

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE**

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

TEMA

**Pelletización del Aserrín de Pigüe (*Pollalesta
discolor*) para Fines Energéticos en la Provincia de
Pastaza**

AUTORA

Miryam Janeth Cárdenas Bonifa

DIRECTORES

Dr.C. Oscar Miguel Rivera Borroto, Ph.D.

Ing. Juan Elías González Rivera

PUYO - ECUADOR

Junio 2016

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Miryam Janeth Cárdenas Bonifa, con cédula de identidad 1600416414, declaro que las actividades realizadas para la realización y culminación del presente proyecto de investigación y desarrollo, que tiene como tema “PELLETIZACIÓN DEL ASERRÍN DE PIGÜE (*Pollalesta discolor*) PARA FINES ENERGÉTICOS EN LA PROVINCIA DE PASTAZA”, se basaron en la búsqueda de información, ideas, análisis, conclusiones y recomendaciones, que me guiaron para estructurar mi trabajo y sea considerado para posibles investigaciones futuras, basándose en los resultados obtenidos; además que me responsabilizo en forma legal y académicamente como la autora del presente trabajo previo a la obtención del título como Ingeniero Agroindustrial.

Cárdenas Bonifa Miryam Janeth

CI. 160041641-4

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

El Director de Tesis certifica que el egresado ha realizado el Proyecto de Investigación y Desarrollo previo a la obtención del título.

Dr.C. Oscar Miguel Rivera Borroto, Ph.D.
DIRECTOR DEL PROYECTO

**CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA
HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE
COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El Tribunal de sustentación del Proyecto de Investigación y Desarrollo aprueba el proyecto de investigación y desarrollo **“PELLETIZACIÓN DEL ASERRÍN DE PIGÜE (*Pollalesta discolor*) PARA FINES ENERGÉTICOS EN LA PROVINCIA DE PASTAZA”**.

**Dr.C. Reinier Abreu Naranjo,PhD.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

**Ing. Víctor Cerda, Ms.C.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

**Ing. Santiago Aguiar Novillo, Ms.C.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la vida,
salud y fortaleza para seguir adelante;
y estar en compañía de mis padres,
especialmente mi madre que es un pilar fundamental
que hace posible llegar a mis metas.

A mis hijas dueñas de mi corazón y pensamientos,
ellas son mi alegría y aunque
no les he dedicado el tiempo completo
para sus cuidados, siempre me regalan sus sonrisas,
abrazos y ocurrencias.

A todas las personas que son parte de mi vida,
y a pesar de las situaciones saben darme apoyo
de una u otra manera.

A los compañeros y profesores con quienes he compartido
durante el período de estudios
brindándome la oportunidad de contar con su compañía,
alegrías, tristezas, dudas y enseñanzas.

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado
para mis hijas Edurne, Monserrat y Raziela,
quienes son el motivo y la razón para superarme,
enseñándoles que todo es posible
si hacemos las cosas de corazón
y no por obligación.

A mi madre Guadalupe
quien hizo posible
haber llegado hasta el final
de mi meta propuesta,
brindando amor, cariño y cuidado
a mis hijas en mis momentos de ausencia.

