600	≥ 600
Durabilidad (% masa b.h.)	≥ 97.5	≥ 97.5	≥ 96.5
Aditivos (% masa)	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Potencia calorífica (kWh kg ⁻¹)	4.6 - 5.3	4.5 - 5.3	4.4 - 5.3

La norma europea EN-14601, utilizada actualmente en España, Austria, Alemania y Suiza, clasifica los pellets en tres grupos de acuerdo a su uso. El grupo uno (ENplus-A1), es utilizado para alimentar sistemas de alta calidad, especialmente el boiler de pequeña escala para uso residencial. Los grupos grupo 2 (ENplus - A2) y 3 (ENplus – B), son elaborados para alimentar sistemas de combustión a gran escala, donde no se requiere de la más alta calidad (IEA Bioenergy, 2011).

3.4. La producción de residuos en la industria del aserrío

La industria forestal genera altos volúmenes de residuos a lo largo de su cadena productiva como resultado de las prácticas de poda, raleos, cosecha y transformación. Según Figueroa *et al.* (2004), solamente el 53% de la madera cosechada llega al aserrío; el resto queda como residuos en el bosque.

Revisando solamente los residuos de transformación primaria, encontramos investigaciones hechas por Nájera *et al.* (2010), en la cual se determinó un rendimiento en madera aserrada del 57.5 % sin corteza y 52.17 % con corteza en trozas de *Pinus* sp utilizando sierra banda de 8 pulgadas de ancho. Igualmente, estudios adelantados por Zavala y Hernández (2000), en las mismas condiciones de asierre y con las mismas especies, el coeficiente de aserrío encontrado fue del 51%, con una proporción de costaneras y recortes de 27%, y un 22% de aserrín.

Yang y Jenkins (2008), estimaron que el volumen de residuos de aserraderos en California para el año 2003 utilizando factores del volumen de residuos para la madera transformada, mostrando que la cantidad de residuos fue entre 2.2 y 2.5 Mton, representados en 45% residuos gruesos, 32% residuos finos, y 23% corteza. Dichos autores también mencionan que la generación de residuos está influenciado por factores como la dimensión y forma de las trozas, los tipos de producto a obtenerse, y los equipos de asierre.

La generación de residuos es parte del proceso de transformación de la madera siendo económicamente necesario darles un uso adecuado. En la actualidad, los subproductos como las costeras y los recortes están adquiriendo más importancia para la industria de tableros aglomerados o de celulosa (Zavala y Hernández, 2000).

Zavala (1996), determino el coeficiente de aserrío de dos aserraderos representativos en México los cuales utilizaban sierra banda entre 8 y 12 pulgadas. De un numero de trozas de 132 y 150 para cada aserradero encontraron que el coeficiente de aserrío real fue entre el 54.96 y 61.63% y el coeficiente de aserrío nominal entre el 41.54 al 44.18%. Otra muestra de 60 trozas sin corteza fueron transformadas y determinaron una proporción de costaneras entre el 20.76 y 30.32% y una proporción de aserrín entre el 12.96 y 21.98%.

Según Zavala y Hernandez (2000), encontraron que el coeficiente de aserrío en un total de 87 trozas de *Pinus sp.*, fue del 51%, sin que este se viera afectado por la calidad o diámetro de trozas. De este volumen de residuos, 27% correspondió a recortes y costaneras, y un 22% de aserrín. Sin embargo y de acuerdo con el trabajo hecho por Quiros *et al.* (2005), quienes aserraron un total de 294 trozas provenientes de aclareos para tres especies diferentes, este rendimiento disminuye a un valor entre 27 y 39% cuando se aprovechan árboles de diámetros pequeños y madera de menor calidad.

Cualquiera que sea el caso, se debe tener en cuenta que trozas de menor calidad con una alta conicidad, defectos de forma, daños mecánicos o enfermedades, implican una disminución en volumen de madera aserrada y por consiguiente un mayor volumen de residuos.

3.5. Producción industrial de pellets

La biomasa utilizada para la fabricación de pellets generalmente debe ser acondicionada previamente, a través del astillado, secado y molienda. Posteriormente, por medio de sistemas de alimentación y dosificación muy precisos, y con motores dotados de variadores de frecuencia, se regula los flujos de biomasa al interior de las peletizadoras (Ortiz, 1994). Los motores de accionamiento se encuentran entre los 3 a 400 kW dependiendo de la escala de producción. Al interior de las peletizadoras también conocidas como granuladoras, se encuentran matrices anulares o planas sobre la cual giran rodillos que compactan el material (figura 1).



Figura 1. Funcionamiento de una peletizadora de rodillos.

De acuerdo con Dec (2002) y Dec *et al.* (2003), en una prensa de rodillos las presiones de formación se encuentran en el rango de 100 – 200 MPa, y la velocidad de estos pueden alcanzar los 2.5 m s^{-1} . El diámetro de las matrices puede variar entre los 174 – 1250 mm, al interior de las cuales se forman los pellets por efecto de extrusión. En la parte inferior de las matrices se encuentra un dispositivo con cuchillas de corte para determinar el largo de los pellets (figura 2).

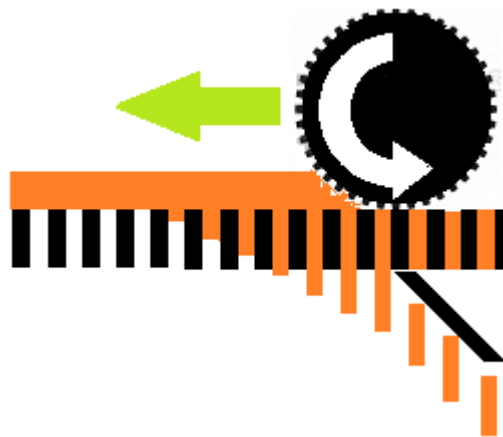


Figura 2. Esquema de la formación de pellets sobre una matriz plana

La forma y calibre de los orificios en las matrices, condicionan las características finales del material peletizado. Las dimensiones de los pellets se encuentran entre 7 y 20 mm de diámetro y de 15 a 40 mm de longitud. Las producciones de una pelletizadora pueden estar entre los 100 kg/h - 12 ton/h.

Los pellets una vez salen de la peletizadora son enfriados usando un equipo conformado por una cámara vertical con ventiladores donde los pellets caen por la aplicación de un flujo transversal de aire suave para evitar que se produzcan

fisuras. En esta etapa se consigue aumentar la dureza y resistencia del pellet, lo que permite evitar problemas en la manipulación durante las etapas posteriores. Igualmente, se realiza un tamizado con sistema de vibrado para separar el polvo que pudo haber escapado del proceso de peletizado, el cual es devuelto como materia prima al proceso de producción. Finalmente, los pellets son empacados en recipientes plásticos o en camiones granel para su comercialización a (Ortiz, 1994).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

4.1.1. Especie seleccionada

Para el presente estudio fue seleccionada la especie *Pinus patula* Schlecht et Cham, debido a su importancia en México como especie nativa, de rápido crecimiento, amplia distribución (natural y plantada), y usada a mediana escala para la industria del aserrío, lo que implica una alta producción de residuos durante su transformación. Esta especie se distribuye principalmente en los estados de Tamaulipas, Querétaro, Hidalgo, México, Morelos, Tlaxcala, Puebla, Veracruz, Oaxaca y Chiapas (Farjon *et al.*, 1997).

4.1.2. Equipos de asierre

La transformación primaria de las trozas se realizó en el Laboratorio de Plantas Piloto “Dr., Leonardo Sánchez Rojas” de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, en adelante DICIFO - UACH. El aserradero de sierra banda utilizado fue un tipo DT:MS:80:D, marca SCHIFFER serie 22:1973 de origen brasileño, con motor Siemens trifásico de 40 HP. Los

diámetros de los volantes son de 0.8 m y ancho de pista 0.08 m

Los equipos para dimensionar la madera en piezas comerciales se describen a continuación:

4.1.2.1. Sierra banda

Se utiliza para darle el grueso comercial a las tablas. La sierra banda utilizada en esta investigación tiene las características que se mencionan en el cuadro 3:

Cuadro 3. Especificaciones técnicas de la sierra banda

CARACTERISTICAS		
Tipo	S	
Calibre Birmingham	19 (3/64")	
Ancho máx de corte	0.003 m	
Ancho de la sierra	0.089 m	
Longitud	5.7 m	
Diámetro de diente	44°	
Diámetro de corte	30°	
Diámetro de limpieza	16°	
Profundidad de garganta	½ "	
Paso	1 ¼	

4.1.2.2. Desorilladora

Se utiliza para remover los cantos y darle el ancho comercial a las tablas. La desorilladora utilizada en esta investigación tiene las características que se mencionan en el cuadro 4.

Cuadro 4. Especificaciones técnicas de la desorilladora.

CARACTERISTICAS		
Marca	Trosa	
N° de sierras circulares	2 (fija y móvil)	
Paso del diente	3 1/8 "	
Profundidad de la garganta	1 3/16 "	
Ancho del diente	1 6/8 "	
Numero de dientes	14	
Tipo de diente	Postizo	
Motor	20 HP	

4.1.2.3. Cabeceadora.

Este equipo fue utilizado para cortar los extremos de la pieza y definir el largo comercial de las tablas, de tal manera que estén a escuadra y paralelos uno con otro. Las características de la cabeceadora se mencionan en el cuadro 5.

Cuadro 5. Especificaciones técnicas de la cabeceadora

CARACTERISTICAS		
Tipo	Péndulo oscilante hechizo	
Diámetro sierra	16 “	
Motor	7.5	
Poleas	1	
Bandas	3	
Ancho	0.94 m	
Alto	2.9 m	

4.1.3. Cámara de secado solar

Para el secado del aserrín se utilizó la cámara de secado solar ubicada en la DICIFO - UACH. Esta cámara consiste en una estructura de madera recubierta con polietileno de alto calibre, resistente a los rayos UV, tiene un área de 25 m², piso en concreto y dos ventiladores para la remoción de la humedad.

4.1.4. Tamices y agitador de tamices

Fueron utilizados tres tamices N° 20, 10 y 4, los cuales corresponden a la abertura de malla 0.84, 2.00 y 4.67 mm respectivamente. Para el tamizado del material, se colocaron los tamices con su correspondiente tapa y recipiente receptor en un agitador eléctrico experimental configurado a 400 rpm.

4.1.5. Molde unitario para pellets experimental

Se torneó un molde de acero de alta resistencia conformado por un cilindro con diámetro interno de 8 mm, diámetro externo de 500 mm y 100 mm de alto. Uno de sus extremos fue rebajado para el empalme del plato de compresión y el plato de extracción (figuras 3 y 4).

El embolo de empuje fue torneado con dos milésimas menos que el diámetro interno del cilindro y cabeza de 250 mm de diámetro en forma de embudo.

El plato de compresión se torneó con un rebaje de 100 mm para el empalme con el cilindro de formación, un orificio central de 3 mm de diámetro y un canal de 1 mm de profundidad para la remoción del aire con la ayuda de una bomba de vacío a través de una manguera para alta temperatura, la cual fue conectada de un lado del plato por medio de una espiga de $\frac{1}{2}$ de pulgada con rebaje a $\frac{1}{4}$ de pulgada.

El plato eyector fue torneado con el mismo rebaje del plato de compresión, pero con un orificio interno de 300 mm de altura y 130 mm de diámetro para la recepción del pellet y los troqueles de formación.

Los troqueles internos para la compresión del material fueron elaborados igualmente en acero de alta resistencia a dimensiones de 8 mm de diámetro y 5 mm de altura.



Figura 3. Molde unitario experimental para fabricación de pellets.

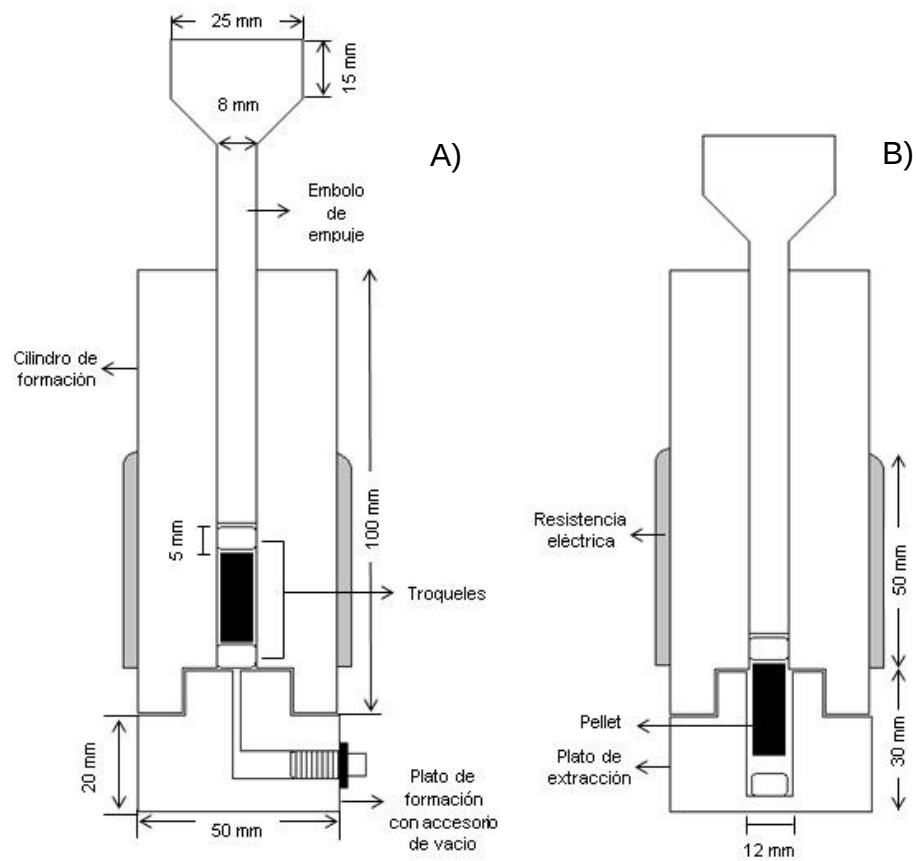


Figura 4. Esquema del molde unitario para la fabricación de pellets. A) Configuración para la fabricación del pellet. B) Configuración para la extracción del pellet.

4.1.6. Maquina universal

Para peletizar el aserrín se utilizó una maquina universal Instron modelo 3385H, ubicada en el Laboratorio de Pruebas Mecánicas de la DICIFO - UACH, con celda de carga de 250 kN configurada en modo de compresión. Esta se encuentra conectada un computador por medio de una interfaz, desde donde se establecen las variables del método a utilizar, y se controla el software BlueHill.