RESUMEN EJECUTIVO Y PALABRAS CLAVES

El presente trabajo tiene como propósito contribuir al desarrollo de la matriz energética de la provincia de Pastaza mediante la densificación de la biomasa de la especie nativa Pigüe (*Pollalesta discolor*). Para dicho fin se tomaron muestras estratificadas de aserrín de Pigüe del aserradero “San Francisco”, donde se obtiene la producción de biomasa y otros subproductos madereros. Las muestras de aserrín tomadas se sometieron a análisis bromatológico obteniéndose porcentajes de humedad del 43.67%, cenizas del 0.96%, fibras del 75.18%, proteínas del 1,43% y grasas del 0.16%. A través de las variables bromatológicas fue determinado el poder calorífico del aserrín de Pigüe. Sin embargo, un estudio estadístico de correlación/regresión permitió demostrar que el poder calorífico puede ser estimado con gran exactitud a partir de la humedad solamente. Posteriormente, se logró la pelletización del aserrín de Pigüe mediante un dispositivo construido específicamente para este fin, operado a dos temperaturas: 85 °C y 105 °C. Los *pellets* fueron analizados estadísticamente estableciendo así el contenido de humedad, el contenido de cenizas, el índice de friabilidad y poder calorífico. Se concluyó que no existen diferencias significativas en estas variables. Específicamente, el índice de friabilidad en los *pellets* mostró valores positivos en términos de resistencia, manipulación y transporte. A través de la ecuación de predicción y los valores de humedad de los *pellets*, se estimaron los poderes caloríficos con un valor promedio de 3661.94 kcal/kg. Este valor está dentro del rango del poder calorífico para diferentes productos maderables reportados por otros investigadores. Sin embargo, el aserrín de Pigüe representa una alternativa más competitiva por su gran abundancia natural, mayor índice de procesamiento en los aserraderos y menor costo.

Palabras claves: Pigüe, Biomasa, Densificación, Poder Calórico, Energía Renovable.

ABSTRACT AND KEYWORDS

This work has the aim of contributing to the development of energetic matrix of the Pastaza province by the biomass densification of the native species Pigüe (*Pollalesta discolor*). To this end Pigüe sawdust stratified samples were taken from the “San Francisco” sawmill, where biomass and other wood sub-products are obtained. These samples were applied to a bromatological analysis, yielding a moisture of 43.67%, ashes of 0.96%, fibbers of 75.18%, proteins of 1.43%, and fats of 0.16%. Using the bromatological variables the caloric power of Pigüe sawdust was determined. However, a correlation/regression statistical analysis showed that only moisture values are needed to exactly predict the caloric power figures. Afterwards, the pelletization process was attained from the sawdust samples. These *pellets* were obtained by using a device built ‘in house’ and designed for this purpose and operated at two temperatures: 85 °C and 105 °C. The *Pellets* were statistically analyzed establishing the content of “ashes”, “friability” index, and “caloric power”. It was concluded that there were not significant differences between *pellets* moisture. Specifically, the *pellets* friability index was positive in terms of resistance, manipulation and transportation. Through the predictive equation and the moisture values of the *pellets*, the caloric power was predicted in an average value of 3661.94 kcal/kg. This average is within the caloric power range obtained for wood products previously reported by other researchers. However, the Pigüe sawdust represents a more competitive alternative due to its natural abundance, higher processing index in regional sawmills, and lowering cost.

Keywords: Pigüe, Biomass, Densification, Caloric Power, Renewable Energy.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO II.....	4
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
2.1. Recursos forestales como un valor fundamental del Ecuador	4
2.1.1. Especies forestales con mayor uso en el Ecuador	4
2.1.2. Aprovechamiento de madera por tipo de formación vegetal.....	5
2.1.3. Aprovechamiento forestal del bosque nativo	6
2.1.4. Explotación del Pigüe.....	7
2.1.5. Distribución natural del Pigüe	7
2.1.6. Clasificación y descripción botánica	7
2.1.7. Usos del Pigüe	8
2.2. Biomasa	8
2.2.1. Categorización de la biomasa	8
2.2.2. Ventajas y desventajas de la biomasa como recurso energético	9
2.2.3. Densificación de la biomasa	10
2.3. Potencial del Pigüe para biomasa energética	12
2.4. Características físicas de los residuos forestales.....	12
2.4.1. Densidad aparente.....	12

2.4.2.	Humedad.....	12
2.4.3.	Contenido de humedad	14
2.4.4.	Secado de la madera	15
2.4.5.	Poder calorífico.....	15
2.5.	Biocombustibles sólidos	16
2.5.1.	Leña	17
2.5.2.	Astillas forestales.....	17
2.5.3.	Gránulos o <i>pellets</i>	18
2.5.4.	Virutas y aserrín.	18
2.5.6.	Carbón de madera.....	19
2.6.	Poder calorífico de biocombustibles derivados de la madera.	20
2.7.	Pellets.....	20
2.7.1.	Características físicas	21
2.7.2.	Características químicas	22
2.7.3.	Uso de los <i>pellets</i>	23
2.8.	Proceso de pelletizado	24
2.8.1.	Materia prima	25
2.8.2.	Secado.....	26
2.8.3.	Granulometría.....	26
2.8.4.	Molido	26
2.8.5.	Presión de compactación	27
2.8.6.	Calor aplicado exteriormente	27
2.9.	Herramientas estadísticas.....	27
2.9.1.	Diseños experimentales	27
2.9.2.	Análisis de Regresión	27
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	29