4.1.7. Calorímetro

Para determinar el poder calorífico superior (PCS) material peletizado, se utilizó un calorímetro isoperibólico Parr modelo 6200 ubicado en el Laboratorio de Anatomía de la Madera en la DICIFO - UACH. Dicho equipo, se encuentra conformado de una pantalla táctil conectada a un sistema automatizado para la configuración del proceso, un dispositivo para el calentamiento y suministro del agua Parr modelo 6510, un recinto adaptado con termocople, chaqueta eléctrica y agitador de agua para la recepción de una cubeta ovalada con la bomba de oxígeno.

4.1.8. Aparato experimental para la durabilidad

Para medir la durabilidad de los pellets se fabricó un aparato para ensayos tipo tambor de 30 cm de diámetro y 6 cm de alto con caras en policarbonato y marco en polietileno. El eje fue torneado en aluminio acoplándose en un

extremo a una chumacera y en el otro a un motor con control de revoluciones por minuto.

4.1.9. Instrumentos de medición

Para determinar el peso de los materiales (aserrín o Pellets), fue utilizada una balanza analítica Ohaus pioneer con precisión de 0.1 mg.

La temperatura interna del cilindro de formación, fue medida con un termómetro electrónico con precisión de 0.01 °C.

El contenido de humedad del material y los densificados fue medido con un medidor de humedad Mettler Toledo PH45 a 100 °C, integrado a una balanza analítica con precisión de 0.001 g.

4.1.10. Cristalería, reactivos y equipos de laboratorio

Para calcular el contenido de extractivos se utilizó: madera molida y cribada con malla # 40, cartuchos de celulosa, Soxhlet, matraces de fondo redondo de 500 ml, condensador tipo Ahlin, mantillo de ebullición, crisoles Gooch porosidad C, matraz Kitazato, bomba de vacío, horno, balanza analítica, etanol y tolueno.

Para obtener el contenido de lignina Klason se utilizó: madera sin extractivos, crisoles de porcelana, vasos de precipitado, barras de vidrio, campana de extracción, matraces de fondo redondo de 500 ml, ácido sulfúrico al 72%,

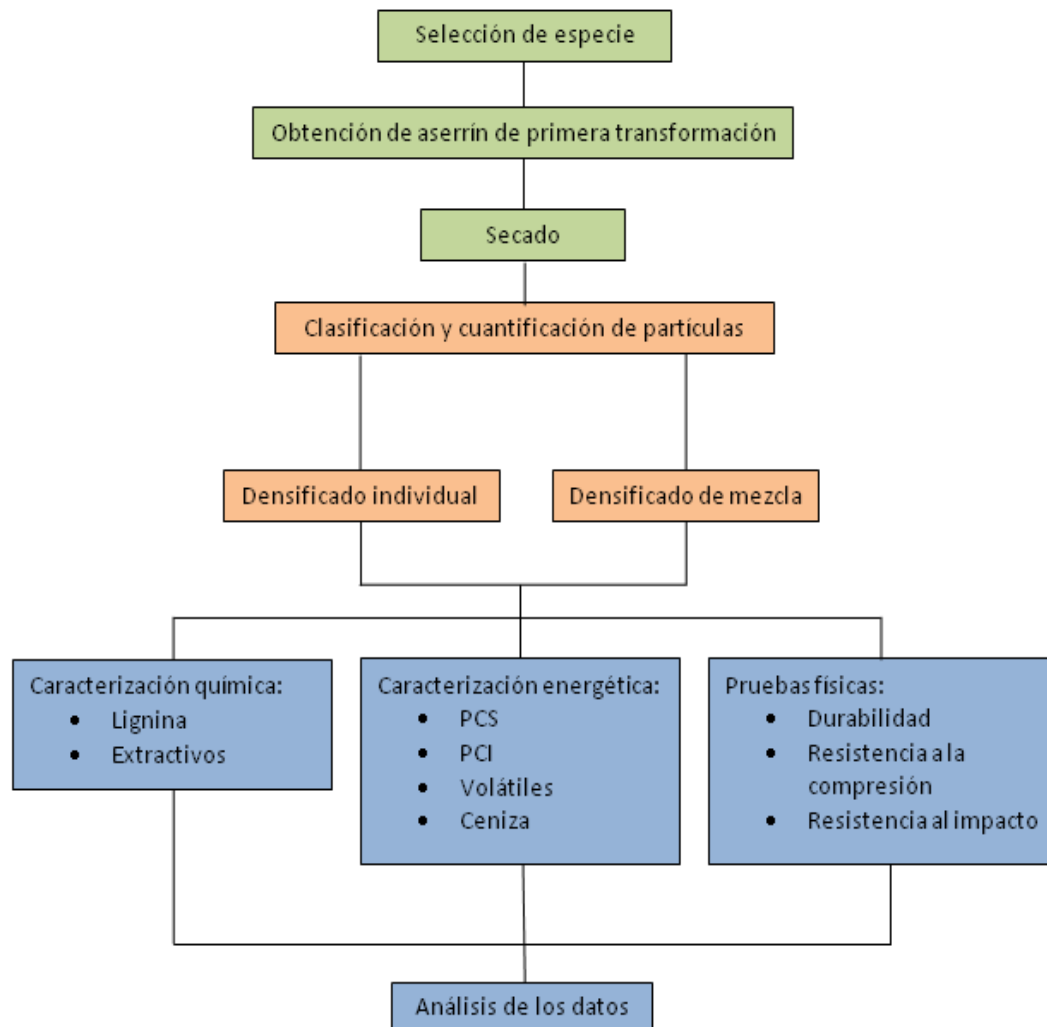
mantillos, condensador tipo Ahlin, crisoles Gooch porosidad M, matraz Kitazato, horno, balanza analítica y una bomba de vacío.

Para determinar contenido de cenizas se utilizó: madera molida sin extraer y cribada por malla # 40, crisoles de porcelana, balanza analítica, mufla y desecador.

4.2. Métodos

El esquema metodológico del presente trabajo de investigación estuvo estructurado como se detalla a continuación:

Figura 5. Esquema metodológico usado en la investigación



4.2.1 Preparación del material y fabricación de los pellets

4.2.1.1. Colecta y asierre de trozas

El procedimiento utilizado para obtener y transformar las trozas fue el siguiente:

- a) Se derribaron dos árboles de *P. patula* en el ejido Villa Cuauhtémoc en Chignahuapan, Puebla; los cuales tenían 18 años de edad y diámetro mayores a 25 cm, seccionándose ambos fustes en trozas de 1.5 m de longitud.
- b) Cada una de las trozas fue descortezada previo al aserrío con el propósito de eliminar este desperdicio del estudio.
- c) En cada una de las trozas se midió la longitud y el diámetro, tomando dos datos en diferentes partes de los trozas para obtener datos promedio de cada variable.
- d) Las trozas se aserraron en tablas de una pulgada de grueso en la sierra banda, realizando cortes paralelos con un solo volteo a la mitad de cada una de ellas.
- e) De acuerdo a las características dimensionales de la pieza, se definieron anchos de 4, 6, 8 y 10 pulgadas en la desorilladora.
- f) La última operación de escuadría consistió en definir el largo de las tablas usando la cabeceadora de péndulo a longitudes de 1.4 m.

4.2.1.2. Medición de residuos

- a) Durante las tres etapas de asierre, se recolectó el aserrín derivado de cada corte en bolsas de polietileno cuidando de que no se mezclaran con otro tipo de residuos (figura 6).
- b) El material fue pesado en una balanza de forma independiente y se comparó con tablas a escuadría de igual peso para obtener un volumen aproximado de cada tipo de residuo.
- c) Con el volumen previamente conocido de las trozas sin corteza, el volumen total de tablas y el volumen de residuos para cada uno de los equipos de asierre, se calculó un coeficiente de aserrío (1), y a la vez los porcentajes aserrín, costaneras y recortes generados durante el proceso de asierre.



Figura 6. Separación de residuos

$$\text{Coeficiente de Aserrío} \equiv \frac{\text{Volumen aserrado}}{\text{volumen de materia prima}} \times 100 \quad (1)$$

Una vez que los aserrines fueron medidos en cada etapa de asierre, se esparcieron en una capa de 3 mm de espesor, sobre plástico en el piso de la cámara de secado solar. Posteriormente, se hicieron mediciones diarias del contenido de humedad hasta que el material alcanzó valores por debajo de 15%, contenido óptimo para el peletizado.

4.2.1.3. Clasificación de aserrines

- a) Los aserrines fueron tamizados conjuntamente en un juego de 8 mallas entre los 4.67 y 0.41 mm de abertura.
- b) De los tamices mencionados, los tamaños de malla 4.67, 2.00 y 0.84 mm fueron seleccionados teniendo en cuenta la cobertura de todos los tamaños de partícula del material y que se diferenciaron notablemente el uno del otro a simple vista.
- c) El material fue tamizado en un agitador eléctrico durante 3 minutos a 400 rpm. Posteriormente, se obtuvo la relación porcentual entre cada tamaño de partícula con respecto al total de aserrín a partir de su peso obtenido en balanza analítica con precisión 0.001 g (figura 7).

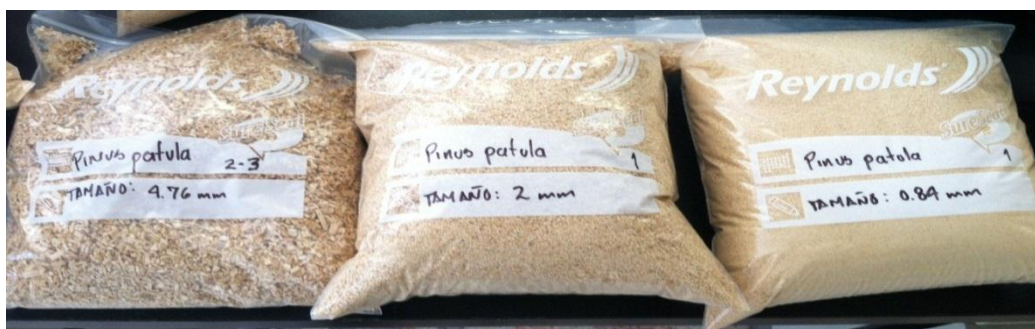


Figura 7. Clasificación de aserrines por tamaños de partícula

4.2.1.4. Control del contenido de humedad

Dada las características de formación de pellets en laboratorio en lo que se refiere a tiempo, fue necesario subir el contenido de humedad del material para evitar que estos no salieran tan frágiles al final del proceso de densificado por deshidratación. Para esto, el material fue ubicado en bandejas de aluminio dentro de un desecador, sobre agua destilada con el fin de saturar al 100% de humedad el ambiente interno y por consiguiente aumentar de forma homogénea el contenido de humedad en el aserrín. Se realizaron dos mediciones diarias hasta alcanzar el valor deseado.

Una vez obtenido el contenido de humedad requerido, los aserrines fueron depositados en doble bolsa de cierre hermético para evitar la pérdida o ganancia de humedad, así como etiquetados con el tamaño de partícula

4.2.1.5. Tratamientos y densificado de aserrines

Con base en la clasificación planteada para los tamaños de partículas y las presiones seleccionadas para el densificado, los tratamientos estudiados se describen en el cuadro 6.

Cuadro 6. Presiones de formación y tamaños de partícula utilizados en la elaboración de pellets de aserrín

Presión (MPa)	Malla	Rango de partícula (mm)	Tratamiento (presión/partícula)
147	20	≤ 0.84	PB/fina
147	10	0.84 - 2.00	PB/media
147	4	2.00 - 4.76	PB/gruesa
147	-	Mezcla*	PB/mezcla
196	20	≤ 0.84	PM/fina
196	10	0.84 - 2.00	PM/media
196	4	2.00 - 4.76	PM/gruesa
196	-	Mezcla	PM/mezcla
245	20	≤ 0.84	PA/fina
245	10	0.84 - 2.00	PA/media
245	4	2.00 - 4.76	PA/gruesa
245	-	Mezcla	PA/mezcla

*Mezcla = 66% (≤ 0.84) + 27% (0.84-2.00) + 7% (2.00-4.76).

PB = presión baja; PM = presión media; PA = presión alta.

Las partículas de mayor tamaño (> 4.76 mm), las cuales representaron el 1.3% del aserrín generado en el proceso de asierre, no fueron tomadas en cuenta para este estudio debido a que no se consideraron aptas para la producción de pellets. La mezcla corresponde a la misma proporción de los tres tamaños de partículas encontradas después de realizar en tamizado del material

El procedimiento para la elaboración de pellets se describe a continuación:

- a) El molde para la formación de pellets se conectó a un control de temperatura modelo CAT, 12110-06, por medio de una resistencia eléctrica de 250 watts en forma de abrazadera y una termocople tipo J hasta elevar la temperatura a 115°C , con el fin de lograr la plastificación de la lignina y aprovecharla como aglomerante. Simultáneamente la

temperatura interna fue medida con el termómetro eléctrico para observar su tiempo de igualación con la temperatura exterior (figura 8).



Figura 8. Control de temperatura con termocople tipo J

- b) El plato de compresión fue conectado a la bomba de vacío y puesto debajo del cilindro de formación asegurándose siempre de insertar el troquel inferior.
- c) Una vez alcanzada la temperatura, se pesó para cada tamaño de partícula 1.0 g de material con ayuda una balanza analítica con precisión de 0.01 g. Enseguida, el aserrín se vertió en el molde para pellets, utilizando una hoja de papel en forma de cono, y una varilla de acero para empujar el material (figura 9).



Figura 9. Suministro de aserrín dentro del cilindro de formación

- d) Se puso el troquel superior dentro del cilindro, y el embolo de empuje en posición vertical.
- e) La máquina universal fue configurada para ejercer tres cargas de presión (147, 196 y 245 MPa), a una velocidad de compresión de 60 mm/min. Se le programó la máquina para que, una vez alcanzara el valor de presión requerido, mantuviera la carga hasta que se le ordenara regresar.
- f) Con la maquina balanceada y restablecida la distancia inicial, se comprimió el material aplicando vacío al molde con una bomba marca BUCHI modelo V-500 por 10 segundos cuando la pendiente de la gráfica en el monitor mostraba un aumento de presión. Luego que la maquina alcanzo presión requerida, esta se mantuvo por 45 segundos para disminuir la recuperación elástica del aserrín y posteriormente se regresó la celda de carga a su posición inicial (figura 10).



Figura 10. Compresión del aserrín

- g) Se retiró la presión y se cambió el plato de compresión por el plato de eyección utilizando guantes de asbesto. La extracción del pellet ya formado, se llevó a cabo con la misma carga de compresión y la misma velocidad de formación hasta que el pellet fue depositado en el fondo del plato, momento en que se retiró la carga y se recuperó el producto.

4.2.2. Caracterización física de los pellets

4.2.2.1. Densidad normal de los pellets y la madera

De acuerdo a la norma ASTM D 4531-86, la densidad normal en cada uno de sus tratamientos con un CH promedio de 7.5, fue determinado de la siguiente manera:

- a) A cada uno de los pellets se les midió la masa (b.h) en balanza analítica con precisión de 0.1 mg (*M*).

- b) Los pellets (b.h), fueron sumergidos en parafina derretida a una temperatura entre 60 y 70 °C hasta que la superficie fue cubierta totalmente removiendo cualquier exceso de parafina.
- c) Luego de que los pellets recubiertos de parafina se secaron, se obtuvo la masa de cada uno de ellos nuevamente en balanza analítica (M_{cp}).
- d) Cada uno de los pellets fue sumergido en una probeta de 10 ml registrando en desplazamiento de agua (V_{cp}).

La densidad normal de los pellets corregido por la presencia de parafina fue obtenida utilizando las ecuaciones (ecuaciones 2, 3, 4, y 5).

$$\text{Masa de la parafina} = M_p = (M_{cp} - M) \quad (2)$$

$$\text{Volumen de la parafina} = V_p = \left(\frac{M_p}{\rho_p} \right) \quad (3)$$

Dónde:

M_{cp} : masa del pellet cubierto con parafina (g).

ρ_p : Densidad de la parafina (0.87 g cm^{-3}).

M : Masa del pellet (g).

$$\text{Volumen del pellet} = V = (V_{cp} - V_p) \quad (4)$$

$$\text{Densidad normal} = \rho = \left(\frac{M}{V} \right) \quad (5)$$

Dónde;

V_{cp} : Volumen del pellet cubierto con parafina (cm^3).

La densidad normal de la madera fue medida usando cubos de 2.0 x 2.0 x 2.0 cm a un CH de 10.6%, para un total de 10 repeticiones.

4.2.2.2. Densidad a granel de los pellets y el aserrín.

Se utilizó un vaso de precipitado de 50 cm^3 previamente tarado y se llenó de pellets hasta el bordo sin que ninguno de estos sobresaliera ejerciendo presión sobre ellos y movimientos de agitación para que se acomodaran mejor. Posteriormente, el vaso con los pellets se pesó de nuevo y por diferencia de pesos se obtuvo la masa total de los pellets. El contenido de humedad de los pellets fue en promedio del 7.6%.

Este procedimiento fue repetido en cuatro ocasiones para cada uno de los tratamientos. Al final, la relación entre la masa total de los pellets y el volumen del vaso permitió obtener la densidad a granel de cada uno de los tratamientos (ecuación 8).

$$Dg = \frac{M_p}{V_v} \times 100 \quad (6)$$

Dónde:

Dg : Densidad a granel (%).

M_p : Masa de los Pellets dentro del vaso de precipitado (g).

V_v : Volumen del vaso ocupado por lo pellets (cm^3)

Este mismo procedimiento fue utilizado para obtener la densidad a granel del aserrín en las mismas condiciones como se recolectó del aserradero. El contenido de humedad del material al momento de la prueba fue de 12.75%.

4.2.2.3. Durabilidad de los pellets

Utilizando la norma española UNE-EN15210-1:2010 para la determinación de la durabilidad mecánica de pellets a los golpes, se cribaron 10 densificados por cada tratamiento en un tamiz de 3.15 mm, luego se pesaron en balanza con precisión de 0.01g y se hicieron girar dentro un aparato experimental, ocasionando la colisión entre ellos a una velocidad de 50 rpm durante 10 min. Al final del ensayo, los pellets resultantes se cribaron y pesaron nuevamente. El resultado de la durabilidad de los pellets se obtuvo con la ecuación (7).

$$Du = \frac{Ma}{Me} \times 100 \quad (7)$$

Dónde:

Du: Durabilidad mecánica de los pellets (%).

Ma: Masa de los pellets pre-cribados antes del tratamiento de volteo (g).

Me: Masa de los pellets cribados después del tratamiento de volteo (g).

4.2.2.4. Resistencia a la compresión de los pellets

Para esta prueba fue utilizada una máquina universal Instron 3385H configurada en modo compresión a una velocidad de 2 mm/s. Cada uno de los

pellets fue centrado entre dos platos compresores y se registró numérica y gráficamente la carga máxima que soportó cada pieza. Este procedimiento fue repetido en seis pellets por cada uno de los tratamientos.

4.2.2.5. Resistencia al impacto de los pellets

La resistencia al impacto fue medida en 10 pellets por cada uno de los tratamientos, los cuales se dejaron caer a una altura de 1.85 m en dos ocasiones (Li and Liu, 2000). De cada ensayo, se contaron el número de pellets (quebrados o enteros) y se relacionaron con el número de pellets del inicio (ecuación 8), según el método propuesto por Camps y Marcos (2008). Esta prueba tuvo tres repeticiones por cada uno de los tratamientos.

$$RI = \frac{NI}{NF} \quad (8)$$

Dónde:

Rg: Resistencia al impacto (índice). Resultados igual a uno significa que no hubo ruptura de pellets.

NI: Número de pellets al principio del ensayo.

NF: Número de pellets al final del ensayo.

4.2.3. Caracterización química y energética de los pellets

4.2.3.1. Contenido de volátiles y carbono fijo

De acuerdo a la norma ASTM D 1762-84 (2007), el procedimiento para determinar el contenido de volátiles fue el siguiente:

- a) Se secaron aproximadamente 350 g de pellets a 105 °C en estufa por 6 horas y se enfriaron en desecador por una hora. Por otro lado, se enjuagaron con ácido clorhídrico los crisoles, se secaron a una temperatura de 750 °C por 10 minutos en una mufla y se enfriaron en desecador durante una hora.
- b) Luego de transcurrido el tiempo de enfriamiento, tanto crisoles como muestras de aproximadamente 3 gramos fueron pesadas en balanza analítica con precisión de 0.1 mg.
- c) Se calentó la mufla a 950 °C y se pusieron las muestras dentro de los crisoles tapados durante 2 minutos en la puerta, 3 minutos en la orilla con la puerta abierta y 6 minutos al interior de la mufla con la puerta cerrada. Después de transcurrido este tiempo, los crisoles fueron enfriados en un desecador sobre silica gel por una hora.
- d) Finalmente, los crisoles con la muestra se pesaron nuevamente en balanza analítica con precisión de 0.1 mg. El contenido de volátiles y carbono fijo se calcularon con las ecuaciones (9) y (10).

$$\text{Contenido de volátiles (\%)} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (9)$$

Dónde:

A: masa de los pellets después de secados a 105 °C (g).

B: masa de los pellets después de secados a 950 °C (g).

$$\text{Carbono fijo (\%)} = 100 - (\text{volátiles} + \text{cenizas}) \quad (10)$$

4.2.3.2. Contenido de extractivos

La extracción del material se realizó siguiendo el procedimiento contenido en la norma ASTM D 1105-96 (2007) como se describe a continuación:

- a) Una parte del aserrín proveniente de la transformación primaria de la trozas se cribó pasándolo por un tamiz # 40 (425 µm), hasta obtener una cantidad mayor a 8 g. De dicho material se tomaron 2 muestras de 1 g cada una para determinar el contenido de humedad.
- b) La primera parte del procedimiento consistió en retirar los extractivos de la madera con etanol-tolueno, para lo cual se pusieron 3 muestras del material con una masa de 2 g cada una en cartuchos de celulosa. Los cartuchos fueron colocados en un aparato de extracción Soxhlet sentados sobre matraces de fondo redondo de 500 ml de capacidad en cuyo interior se colocaron 150 ml de la mezcla etanol-tolueno en proporción (2:1 v/v). La extracción se realizó durante 6 h, manteniendo

dicha mezcla en ebullición fuerte con la ayuda de los matillos. Para que la ebullición se hiciera con reflujo se colocó un condensador tipo Ahlin en la boca del Soxhlet. El refrigerante estaba conectado a un recirculador.

- c) La segunda parte del proceso consistió en cambiar los matraces de fondo redondo por otros que contenían 150 ml de etanol al 100%, dejándolos igualmente en ebullición con reflujo por 4 h. Posteriormente, se sacaron los cartuchos del Soxhlet y se secaron en un horno a 50 °C por 4 h.
- d) La tercera parte de la extracción consistió en pasar el contenido de cada cartucho a crisoles de porcelana, y posteriormente a matraces de fondo redondo, adicionándoles 300 ml de agua destilada (150 ml/g), a cada uno de ellos. Los matraces fueron puestos nuevamente en los mantillos con ebullición suave a reflujo durante 3 h.
- e) Al final de la extracción, el material fue colado en crisoles Gooch previamente tarados porosidad C de 30 ml con la ayuda de una bomba de vacío, cuidando de lavar la totalidad de las muestras de los matraces con agua destilada. Posteriormente los crisoles con las muestras fueron secados en horno a 105 °C por 12 h.
- f) El contenido de extractivos totales de las tres repeticiones se calculó en relación al peso seco de la muestra inicial corregido por humedad (ecuación 11), determinando su correspondiente valor porcentual. De esta forma, el material quedó listo para determinar su contenido de lignina.

$$CET = \frac{P_{sm} - (P_{scm} - P_{sc})}{P_{sm}} \times 100 \quad (11)$$

Dónde:

CET: Contenido de extractivos totales (%).

P_{sm}: Peso seco de la muestra sin extraer corregido por humedad (g).

P_{scm}: Peso seco del crisol Gooch con la muestra extraída (g).

P_{sc}: Peso seco del crisol Gooch (g).

4.2.3.3. Contenido de lignina

Usando la norma ASTM D 1106-84 (2007), el procedimiento realizado fue el siguiente:

- a) Se tomaron 900 mg de madera sin extractivos acondicionada al ambiente del laboratorio repartidas en tres vasos de precipitado con capacidad de 50 ml en los cuales se depositaron 300 mg de muestra a cada uno. En seguida, se adicionaron 4.5 ml de ácido sulfúrico al 72% a cada uno de los vasos usando para esto micro-pipetas con punta desechable, es decir, se agregaron 1.5 ml del ácido por cada 100 mg de muestra. El contenido de los vasos fue mezclado con una varilla de vidrio hasta que la madera se disolvió y se dejaron en la campana de extracción a 20°C (temperatura ambiente en el laboratorio), por dos horas mezclando cada 20 minutos.

- b) Al final de la hidrólisis primaria, se lavó con 169 ml de agua destilada todo el contenido de cada vaso a matraces de fondo redondo de 250 ml, rebajando la concentración de la solución del ácido sulfúrico al 3%.
- c) Los matraces fueron puestos en mantillos con un condensador tipo Ahlin en la boca del matraz y ebullición vigorosa con reflujo durante 4 h.
- d) Al final de la hidrólisis secundaria, se coló el material de cada matraz en crisoles Gooch porosidad M (media), secos y previamente tarados, los cuales se colocaron sobre un matraz Kitazato y conectados a la bomba de vacío. Los matraces fueron lavados con 100 ml de agua destilada caliente para transferir la totalidad del material a los crisoles.
- e) Los crisoles con las muestras fueron secados en horno a 103 °C durante 6 h. El contenido de lignina se determinó en relación al peso inicial de la muestra en porcentaje (%), (ecuación 12).

$$LK = \frac{P_{scl} - P_{sc}}{P_{me}} \times 100 \quad (12)$$

Dónde;

LK: Contenido de lignina Klason (%).

P_{scl}: Peso seco del crisol con lignina (g).

P_{sc}: Peso seco del crisol (g).

P_{me}: Peso inicial de la madera extraída corregida por humedad (g).

4.2.3.4. Contenido de cenizas

Siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D 1102 – 84:2007, las etapas para la medición del contenido de cenizas fueron las siguientes

- a) La mufla se calentó a 575 °C y se introdujeron durante 15 minutos tres crisoles de porcelana de 50 ml previamente enjuagados con ácido clorhídrico diluido.
- b) Después del tiempo mencionado, se sacaron de la mufla y se ubicaron sobre la tapa 10 minutos para bajar la temperatura y evitar su ruptura.
- c) Se ubicaron posteriormente dentro del desecador por 20 minutos y después se obtuvo el peso seco en balanza analítica con precisión de 0.1 mg.
- d) Se pesaron tres muestras de 2 g cada una en los crisoles tarados y simultáneamente se midió el contenido de humedad del material en el analizador de humedad.
- e) Los crisoles sin tapa fueron ubicados a la entrada de la mufla con el uso de guantes de asbesto, pinzas y gafas de seguridad, observando que la madera hiciera combustión y esperando hasta que dejara de arder y no se evidenciaran puntos negros.
- f) Posteriormente, los crisoles fueron ubicados en el centro de la mufla dejándolos a puerta cerrada por 8 h.
- g) Transcurrido dicho tiempo, se apagó la mufla y se abrió la tapa sobre la cual se pusieron los crisoles durante 10 min para bajar la temperatura. A

continuación los crisoles fueron puestos en el desecador cada uno con tapa y se dejaron enfriar por 30 min.

- h) Finalmente, los crisoles sin tapa fueron pesados en balanza analítica, se anotó el color de la ceniza y se calculó su porcentaje (%) con relación al peso seco de la muestra inicial (ecuación 13).

$$CC = \frac{P_{sc} - P_{sc}}{P_{sm}} \times 100 \quad (13)$$

Dónde:

CC: Contenido de cenizas (%).

P_{sc} : Peso seco del crisol más la ceniza (g).

P_{sc} : Peso seco del crisol (g).

P_{sm} : Peso seco de la muestra inicial corregido por humedad (g).

4.2.3.5. Contenido de humedad en pellets

De acuerdo a la norma ASTM D4442-07 (2007) y una vez transcurridas 2 semanas durante las cuales se acondicionaron los pellets en bolsas de polietileno, el procedimiento para obtener el contenido de humedad en los pellets fue el siguiente.

- a) Se lavaron crisoles de porcelana de 30 ml con ácido clorhídrico, se secaron en estufa a 105 °C por una hora y se acondicionaron en desecador por 30 min.

- b) La masa de los crisoles fue medida en balanza analítica con precisión de 0.1 mg registrando sus valores.
- c) Se acondicionaron cuatro pellets por cada uno de los tratamientos en un desecador y posteriormente se midió la masa de cada uno de ellos en una balanza analítica dentro de los crisoles previamente tarados.
- d) Los crisoles con los pellets se secaron en estufa a 105 °C por 24 horas.
- e) Luego de transcurrida las 24 horas, los crisoles con las muestras se enfriaron en desecador por 1 hora y posteriormente se registró nuevamente la masa de cada uno de ellos.

El contenido de humedad de los pellets fue calculado con la ecuación (14).

$$C.H = \frac{(M_{cph} - M_c) - (M_{cps} - M_c)}{(M_{cps} - M_c)} \times 100 \quad (14)$$

Dónde:

C. H: Contenido de humedad (%).

Mcph: Masa del crisol y el pellet húmedo (g).

Mc; Masa del crisol (g).

Mcps: Masa del crisol y la muestra secos (g).

4.2.3.6. Poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI)

Para cada corrida en el calorímetro se utilizaron pellets cuya masa fue medida con anterioridad utilizando una balanza analítica, teniendo en cuenta que cada

uno de ellos tuvieran una masa mayor o igual a 1.00 g requerido por el calorímetro.

El procedimiento para obtener el poder calorífico de los pellets fue el siguiente:

- a) Cada uno de los pellets fue puesto en una capsula haciendo contacto con el alambre de ignición de 10 cm de longitud dentro de la bomba, la cual fue cerrada para posteriormente ser inyectada de oxígeno a una presión de 35 Bar.
- b) Simultáneamente, la cubeta del calorímetro fue llenada con exactamente 2000 ml de agua a 25 °C y puesta dentro del calorímetro.
- c) La bomba fue sumergida dentro de la cubeta y conectada a dos electrodos encargados de transmitir la carga eléctrica e iniciar la ignición a una temperatura de 1100 °C. Al momento de iniciar cada una de las corridas, se registraron el nombre del tratamiento y el peso de la muestra. Luego de terminado el proceso por el calorímetro, este arrojó el poder calorífico superior (PCS), expresado en contenido energético por gramo de muestra.

Este mismo procedimiento fue realizado para cada uno de los tratamientos con 4 repeticiones.

El poder calorífico inferior (PCI), fue calculado utilizando la ecuación propuesta por Obernberger y Thek (2004) (ecuación 15), asumiendo un contenido de hidrógeno promedio para pinos del 5.7%%, reportado Fengel y Wegener (1984).

$$PCI = PCS \left(1 - \frac{C.H}{100} \right) - 2.447 \times \frac{C.H}{100} - \frac{H}{200} \times 18.02 \times 2.447 \left(1 - \frac{C.H}{100} \right) \quad (15)$$

Dónde:

PCI: Poder calorífico inferior (MJ kg⁻¹).

PCS: Poder calorífico superior corregido por el contenido de cenizas (MJ kg⁻¹).

C.H: Contenido de humedad promedio de los tratamientos (% b.s.).

H: Contenido de hidrógeno (% b.s.).

4.2.3.7. Densidad energética (DE)

Para el cálculo de la densidad energética (DE), se obtuvo utilizando la ecuación (16):

$$DE = PCS \times D = \frac{MJ}{kg} \times \frac{kg}{m^3} = \frac{MJ}{m^3} \quad (16)$$

Dónde:

DE: Densidad energética (MJ/m³).

PCS: poder calorífico superior (MJ/kg).

D: Densidad normal (kg m³).

4.2.3.8. Índice del Valor del Combustible (IVC)

El Índice de Valor del Combustible (ecuación 19), posiciona a los combustibles de acuerdo a las tres características más importantes que definen la aptitud de

combustibles maderables: poder calorífico superior, densidad y contenido de cenizas (Purohit y Nautiyal, 1987).

$$IVC = \frac{PCS \times D}{CC \times CH} \quad (17)$$

Dónde:

IVC: Índice de Valor del Combustible.

PCS: poder calorífico superior (MJ kg^{-1}).

D: Densidad normal (g g^{-1}).

CC: Contenido de cenizas (g g^{-1}).

CH: Contenido de humedad (g g^{-1}).

Por lo tanto, un alto poder calorífico, alta densidad, bajo contenido de cenizas y bajo contenido de humedad son considerados como propiedades de combustibles con buena aptitud energética.

4.2.4. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados de forma univariada obteniendo para cada variable estudiada un análisis de varianza (ANDEVA), a través del software estadístico Statistical Analysis System (SAS). El diseño experimental utilizando fue un factorial asimétrico, donde los factores estudiados fueron la presión y el tamaño de partícula. En el caso de la presión, se estudiaron tres niveles (147, 196 y 245 MPa), mientras que el tamaño de partícula fueron cuatro niveles: finas (≤ 0.84) mm, media (≤ 2.00 mm), gruesas (≤ 4.76 mm) y una mezcla. La mezcla estuvo

conformada la combinación de todos los tamaños de partícula, es decir, 66% (≤ 0.84 mm) + 27% (≤ 2.00 mm) + 7% (≤ 4.76 mm).

Las variables respuestas analizadas fueron: densidad normal, poder calorífico, densidad energética, densidad a granel, contenido de humedad, durabilidad, resistencia a la compresión, índice de valor del combustible y resistencia al impacto.

El modelo del diseño factorial se define de la siguiente manera:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (18)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, a \quad j = 0, 1, 2, \dots, b \quad k = 1, 2, 3, \dots, r$$

Dónde:

y_{ijk} : representa la observación correspondiente al nivel (i) del factor A y al nivel (j) del factor B en la repetición k.

μ : Media general.

τ : Efecto del factor presión.

β : Efecto del factor tamaño de partícula.

$(\tau\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción del factor presión y el factor tamaño de partícula.

ε_{ijk} : Error aleatorio $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$

Para determinar si existían diferencias significativas entre los tratamientos, se utilizó la comparación de Tukey (diferencia significativa honesta, DSH), donde la estadística de prueba está definida por (19).

$$DSH = q_{\alpha; t, \eta} \sqrt{\frac{CME}{2} \left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_{i'}} \right)} \quad (19)$$

Dónde:

DHS: Diferencia significativa honesta.

q_{α} : Valor de tablas (rango estudentizado), con un nivel de significancia α

t : Número de tratamientos.

η : grados de libertad del error.

CME: Cuadrado medio del error.

r : repeticiones del tratamiento i

r' : repeticiones del tratamiento i' .

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Medición de residuos de la transformación primaria

El volumen de residuos de corte y piezas dimensionadas obtenidos en el asierre de las trozas de *P. patula* se muestran en el cuadro 7.

Cuadro 7. Residuos y madera aserrada obtenidos en el aserrío de 4 trozas de *Pinus patula*.

Residuos de corte		Volumen (%)
Costeras		8.57
Tiras desorilladora		19.35
Aserrín		
	Sierra banda	12.99
	Desorilladora	3.12
	Cabeceadora	0.65
Recortes cabeceadora		1.17
Residuos no cuantificados		0.39
Rendimiento promedio aserradero (%)		53.77

Los resultados obtenidos muestran una alta proporción de residuos grandes, representados por corteza, costeras y recortes, los cuales en conjunto sumaron el 29% de la madera en trozas. Por el lado de los residuos finos, en los que se incluye el aserrín generado en los tres equipos de asierre, sumaron en total 16.76%, siendo este subproducto la materia prima para el presente estudio. Este resultado concuerda con Zavala (1996), quien estimó una proporción de

aserrín entre el 12.96 y 21.98% del asierre de trozas de pino en dos aserraderos representativos de México.

El coeficiente de aserrío fue estimado en 53.77 %, valor cercano al reportado por Zavala y Hernández (2000), el cual fue del 51% en un aserradero con características similares y utilizando igualmente madera comercial de *Pino* sp.

5.2. Clasificación de aserrines

Después de secar el aserrín a un contenido de humedad cercano al 12%, y de acuerdo a la clasificación de tamaño de partículas propuesta en este estudio, las cantidades obtenidas se presentan en el cuadro 8.

Cuadro 8. Distribución de partículas obtenidas en el tamizado del aserrín

Origen del aserrín	Tamaño de malla	Rango de tamaño	Porcentaje
	(mm)	(mm)	(%)
Cierra banda, desorilladora y cabeceadora	≤ 0.84	≤ 0.84	65.43
	≤ 2.00	$> 0.84 \leq 2.00$	26.27
	≤ 4.76	$> 2.00 \leq 4.76$	6.96
	> 4.76	> 4.76	1.34

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa una mayor proporción de partículas pequeñas y medianas (≤ 0.84 y ≤ 2.00 mm), frente a un bajo porcentaje de partículas grandes (≤ 4.76 y > 4.76 mm). Esto debido a que la mayor cantidad de aserrín durante el proceso de asierre proviene de la sierra

banda, cuyas características de forma y corte generan partículas de menor tamaño; en una superficie mucho mayor que durante el canteo o cabeceo de las piezas de madera.

5.3. Elaboración de pellets en laboratorio

Debido a las características de formación propias de un procedimiento experimental, fue necesario encontrar un contenido de humedad y una temperatura de formación apropiados para obtener pellets con características físicas apropiadas. Para ello, se probaron contenidos de humedad entre 11 y 20%, así como temperaturas a partir de 80 hasta 150 °C, encontrando los pellets con mejores características cuando se combinó un 15% de humedad en el aserrín y 115 °C al interior de la prensa. En total se elaboraron 960 pellets de 8 mm de diámetro y 20 mm de longitud (figura 11).



A)



B)

Figura 11. Pellets elaborados en molde experimental. A) Mezcla de partículas. B) Partículas de tamaño ≤ 0.84 mm.

5.4. Evaluación físico química de los pellets

El análisis previo de los principales componentes químicos de la madera, permite tener una primera aproximación a las características que tendrá el producto densificado desde el punto de vista de su comportamiento durante el proceso de formación y combustión.

En relación a los resultados del estudio químico (cuadro 9), la madera de *P. patula* posee un alto contenido de lignina, cercano al extremo superior reportado por Rowell *et al.* (2005), para otras especies de pinos (25-30%), y al valor reportado por Berrocal *et al.* (2004) para *Pinus radiata* a la edad de 16 – 20 años (29,4%). Igualmente, el contenido de extractivos fue superior al rango reportado por Berrocal *et al.* (2004), para *Pinus radiata* a diferentes edades (1.74 – 4.65%).

Cuadro 9. Composición química del aserrín de *P. patula*.

Extractivos totales	Contenido de Cenizas	Contenido de lignina Klason	Contenido de volátiles	Contenido de carbono fijo
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
4.65	0.5	31.0	80.15	19.35

Lo anterior permite deducir que el material tiene aptitud para uso energético en combustión directa, pues de acuerdo con Padilla *et al.* (2000), el poder calorífico de un material es más alto cuanto mayor es la cantidad de lignina y extractivos lipofílicos (gomas, resinas, ceras, grasas y aceites). Esto debido a que tanto la lignina como los extractivos lipofílicos contienen menos oxígeno que los polisacáridos presentes en la holocelulosa (celulosa y hemicelulosa).

Desde el aspecto relacionado a la formación de los pellets, un contenido alto de lignina como el determinado en este trabajo, significa un valor intrínseco de la materia prima, ya que cuando la lignina se funde, exhibe propiedades aglomerantes (Thomas *et al.*, 1998; Kaliyan y Morey, 2009). Esto tiene una ventaja económica ya que se reduce los gastos en aditivos aglomerantes durante la formación de pellets.

El contenido de cenizas encontrado, concuerdan con el rango reportado por Obernberger y Thek (2004), para maderas suaves (0.4 – 0.8%), y cumple con el requisito de la norma para pellets EN 14961-2 en la calidad más alta ($\leq 0.7\%$). Esto significa que el riesgo de que ocasione problemas de obstrucción en los equipos de combustión es mucho más bajo.

El contenido de volátiles determinado para los pellets es coherente con el rango mencionado por Ragland *et al.* (1991), quien indica que dependiendo de la especie, los volátiles pueden variar entre un 70 a 90%. Así mismo, coincide con el rango reportado por Sjaak y Koppejan (2002), para combustibles hechos con biomasa (76 – 86%). Un alto contenido de volátiles favorece la combustión a temperaturas más bajas, pues permite un encendido más rápido, aunque conlleva una producción de humo más alta. Finalmente, el carbón fijo que queda como resultado de la liberación de la materia volátil y descontando la ceniza, tuvo un porcentaje bajo (19%), valor inferior al reportado por Stelte *et al.* (2013), para pellets de madera (20-25%). Los que indica que los pellets al momento de la combustión tienen una alta pérdida de energía, pues tanto el

contenido de volátiles como el contenido de carbono fijo, son las dos formas en que se encuentra guardada la energía química de la biomasa.

5.5. Análisis estadístico

5.5.1. Densidad normal

En relación con el análisis de varianza (ANDEVA 1) (anexo 1), tanto la presión como el tamaño de partícula tuvieron de forma independiente un efecto significativo en la densidad ($p < 0.0001$ en ambos factores). Sin embargo, la densidad no fue modificada por la interacción presión * tamaño de partícula ($p = 0.100$). Esto indica que el incremento en densidad a presiones más altas, es similar independientemente del tamaño de partícula que se use para fabricar los pellets.

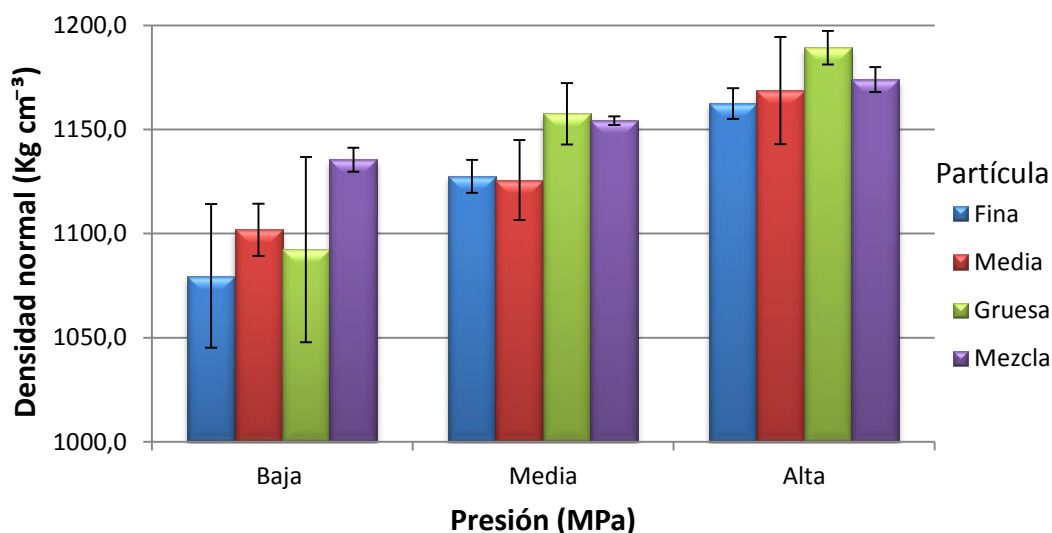


Figura 12. Densidad normal en pellets de aserrín obtenida a diferentes niveles de presión y tamaño de partícula.

En la figura 12, se observa que la densidad normal aumentó a medida que se incrementaron la presión y el tamaño de partícula. El tamaño de partícula fino, tuvo en general densidades más bajas con respecto a la densidad de los tamaños medio, grueso y la mezcla. Esto se explica probablemente a que luego de la densificación, los pellets con tamaño de partícula fino, mostraron mayor recuperación elástica, es decir, la longitud de los pellets aumentó luego que se retirara la carga. Este fenómeno fue observado por Carone *et al.* (2011), quien menciona que tanto el largo como el diámetro aumentan una vez que los pellets salen de la prensa.

Tanto el tamaño de partícula gruesa, como la mezcla, tuvieron mayor densidad en las dos presiones más altas. Lo anterior indica que un tamaño de partícula gruesa, o diferentes tamaños mezclados en un solo pellet, ofrecen menor recuperación elástica con respecto a las partículas más pequeñas, viéndose reflejado en una mayor densidad normal.

Cuadro 10. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de densidad normal (kg m^{-3}) de los tratamientos (prueba de Tukey).

Tratamiento	N	Subconjuntos para $\alpha = 0.05$						
		1	2	3	4	5	6	7
PA/gruesa	4	1189						
PA/mezcla	4	1174						
PA/media	4		1169					
PA/fina	4			1162				
PM/gruesa	4			1157				
PM/mezcla	4			1154				
PB/mezcla	4				1136			
PM/fina	4					1127		
PM/media	4					1126		
PB/gruesa	4						1092	
PB/media	4						1080	
PB/fina	4							1072

Respecto a la comparación de medias de Tukey (cuadro 10), los tratamientos que presentaron una mayor densidad normal fueron aquellos donde se usó la presión más alta y un tamaño de partícula grueso o la mezcla de tamaños, mientras que el tratamiento que involucra menor presión y tamaño de partícula fina, fue el de menor densidad normal.

La mezcla de tamaños, en un solo pellet, produjo resultados de densidad normal superiores en comparación con los tamaños de partícula media y fina, para las presiones media y baja. Sin embargo, en la totalidad de los tratamientos ensayados, la densidad normal de los pellets fue altamente superior a la densidad normal medida en este mismo estudio para la madera (450 kg m^{-3})

Aunque la norma de pellets consultadas (EN 14961-2), no especifica dentro de sus requerimientos la densidad, los resultados obtenidos son la base para el

cálculo de la densidad energética y densidad a granel, este último parámetro si tiene límites en la norma anteriormente mencionada.

5.5.2. Densidad a granel

Con respecto a la densidad a granel (ANDEVA 5, anexo 1), solo la presión tuvo un efecto significativo en los pellets ($p < 0.0001$). Mientras que el tamaño de partícula y la interacción presión*tamaño de partícula no tuvieron efecto significativo en la densidad a granel ($p = 0.073$ y $p = 0.781$, respectivamente).

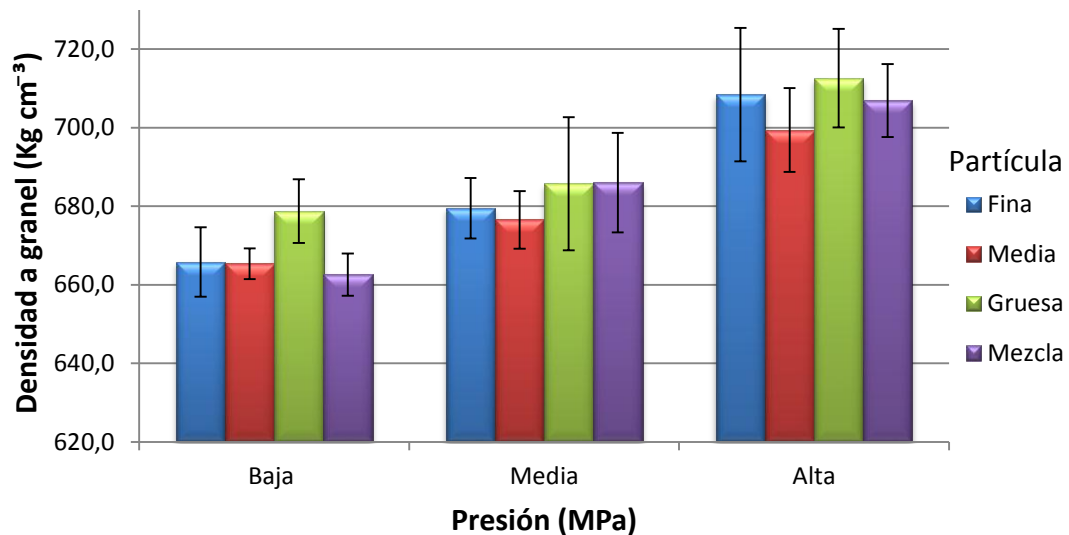


Figura 13. Densidad a granel de los pellets a diferentes tratamientos de presión y tamaño de partícula.

En la figura 13, se observa que la densidad a granel aumenta a medida que aumenta la presión. Esto, debido a que hay una estrecha relación con la densidad normal, pues a medida que aumenta, mayor es el número de pellets que pueden caber en un volumen determinado.

Dentro de los tamaños de partícula, se observa que el tamaño grueso, tuvo la mayor densidad a granel debido a la menor recuperación elástica que se comentó en el apartado de densidad normal. Por el contrario, los pellets elaborados con los tamaños de partícula fina aumentaron su volumen una vez que salieron de la prensa, lo que redundó en una densidad a granel más baja. Finalmente, la mezcla de partículas evidencia un comportamiento de recuperación elástica similar a la del pellet fabricado con la partícula gruesa.

Cuadro 11. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de densidad a granel (kg m^{-3}) de los tratamientos (prueba de Tukey)

Tratamiento	N	Subconjunto para $\alpha = 0.05$						
		1	2	3	4	5	6	7
PA/gruesa	4	713						
PA/fina	4		709					
PA/mezcla	4		707					
PA/media	4			699				
PM/mezcla	4				686			
PM/gruesa	4					686		
PM/fina	4						679	
PB/gruesa	4						678	
PM/media	4						676	
PB/fina	4							666
PB/media	4							665.
PB/mezcla	4							664

Con relación a la comparación de medias (cuadro 11), se observa que la presión más alta produjo los tratamientos con mayor densidad a granel en cada uno de los tamaños de partícula, siendo el tratamiento con la partícula gruesa el que produjo un mejor resultado. Por otro lado, los resultados más bajos se presentaron en los tratamientos donde la presión fue más baja sin que haya una diferencia notable de la mezcla con respecto al tamaño de partícula media y fina.

Aunque hay diferencia entre presiones y tamaños de partícula, todos los tratamientos ensayados cumplen con los requerimientos detallados en la norma EN 14961-2 la cual requiere una densidad a granel $\geq 600 \text{ kg m}^{-3}$. Por otro lado, la densidad a granel de todos los tratamientos es superior a la densidad a granel medida para el aserrín (193 kg m^{-3})

Por último, se pudo observar que la densidad a granel se ve afectada cuando hay pellets de diferente tamaño, pues los de menor tamaño o partidos, ocupan espacios que los pellets enteros no ocupan, alterando en ocasiones la repetitividad de los resultados.

5.5.3. Contenido de humedad

De acuerdo al ANDEVA 3 (anexo 1), tanto la presión, el tamaño de partícula y la interacción presión*tamaño de partícula tuvieron un efecto significativo en la humedad final de los pellets ($p < 0.0001$, $p < 0.0001$ y $p = 0.009$, respectivamente).

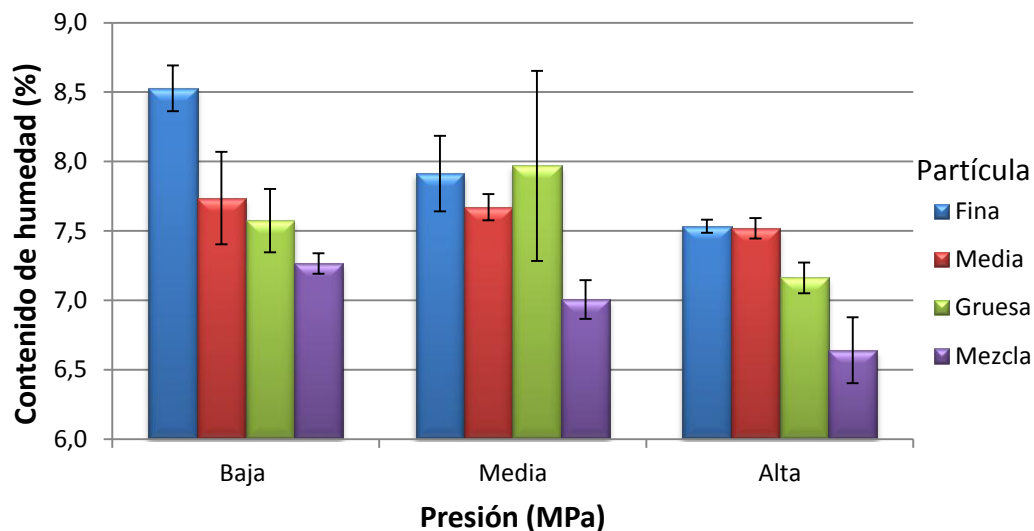


Figura 14. Contenido de humedad de los pellets a diferentes presiones y tamaños de partículas.

En la gráfica 14, se observa una tendencia donde los pellets elaborados con partículas gruesas presentaron menor contenido de humedad al final del proceso de fabricación. Los pellets elaborados con la mezcla mostraron contenidos de humedad más bajos en comparación con los pellets elaborados con un solo tamaño de partícula, disminuyendo su contenido de humedad a medida que aumentó la presión. Los pellets elaborados con tamaño de partícula media mostraron un contenido de humedad similar en las tres presiones. Los pellets elaborados con el tamaño de partícula fina retuvieron mayor contenido de humedad en comparación con los otros tamaños de partícula y la mezcla en las tres presiones evaluada. Esto debido posiblemente al menor contenido de espacios que impidieron un mayor movimiento y salida del agua desde el interior del material

Cuadro 12. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de contenido de humedad (%) de los tratamientos (prueba de Tukey)

Tratamiento	N	Subconjuntos para $\alpha = 0.05$								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
PB/fina	4	8.52								
PM/gruesa	4		7.96							
PM/fina	4			7.91						
PB/media	4				7.73					
PM/media	4				7.67					
PB/gruesa	4					7.57				
PA/fina	4					7.53				
PA/media	4					7.51				
PB/mezcla	4						7.26			
PA/gruesa	4							7.16		
PM/mezcla	4								7.00	
PA/mezcla	4									6.64

En relación a la comparación de medias (cuadro 12), el tratamiento que mayor contenido de humedad presento fue el de menor presión y tamaño de partícula fina. Por otro lado, el tratamiento de menor contenido de humedad fue en la mezcla y con mayor presión. Sin embargo, todos los pellets presentaron contenido de humedad por debajo del 10% b.h que requiere la norma EN 14961-2.

5.5.4. Durabilidad

De acuerdo con el ANDEVA 4 (anexo 1), tanto la presión, como el tamaño de partícula y la interacción entre ambos tuvieron un efecto significativo en la durabilidad de los pellets ($p = 0.0327$, $p = .0003$ y $p = 0.0157$ respectivamente).

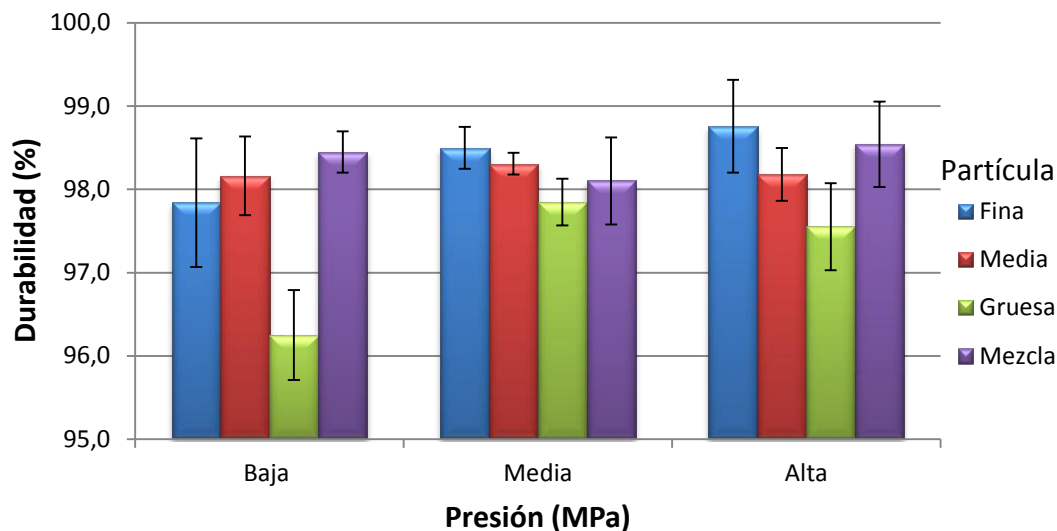


Figura 15. Durabilidad de los pellets a diferentes niveles de presión y tamaño de partícula.

En la figura 15, se observa que en las tres presiones los pellets fabricados con el tamaño de partícula grueso, mostraron la durabilidad más baja de todos los tratamientos. Sin embargo, su durabilidad aumentó conforme se incrementó la presión de fabricación. Los pellets fabricados con el tamaño de partícula fina, mostraron un aumento de durabilidad a medida que la presión fue aumentada. El tamaño de partícula media mantuvo un valor de durabilidad similar en las tres presiones. Los pellets elaborados con la mezcla y con las presiones 147 y 245 MPa, tuvieron los mejores resultados en durabilidad, aunque con la presión de 196 MPa este tratamiento presento una durabilidad levemente inferior, a la de los pellets de partículas finas.

Cuadro 13. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de durabilidad (%) de los tratamientos (prueba de Tukey).

Tratamiento	N	Subconjunto para $\alpha = 0.05$		
		1	2	3
PA/fina	3	98.7		
PA/mezcla	3	98.5		
PM/fina	3	98.4		
PB/mezcla	3	98.4		
PM/media	3	98.3		
PA/media	3	98.1		
PB/media	3	98.1		
PM/mezcla	3	98.0		
PB/fina	3	97.8		
PA/gruesa	3		97.4	
PM/gruesa	3		97.4	
PB/gruesa	3			96.2

En relación a la comparación de medias (cuadro 13), se puede observar que el primer subconjunto está conformado por todos los tratamientos a excepción de aquellos donde el tamaño de partícula fue gruesa, en las tres presiones evaluadas, los cuales se ubicaron en el segundo y tercer subconjunto en durabilidad. Lo anterior se debe posiblemente al número de grietas observadas en los pellets de este tamaño, los cuales causaron el desprendimiento de partículas durante la prueba.

De acuerdo con estos resultados, a excepción de los tratamientos PB/gruesa, PM/gruesa y PA/gruesa, el resto cumplen con el requerimiento de durabilidad para el grupo A1 y A2 de la norma EN 14961-2 ($\geq 97.5\%$). Sin embargo, los tratamientos PA/gruesa y PM/gruesa, entrarían dentro del grupo B de esta norma, pues el requerimiento de durabilidad para esta clase es $\geq 96.5\%$. El

único tratamiento que no cumpliría con ninguna de las calidades de la norma citada sería el de menor presión y tamaño de partícula gruesa.

Un porcentaje menor a los anteriormente mencionados, significa que el pellet se desmorona fácilmente, ocasionando suciedad, reducción de la eficiencia de combustión y un incremento de emisiones.

5.5.5. Resistencia a la compresión

Con relación al ANDEVA 5 (anexo 1), el tamaño de partícula tuvo un efecto significativo en la resistencia a la compresión de los pellets ($p < 0.0001$), mientras que la presión y la interacción presión*tamaño de partícula no tuvieron efectos significativos ($p = 0.098$ y $p = 0.503$, respectivamente).

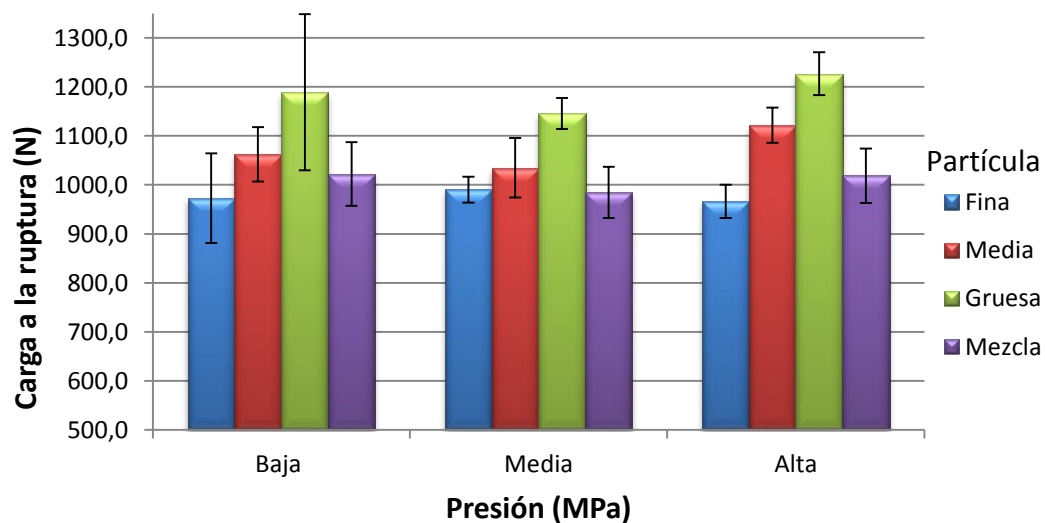


Figura 16. Resistencia a la compresión de los pellets a diferentes niveles de presión y tamaño de partícula.

En la gráfica 16, se observa una mayor resistencia a la compresión de los pellets a medida que el tamaño de partícula aumenta, situación que se ve reflejada en las tres presiones evaluadas. Se aprecia una mayor resistencia de los pellets fabricados con el tamaño de partícula gruesa, en las tres presiones, seguido del tamaño medio y fino. Por otro lado, la mezcla refleja la resistencia a la compresión promedio de los tres tamaños de partículas igualmente en las tres presiones, con un valor cercano a los 1000 N, valor superior a la resistencia reportada por Stelte *et al.* (2013), para pellets elaborados con paja y partículas ≤ 5.00 mm.

Cuadro 14. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de resistencia a la compresión (N) de los tratamientos (prueba de Tukey)

Tratamiento	N	Subconjuntos para $\alpha = 0.05$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
PA/gruesa	6	1226							
PB/gruesa	6		1189						
PM/gruesa	6			1145					
PA/media	6				1122				
PB/media	6					1062			
PM/media	6						1035		
PB/mezcla	6						1022		
PA/mezcla	6						1019		
PM/fina	6							990	
PM/mezcla	6							985	
PB/fina	6								973
PA/fina	6								966

De acuerdo a la comparación de medias (cuadro 14), los tres tratamientos que presentaron mayor resistencia a la compresión, fueron aquellos donde el tamaño de partícula fue gruesa independiente de la presión. En contraste, los tratamientos con menor resistencia a la compresión fueron aquellos pellets fabricados con tamaño de partícula fina, independientemente de la presión

ejercida. Los tratamientos con tamaño de partícula media y la mezcla, presentaron una resistencia intermedia.

La resistencia a la compresión encontrada en los pellets fabricados con el mayor tamaño de partícula gruesa, se debe posiblemente a una mayor integridad de las partículas, semejando el comportamiento de una pieza de madera sólida, y este valor desciende a medida que el tamaño de partícula disminuye.

5.5.6. Resistencia al impacto

El ANDEVA 6 (anexo 1), muestra que el tamaño de partícula tuvo efecto en la resistencia al impacto de los pellets ($p < 0.0001$), mientras que la presión y la interacción presión*tamaño de partícula no tuvieron ningún efecto significativo ($p = 0.97$ y $p = 0.62$ respectivamente).

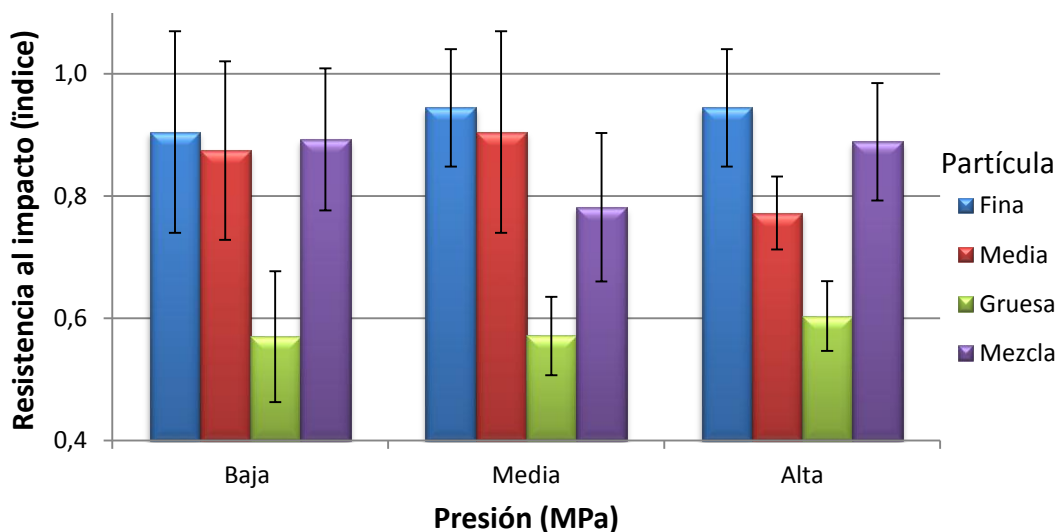


Figura 17. Resistencia al impacto de los pellets a diferentes niveles de presión y tamaño de partícula.

En la gráfica 17, se observa que la partícula de tamaño fino tuvo un índice de resistencia al impacto similar en las presiones media y alta; siendo este parámetro levemente mayor con respecto a la primera presión. Este mismo comportamiento se observó para el tamaño de partícula media, en la presión baja y media con un descenso en la presión más alta. Por otro lado, el tamaño de partícula más gruesa, presentó los menores índices de resistencia al impacto en las tres presiones evaluadas, con un leve aumento en la presión más alta. En el caso de la mezcla, esta tuvo una resistencia similar en la primera y última presión (147 y 245 MPa), con un leve descenso en la segunda presión (196 MPa).

En general, se puede mencionar que con la presión más baja se obtienen resultados de resistencia al impacto aceptables para la mezcla y todos los tamaños de partícula a excepción del tamaño de partícula gruesa.

Cuadro 15. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de resistencia al impacto (índice) de los tratamientos (prueba de Tukey).

Tratamiento	N	Subconjunto para $\alpha 0.05$				
		1	2	3	4	5
PA/fina	3	0.94				
PM/fina	3	0.94				
PB/mezcla	3		0.89			
PA/mezcla	3		0.88			
PB/fina	3			0.87		
PM/media	3			0.87		
PB/media	3			0.87		
PM/mezcla	3			0.78		
PA/media	3			0.77		
PA/gruesa	3				0.60	
PM/gruesa	3				0.57	
PB/gruesa	3					0.56

En relación a la comparación de medias (cuadro 15), el primer subconjunto homogéneo con mayor resistencia al impacto está conformado por los tratamientos con el tamaño de partícula fina en la presión media y alta. El segundo subconjunto homogéneo lo conforma la mezcla en la presión más baja y más alta. Lo que indica que con la presión más baja se obtiene resultados aceptables para este parámetro. Por otro lado, los tratamientos de menor resistencia al impacto están conformados por las partículas gruesas, con una tendencia a disminuir la resistencia al impacto a medida que se reduce la presión de fabricación. En relación a esto Franke y Rey (2006), mencionan que los pellets con partículas a partir de 1,0 mm pueden actuar como puntos de ruptura en los pellets.

5.5.7. Poder calorífico superior (PCS)

De acuerdo al ANDEVA 7 (anexo 1), ninguno de los tratamientos presento un efecto significativo en el poder calorífico superior ($p = 0.328$). Lo que significa que la presión, el tamaño de partícula y la interacción de ambas variables no modifican este parámetro.

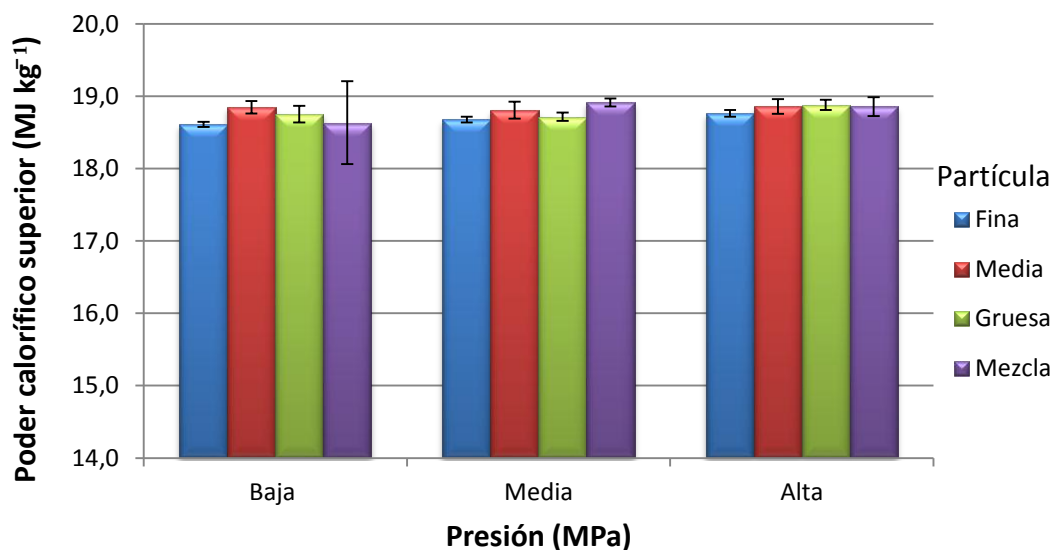


Figura 18. Poder calorífico superior de los pellets de aserrín de *P. patula* a diferentes niveles de presión y tamaño de partícula

En la figura 18, se observa que los tratamientos tuvieron un comportamiento similar, independientemente del tamaño de partícula y las presiones estudiadas, con un rango entre 18,6 y 18,9 MJ kg⁻¹. Esto, debido a que el PCS de los pellets proviene básicamente de los componentes de la materia prima que se utiliza para su formación, y está relacionado especialmente con el contenido de lignina y los extractivos lipofílicos del material. Sin embargo, se observa que estos

valores estuvieron por debajo del rango mencionado por Obernberger y Thek (2004), para madera ($19.6 - 20.7 \text{ MJ kg}^{-1}$).

Debido a que la norma para pellets EN 14961-2, utilizada en este estudio requiere del poder calorífico inferior (PCI), el cual expresa la energía neta con que trabajan los sistemas de combustión, se convirtieron los valores obtenidos a través de la ecuación (15), propuesta por Obernberger y Thek (2004), asumiendo un contenido de hidrógeno promedio para pinos del 5.6% (Fengel y Wegener 1984), y el contenido de humedad promedio de los tratamientos en el presente estudio. Los resultados se muestran en la tabla 10.

Cuadro 16. Poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI) de los pellets de aserrín de *P. patula*

Tratamiento	PCS	PCI
	MJ kg^{-1}	MJ kg^{-1}
PB/fina	18,61	16.08
PB/media	18,85	16.09
PB/gruesa	18,75	16.08
PB/mezcla	18,63	16.09
PM/fina	18,68	16.11
PM/media	18,81	16.11
PM/gruesa	18,72	16.10
PM/mezcla	18,91	16.11
PA/fina	18,76	16.10
PA/media	18,86	16.10
PA/gruesa	18,88	16.11
PA/mezcla	18,86	16.11

En relación al poder calorífico inferior calculado (cuadro 16), el rango obtenido se encuentra entre el 16.08 y 16.11 MJ kg⁻¹. Lo que indica que la totalidad de los tratamientos cumplen con el requisito mínimo establecido en la norma EN 14961-2, en el tercer grupo de calidad contemplados en la norma.

5.5.8. Densidad energética

Aunque ninguno de los tratamientos tuvo efecto en el poder calorífico superior, era de esperarse que si lo tuviera en la densidad energética, debido que esta variable depende directamente de la Densidad seca al aire del material. Por lo tanto y de acuerdo al ANDEVA 8 (anexo 1), encontramos nuevamente que tanto la presión como el tamaño de partícula *tienen* un efecto significativo en la densidad energética ($p < 0.0001$ en ambos factores), pero la interacción entre las dos (presión* tamaño de partícula), no fue significativo ($p = 0.408$). Esto indica que el incremento en densidad energética a presiones más altas, es similar independientemente del tamaño de partícula que se use para fabricar los pellets.

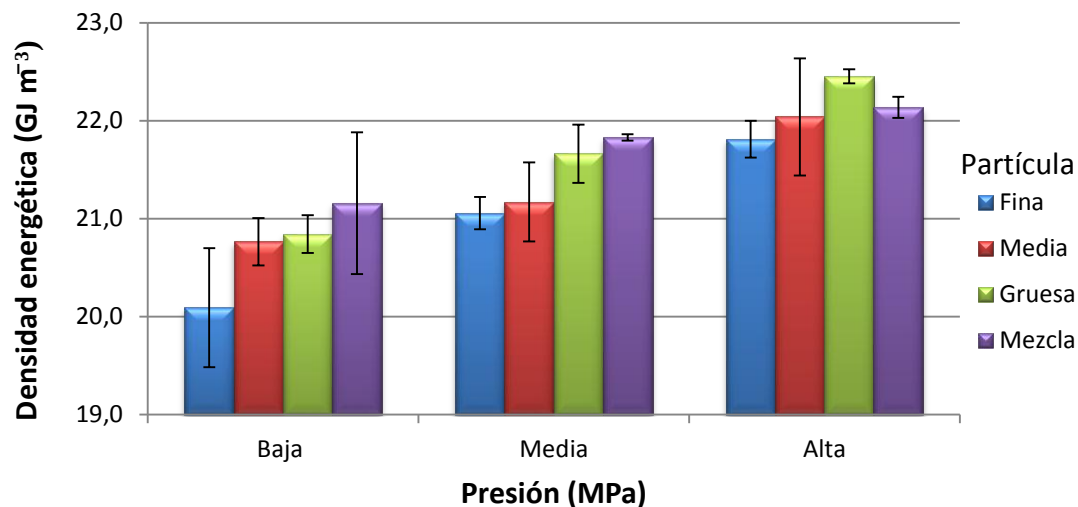


Figura 19. Densidad energética de pellets a diferentes niveles de presión y tamaño de partícula.

La gráfica 19, muestra que la densidad energética tiene un comportamiento similar al de la densidad normal, pues también aumento a medida que la presión y el tamaño de partícula aumentaron. La mezcla de partículas presento valores de densidad energética cercanos o superiores a los tamaños de partícula media y gruesa, y superior a la densidad energética de los pellets fabricados con la partícula fina, en cada una de las presiones ensayadas.

Cuadro 17. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos de densidad energética (GJ m^{-3}) de los tratamientos (prueba de Tukey)

Tratamiento	N	Subconjuntos para $\alpha = 0.05$				
		1	2	3	4	5
PA/gruesa	4	22.2				
PA/mezcla	4	22.1				
PA/media	4	22.0				
PM/mezcla	4		21.8			
PA/fina	4		21.8			
PM/gruesa	4		21.7			
PM/media	4			21.2		
PB/mezcla	4			21.2		
PM/fina	4			21.1		
PB/gruesa	4				20.8	
PB/media	4				20.8	
PB/fina	4					20.1

Según la comparación de medias (cuadro 17), la mayor densidad energética se ubicó en los tratamientos donde se utilizó la presión más alta y los tamaños de partícula media y gruesa además de la mezcla, con diferencias pequeñas pero significativas con respecto al segundo subconjunto encabezado por la mezcla en la presión media. Lo anterior refuerza la idea de usar diferentes tamaños de aserrín para lograr pellets con características similares a las que se pueden obtener con un tamaño único de partículas.

La densidad energética de los pellets en sus diferentes tratamientos y usando el poder calorífico inferior, es entre 17.8 y 22.2 GJ m^{-3} , superior a la densidad energética reportada por Stelte *et al.* (2013), para pellets de madera (7.5-10.4 GJ m^{-3}) y para pellets torrefactos (15-18.5 GJ m^{-3}).

5.5.9. Índice de valor del combustible (IVC)

El análisis de varianza 9 (anexo 9), muestra que la presión, el tamaño de partícula y la combinación de ambas tienen un efecto significativo en el índice de valor del combustible ($p = 0.001$, $p = 0.0001$ y $p = 0.030$, respectivamente).

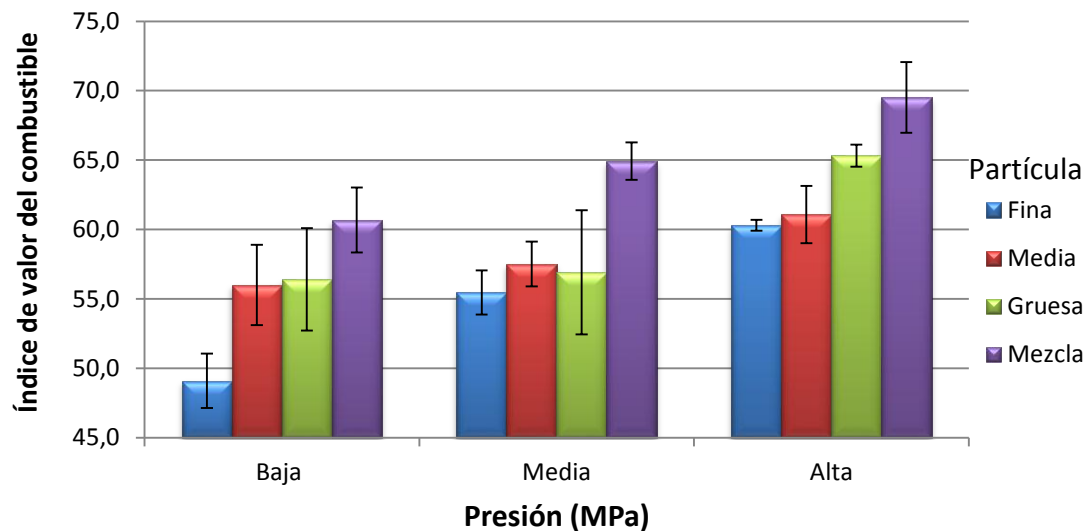


Figura 20. Índice de valor del combustible de los pellets a diferentes niveles de presión y temperatura.

La figura 20, muestra un aumento del índice de valor del combustible a medida que el tamaño de partícula aumenta. Sin embargo, los tamaños de partícula media y gruesa, tuvieron índices similares en la presión baja y media. El tamaño de partícula fina tuvo pequeños aumentos pero significativos entre la tres presiones, aunque siempre resultaron los tratamientos con el índice más bajo. La mezcla de partículas presento los mayores índices en las tres presiones por encima de los tres tamaños de partícula.

Cuadro 18. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos del valor del combustible (índice) de los tratamientos (prueba de Tukey).

Tratamiento	N	Subconjuntos para $\alpha = 0.05$					
		1	2	3	4	5	6
PA/mezcla	4	69508					
PA/gruesa	4		65321				
PM/mezcla	4		64924				
PA/media	4			61076			
PB/mezcla	4			60683			
PA/fina	4			60311			
PM/media	4				57510		
PM/gruesa	4				56921		
PB/gruesa	4					56419	
PB/media	4					55004	
PM/fina	4					55472	
PB/fina	4						49100

De acuerdo a la comparación de medias (cuadro 18), el tratamiento que mayor índice de valor de combustible tuvo fue la mezcla de partículas en la presión más alta. Esto se debe a que el cálculo de este índice toma como variables la densidad normal y el contenido de humedad, parámetros donde la mezcla tuvo mejores resultados. Por el contrario, la partícula fina en la presión más baja, mostro el menor índice de valor del combustible debido al mayor contenido de humedad retenido por este tamaño de partícula y a la baja densidad normal con respecto a los demás tamaños.

5.6. Discusión general del análisis estadístico.

En general, se observa que cuando más alta es la presión y mayor es el tamaño de partícula, la densidad normal de los pellets aumenta, situación que también se ve reflejada cuando se utiliza la mezcla de los tres tamaños de partícula. Lo

anterior, debido a que los pellets fabricados con partículas finas, tuvieron un mayor efecto de recuperación elástica que modificó las dimensiones luego de su compactación, alterando por consiguiente el volumen utilizado en el cálculo de la densidad. Sin embargo, todos los tratamientos estuvieron por encima de los 1050 kg m^{-3} , valor que duplica a la densidad de la madera medida en este estudio (450 kg m^{-3} al 10.6% de CH), y al valor de densidad reportado por Gillespie (2004), con un contenido del 12% ($400 - 520 \text{ kg cm}^{-3}$).

La densidad normal de cada tratamiento tuvo estrecha relación con los parámetros de densidad a granel y densidad energética, mostrando en ambos casos que la mezcla de tamaños ofrece resultados favorables. Sin embargo, en todos los tratamientos se observó que se obtiene una densidad a granel superior a los 600 kg m^{-3} requerido en la norma europea para pellets EN 14961-2.

Del mismo modo, las altas presiones y tamaño de partícula gruesa o la mezcla de partículas, producen menor contenido de humedad luego del peletizado. Situación que se pudo presentarse debido a una heterogeneidad del contenido de humedad en los diferentes tamaños de aserrín antes de densificado. Sin embargo, la totalidad de los tratamientos cumplió con el requisito de contenido de humedad para pellets comerciales de acuerdo a la norma europea EN 14961-2 ($\leq 10\%$).

La durabilidad de los pellets fue principalmente modificada por el tamaño de partícula y en menor grado por la presión, debido a que se observa que se

pueden obtener valores de durabilidad por encima del 97.5% requerido en la norma EN 14961-2, cuando se utilizan tamaños de partícula media, fina o la mezcla de diferentes tamaños incluso en la presión más baja.

En el caso de las variables resistencia a la compresión y resistencia al impacto, los diferentes tratamientos se vieron solamente modificados por el tamaño de partícula. La resistencia a la compresión fue mayor en aquellos pellets fabricados con tamaño de partícula gruesa, seguido por el tamaño medio y fina, hecho que se presentó posiblemente por una mayor integridad física de las partículas grandes. La mezcla de partículas mostró un promedio de resistencia a la compresión de los tres tamaños de partícula, es decir, alrededor de los 1000 N de resistencia, valor superior al reportado por Stelte *et al.* (2013), para pellets fabricados con paja de trigo (520 N).

Por el contrario, la resistencia al impacto se vio disminuida en aquellos tratamientos con presencia de partículas gruesas, mientras que los tamaños de partícula media y fina, así como la mezcla, presentaron las mayores resistencias al impacto, hecho que se debe posiblemente a que se crearon menos puntos de ruptura y mejor unión entre las partículas.

Como se esperaba, la presión y el tamaño de partícula no tuvieron efecto en el poder calorífico de los tratamientos, pues esta propiedad solo depende de la materia prima que se utilice, especialmente por el contenido de lignina y extractivos. No obstante, en todas las combinaciones aquí estudiadas se

cumple con el poder calorífico inferior requerido en la norma europea EN 14961-2 para el tercer grupo de calidad (16.08 -16.11 MJ kg⁻¹).

Por último, se observa que la densidad normal de los pellets elaborados con la mezcla de partículas y su bajo contenido de humedad, produjeron que el índice de valor del combustible fuera el más alto dentro de los tipos de partícula utilizados.

6. CONCLUSIONES

El aserrín generado durante la transformación primaria de la madera de *P. patula*, en las condiciones utilizadas en esta investigación, contiene un alta proporción de partículas adecuadas para la fabricación de pellets (≤ 2.00 mm). Esto indica que los costos de reducción granulométrica del aserrín son potencialmente menores a los de otros residuos de aserrío como los recortes o las costeras.

Los pellets se pudieron producir exitosamente en el laboratorio. De las 12 combinaciones presión/tamaño de partícula probadas, 9 cumplieron con la norma EN 14961-2 en los parámetros evaluados. No se encontró alguna ventaja de utilizar un rango específico de partícula para la fabricación del pellet (fina, media o gruesa), lo que indica que los residuos pueden utilizarse directo del aserrío, con un aprovechamiento cercano al 16.7% del volumen aserrado. Tampoco se determinó una ventaja clara de usar la presión media o alta.

Aunque se logran resultados marginalmente mejores en el índice de valor del combustible al aumentar la presión, también existe un efecto positivo significativo en la densidad normal, densidad energética, densidad a granel y CH a las presiones media y alta, si los pellets se fabrican a la presión baja (147

MPa), y si se utiliza el aserrín con la mezcla de tamaños o en su defecto, las partículas fina (≤ 0.84 mm) o media (0.84 - 2.00 mm), se satisfacen los requerimientos para contenido de humedad, densidad a granel, durabilidad y poder calorífico inferior establecidos en la norma europea EN 14961-2

..

7. RECOMENDACIONES

Los aspectos que no se lograron abarcar en esta investigación y que merecen de mayor estudio son los siguientes:

- Caracterización de los pellets en lo relacionado a pruebas de combustibilidad (potencia calorífica, temperatura de llama, tiempos de combustión e inflamación y coeficiente de conductividad térmica).
- Probar pre-tratamientos de la biomasa con técnicas como la torrefacción, la hidrólisis ácida o el uso de agentes biológicos como los hongos.
- Realizar un estudio de factibilidad económica para la producción de pellets usando residuos de aserrío.
- Evaluar presiones de fabricación más bajas a las utilizadas en este estudio.
- Probar el uso de aditivos para mejorar las características de formación o propiedades energéticas como el poder calorífico.

De acuerdo con la experiencia y resultados de esta investigación, se recomienda la fabricación de los pellets en moldes de acero de alta resistencia, torneados a no menos de 6 mm de diámetro interno con el fin de evitar deformaciones durante la compresión. Esto, cuando no se cuente con peletizadoras o granuladoras experimentales. Igualmente, se recomienda

mantener varios segundos la carga luego de la formación de los pellets para evitar la recuperación elástica del material la cual provoca cambios en las dimensiones de los pellets. Finalmente, una vez formados pellets, deben permanecer un tiempo adecuado para que alcancen una humedad de equilibrio de acuerdo a las condiciones del sitio y evitar sesgos en este parámetro.

8. LITERATURA CITADA

- Ahn, B. J., Chang, H. S., Lee, S. M., Choi, D. H., Cho, S. T., Han, G. S., & Yang, I. (2014). Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaemferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Renewable Energy*, 62, 18-23.
- Al-Widyan, M. I., & Al-Jalil, H. F. (2001). Stress-density relationship and energy requirement of compressed olive cake. *Applied Engineering in Agriculture*, 17(6), 749-753.
- Arzola, Nelson, Gómez, Alexander, & Rincón, Sonia. (2012). The effects of moisture content, particle size and binding agent content on oil palm shell pellet quality parameters. *Ingeniería e Investigación*, 32(1), 24-29.
- ASTM. (2007). D 1102-84: Ash in wood. Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.10: Wood (CD-ROM). West Conshohocken, Pennsylvania: *ASTM International*. 2 p

ASTM. (2007). D 1105-96: Standard test method for preparation of extractive-free wood. Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.10: Wood (CD-ROM). West Conshohocken, Pennsylvania: *ASTM International*. 2 p

ASTM. (2007). D 1106-96. Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood. Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.10: Wood (CD-ROM). West Conshohocken, Pennsylvania: *ASTM International*. 2 p

ASTM. (2007). D4442-07 Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials. West Conshohocken, Pennsylvania: *ASTM International*. 2 p

ASTM. (2002). D 4531-86 Standard Test Methods for Bulk Density of Peat and Peat Products. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, Pennsylvania: *ASTM International*. 2 p

ASTM. (2007). D 1762-84. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. American Society for Testing and Materials. Volume 04.10: Wood (CD-ROM). West Conshohocken, Pennsylvania: *ASTM International*. 2 p

- Berrocal-Jiménez, Alexander, Freer-Calderón, Juanita, Baeza-Hernández, Jaime, Rodríguez-Gutiérrez, Jaime, & Espinosa-Bancalari, Miguel. (2012). Relación entre edad del árbol y su composición química en *Pinus radiata* (D. Don) crecido en Chile y su importancia para la producción de bioetanol. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 1(1), pág. 1-8.
- Bhattacharya, SC. (2003). Biomass Energy and Densification: A global review with emphasis on developing countries. *São Paulo: Centro Nacional de Referência em Biomassa*.
- Biswas, A. K., Yang, W., & Blasiak, W. (2011). Steam pretreatment of Salix to upgrade biomass fuel for wood pellet production. *Fuel processing technology*, 92(9), 1711-1717.
- Reisinger, K., Haslinger, C., Herger, M., & Hofbauer, H. (1996). BIOBIB-A database for biofuels. In *THERMIE Conference: Renewable Energy Databases. Harwell, UK and Vienna., Institute of Chemical Engineering and Fuel and Environmental Technology, University of Technology*.
- Briggs, J. L., Maier, D. E., Watkins, B. A., & Behnke, K. C. (1999). Effect of ingredients and processing parameters on pellet quality. *Poultry Science*, 78(10), 1464-1471.

Camps, Manuel, & Marcos, Francisco. (2008). Los biocombustibles. *Madrid, España. Mundi-Prensa*.154.

Carone, M. T., Pantaleo, A., & Pellerano, A. (2011). Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 402-410.

Dec, RT. (2002). Optimization and control of roller press operating parameters. *Powder Handling & Processing*, 14(3), 222-225.

Dec, Roman T, Zavaliangos, Antonios, & Cunningham, John C. (2003). Comparison of various modeling methods for analysis of powder compaction in roller press. *Powder Technology*, 130(1), 265-271.

Demirbaş, Ayhan. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy conversion and Management*, 42(11), 1357-1378.

DIN, E15210–1 (2009).: Solid biofuels-Determination of mechanical durability of pellets and briquettes-Part 1: Pellets.

Fan, L. T., Gharpuray, M. M., & Lee, Y. H. (1987). In Cellulose Hydrolysis. *Biotechnology Monographs*, 57, pp. 149-187. New York, NY: Springer-

Verlag.

FAO. (2006). Tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina y el Caribe. *Estudio FAO Montes (FAO)*, 148.

Farjon, A., de la Rosa, Perez, J., & Styles, B. T. (1997). *Guía de campo de los pinos de México y América Central*. Royal Botanic Gardens.

Fengel, D., & Wegener, G. (Eds.). (1983). *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter.

Figuerola, B., Kanninen, M., Louman, B., Pedroni, L., & Gómez, M. (2004). Contenido de carbono en los productos y residuos forestales generados por el aprovechamiento y el aserrío en la reserva de Biosfera Maya. *Recursos Naturales y Ambiente*, 2004, 102-110.

Filbakk, T., Jirjis, R., Nurmi, J., & Høibø, O. (2011). The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3342-3349.

Franke, M., & Rey, A. (2006). Pelletizing quality. *World Grain*, 78-79.

Grover, PD, & Mishra, SK. (1996). *Biomass briquetting: technology and practices*: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Gillespie, A. (2004). *Pinus patula* Schiede & Deppe. *Pino pátula*, ocote. International Institute of Tropical Forestry (IITF). United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service. <http://www.fs.fed.us/global/iitf/Pinuspatula.pdf>. Acceso: 20 de noviembre de 2013.

Hill, Brad, & Pulkinen, DA. (1988). study of factors affecting pellet durability and pelleting efficiency in the production of dehydrated alfalfa pellets.

IEA Bioenergy. 2011. Global Wood Pellet Industry Market and Trade Study. Ed. IEA Bioenergy, Paris. 190 p.

Hartley, I. D., & Wood, L. J. (2008). Hygroscopic properties of densified softwood pellets. *Biomass and Bioenergy*, 32(1), 90-93.

Jannasch, R, Quan, Y, & Samson, R. (2001). A process and energy analysis of pelletizing switchgrass. *Prepared by REAP-Canada (www. reap-canada.com) for Natural Resources Canada*.

Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337-359.

Kamikawa, D., Kuroda, K., Inoue, M., Kubo, S., & Yoshida, T. (2009). Evaluation

of combustion properties of wood pellets using a cone calorimeter. *Journal of Wood Science*, 55(6), 453-457.

Kashaninejad, M., & Tabil. L.G. (2011). Effect of microwave-chemical pre-treatment on compression characteristics of biomass grinds. *Biosystems Engineering*, 108, pp. 36-45.

Lam, P. S., Lam, P. Y., Sokhansanj, S., Bi, X. T., & Lim, C. J. (2013). Mechanical and compositional characteristics of steam-treated Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.) during pelletization. *Biomass and Bioenergy*, 56, 116-126.

Lehtikangas, P. (2000). Storage effects on pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, 19(5), 287-293.

Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, 20(5), 351-360.

Lehmann, B., Schröder, H. W., Wollenberg, R., & Repke, J. U. (2012). Effect of miscanthus addition and different grinding processes on the quality of wood pellets. *Biomass and Bioenergy*, 44, 150-159.

Li, Ya Dong, & Liu, H. (2000). High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, 19(3), 177-186.

- Martinsson, L., & Österberg, S. (2004). Pelletising Using Forest Residues and Salix as Raw Materials—A Study of the Pelletising Properties. Report 876 Värmeforsk, Stockholm, Sweden. *Swedish. Summary in English.*
- McMullen, J., Fasina, O. O., Wood, C. W., & Feng, Y. (2005). Storage and handling characteristics of pellets from poultry litter. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(4), 645-651.
- Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30(7), 648-654.
- Mina-Boac, J., Maghirang, R. G., & Casada, M. E. (2006). Durability and breakage of feed pellets during repeated elevator handling. *American Society of Agricultural and Biological Engineers. Paper*, (066044).
- Moritz, J. S., Wilson, K. J., Cramer, K. R., Beyer, R. S., McKinney, L. J., Cavalcanti, W. B., & Mo, X. (2002). Effect of formulation density, moisture, and surfactant on feed manufacturing, pellet quality, and broiler performance. *Journal of Applied Poultry Research*, 11(2), 155-163.
- Nájera-Luna, J. A., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Jurado-Ybarra, E., Corral-Rivas, J. J., & Vargas-Larreta, B.

(2011). Tiempos y rendimientos del aserrío en la región de El Salto, Durango, México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(2), 199-213.

Nielsen, N. P. K., Gardner, D. J., Poulsen, T., & Felby, C. (2009). Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. *Wood and Fiber Science*, 41(4), 414-425.

Ortiz Torres, L. (1994). *Energías xilogeneratedas*. Tórculo Edicións.

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.

Padilla, A., Petit, J., Padilla, D., & Quintero, L. (2000). Especies usadas como comburentes en la comunidad de Villanueva, Estado Lara-Venezuela. *Revista Forestal de Venezuela*, 44(1), 11-15.

Pietsch, Wolfgang. (2002). Agglomeration technologies. *Agglomeration Processes: Phenomena, Technologies, Equipment*, 133-138.

Quirós, Rodolfo, Chinchilla, Orlando, & Gómez, Marianela. (2005). Rendimiento en aserrío y procesamiento primario de madera proveniente de plantaciones forestales. *Agronomía Costarricense*, 29(2), 7-15.

- Ragland, K. W., Aerts, D. J., & Baker, A. J. (1991). Properties of wood for combustion analysis. *Bioresource technology*, 37(2), 161-168.
- Reisinger, K., Haslinger, C., Herger, M., & Hofbauer, H. (1996). BIOBIB-A database for biofuels. In *THERMIE Conference: Renewable Energy Databases. Harwell, UK and Vienna., Institute of Chemical Engineering and Fuel and Environmental Technology, University of Technology.*
- Rowell, R. M., Pettersen, R., Han, J. S., Rowell, J.S., Tshabalala, M. A. (2005). Cell wall chemistry. In: Handbook of chemistry and wood composites. Rowell R. M. (Ed.). Boca Raton: Taylor & Francis Group. pp 62-63
- Soto, G., & Núñez, M. (2008). Manufacturing pellets of charcoal, using sawdust of *Pinus radiata* (D. Don), as a binder material. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 10(2), 129-137.
- Ståhl, M., & Berghel, J. (2011). Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets made from a raw material mix including sawdust and rapeseed cake. *Biomass and Bioenergy*, 35(12), 4849-4854.
- Sjaak, V. L., & Koppejan, J. (2002). Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing. *TNO-MEP (ed), Apeldoorn, Netherlands, ISBN, 446583145.*
- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Ahrenfeldt, J., Shang, Lei, &

- Henriksen, U. B. (2011a). Pelletizing properties of torrefied spruce. *Biomass and Bioenergy*, 35(11), 4690-4698.
- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2011b). A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 910-918.
- Stelte, W., Nielsen, N. P. K., Hansen, H. O., Dahl, J., Shang, Lei, & Sanadi, A. R. (2013). Reprint of: pelletizing properties of torrefied wheat straw. *Biomass and Bioenergy*, 53, 105-112.
- Stevens, J., & Gardner, D. J. (2010). Enhancing the fuel value of wood pellets with the addition of lignin. *Wood and Fiber Science*, 42(4), 439-443.
- Tabil, L. G. (1996). Pelleting and binding characteristics of alfalfa. *Unpublished Ph. D. thesis, Department of Agricultural and Bioresource Engineering, Saskatoon, SK Canada: University of Saskatchewan.*
- Telmo, C., & Lousada, J. (2011). Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and bioenergy*, 35(7), 2634-2639.
- Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P. D., Hartmann, H., & Böhm, T. (2006). Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes.

Biomass and Bioenergy, 30(11), 964-972.

Thomas, M., & Poel, A. F. B. van der. (1996). Physical quality of pelleted animal feed. 1. Criteria for pellet quality. *Animal Feed Science and Technology*, 61(1/4), 89-112.

Thomas, M., Vliet, T. van, & Poel, A. F. B. van der. (1998). Physical quality of pelleted animal feed. 3. Contribution of feedstuff components. *Animal Feed Science and Technology*, 70(1/2), 59-78.

Thomas, M., Zuilichem, D. J. van, & Poel, A. F. B. van der. (1997). Physical quality of pelleted animal feed. 2. Contribution of processes and its conditions. *Animal Feed Science and Technology*, 64(2/4), 173-192.

Toscano, G., Riva, G., Pedretti, E. F., Corinaldesi, F., Mengarelli, C., & Duca, D. (2013). Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and the most important chemical elements. *Biomass and Bioenergy*, 56, 317-322.

UNE-EN 14961-2. (2011). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: pellets de madera para uso no industrial. *Asociación Española de Normalización y Certificación*.

UNE-EN 15210-1. (2010). Determinación de la durabilidad mecánica de pellets y briquetas. Parte 1. Norma Europea. Biocombustibles sólidos. 12 p.

Vlasenko, E.Y., Ding, H., Labavitch J.M., & Shoemaker, S.P. (1997). Enzymatic Hydrolysis of Pretreated Rice Straw. *Bioresource Technology*, 59, pp. 109-119.

Werkelin, Johan, Skrifvars, Bengt-Johan, Zevenhoven, Maria, Holmbom, Bjarne, & Hupa, Mikko. (2010). Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel*, 89(2), 481-493.

Wood, John F. (1987). The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets. *Animal Feed Science and Technology*, 18(1), 1-17.

Yang, P., & Jenkins, B. M. (2008). Wood residues from sawmills in California. *Biomass and Bioenergy*, 32(2), 101-108.

Zavala, Z. D. (1996). Coeficientes de aprovechamiento de trocería de pino en aserraderos banda. *Ciencia Forestal en México*. 21(79): 165-181.

Zavala Zavala, D., & Hernández Cortés, R. (2000). Analysis of the yield and revenue from sawmilling pine logs. *Madera y Bosques*, 6(2), 41-55.

9. ANEXOS

Anexo 1.

ANDEVA 1 para la variable densidad normal (kg m^{-3})

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-calculada	Pr > F
Presión	2	0.030	0.0152	72.85	<.0001
Partícula	3	0.007	0.0024	11.85	<.0001
Pres*part	6	0.002	0.0004	1.94	0.1006

ANDEVA 2 para la variable densidad a granel (kg m^{-3})

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-calculada	Pr > F
Presión	2	12325.029	6162.514	53.03	<.0001
Partícula	3	881.337	293.779	2.53	0.0727
Pres*part	6	370.481	61.746	0.53	0.7807

ANDEVA 3 para la variable contenido de humedad (%)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-calculada	Pr > F
Presión	2	2.750	1.375	19.61	<.0001
Partícula	3	6.471	2.157	30.77	<.0001
Pres*part	6	1.450	0.241	3.45	0.0086

ANDEVA 4 para la variable durabilidad (%)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-calculada	Pr > F
Presión	2	2.099	1.049	3.96	0.0327
Partícula	3	7.471	2.490	9.38	0.0003
Pres*part	6	5.301	0.883	3.33	0.0157

ANDEVA 5 para la variable resistencia a la compresión (N)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-calculada	Pr > F
Presión	2	249.1341	124.5670	2.42	0.0978
Partícula	3	4852.0634	1617.3544	31.38	<.0001
Pres*part	6	277.5657	46.2609	0.90	0.5026

. ANDEVA 6 para la variable resistencia al impacto (Índice)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-calculada	Pr > F
Presión	2	0.0006	0.0003	0.03	0.974
Partícula	3	0.6337	0.2112	16.43	<.0001
Pres*part	6	0.0574	0.0095	0.74	0.619

ANDEVA 7 para la variable poder calorífico superior (MJ kg⁻¹)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-calculada	Pr > F
Presión	2	7616.768	3808.384	1.97	0.1542
Partícula	3	8913.909	2971.303	1.54	0.2217
Pres*part	6	8789.390	1464.898	0.76	0.6077

ANDEVA 8 para la variable densidad energética (GJ m⁻³)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-calculada	Pr > F
Presión	2	850241.419	425120.709	60.89	<.0001
Partícula	3	267542.304	89180.768	12.77	<.0001
Pres*part	6	44096.136	7349.356	1.05	0.4085

ANDEVA 9 para la variable índice de valor del combustible

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-calculada	Pr > F
Presión	2	4.864467	2.432233	56.67	<.0001
Partícula	3	5.514598	1.838199	42.83	<.0001
Pres*part	6	0.688041	0.114673	2.67	0.0301