3.1.	Localización.....	29
3.2.	Tipo de investigación.....	29
3.2.1.	Carácter.....	29
3.2.2.	Métodos de investigación.....	30
3.2.3.	Alcance.....	30
3.3.	Diseño de la investigación.....	30
3.3.1.	Diseño experimental para el aserrín de Pigüe.....	31
3.3.2.	Diseño experimental para la obtención de los <i>pellets</i>	32
3.3.3.	Tratamiento de los datos.....	33
3.3.4.	Recursos humanos y materiales.....	38
3.3.5.	Equipos y materiales.....	39
CAPÍTULO IV.....		41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		41
4.1.	Análisis de homogeneidad de las muestras de aserrín de Pigüe.....	41
4.1.1.	Humedad.....	41
4.1.2.	Cenizas.....	42
4.1.3.	Proteína.....	43
4.1.4.	Grasa.....	44
4.1.5.	Fibra.....	45
4.2.	Cálculo y análisis de homogeneidad del aserrín de Pigüe.....	46
4.2.1.	Carbohidratos totales.....	46
4.2.2.	Poder calorífico.....	47
4.3.	Cálculo del poder calorífico del aserrín de Pigüe a partir de la humedad.....	48
4.4.	Comparación de parámetros físico-químicos.....	50
4.4.1.	Porcentaje de humedad en <i>pellets</i> a temperaturas de 85°C y 105°C.....	50
4.4.2.	Friabilidad de los <i>Pellets</i> a temperaturas de 85°C y 105°C.....	51

4.5. Predicción del poder calorífico de los <i>pellets</i> de Pigüe	52
CAPÍTULO V	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
5.1. CONCLUSIONES	53
5.2. RECOMENDACIONES	53
CAPITULO VI.....	54
1. BIBLIOGRAFIA.....	54
CAPÍTULO VII	59
ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Principales especies autorizadas para el aprovechamiento a nivel nacional	5
Tabla 2.2. Aprovechamiento forestal de acuerdo al origen de la madera 2007-2010	6
Tabla 2.3. Aprovechamiento forestal en bosque nativo por provincias en el año 2010	6
Tabla 2.4. Características físicas, químicas y físico-químicas de briquetas y <i>pellets</i> .	11
Tabla 2.5. Denominación de la madera según el contenido de humedad	13
Tabla 2.6. Aspecto físico de los principales biocombustibles	16
Tabla 2.7. Propiedades de los biocombustibles derivados de la madera	20
Tabla 2.8. Propiedades de los <i>pellets</i> según normativa EN 14961-2:2011	24
Tabla 3.1. Determinación de humedad del aserrín de Pigüe	31
Tabla 3.2. Determinación de grasa y fibra	31
Tabla 3.3. Descripción experimental. <i>Pellets</i>	32
Tabla 3.4. Diseño experimental para humedad y cenizas. <i>Pellets</i>	32
Tabla 3.5. Diseño para el cálculo del índice de friabilidad	33
Tabla 3.6. Tabla de materiales, equipos y normativas para análisis	39
Tabla 3.7. Tabla de materiales, equipos y normativas para obtención de <i>pellets</i>	40
Tabla 4.1. Determinación de la variable humedad	41
Tabla 4.2. Valores representativos de la variable humedad	41
Tabla 4.3. Determinación de la variable cenizas	42
Tabla 4.4. Valores representativos de la variable ceniza	43
Tabla 4.5. Determinación de la variable proteína	43
Tabla 4.6. Valores representativos de la variable proteína	44
Tabla 4.7. Valores representativos de la variable grasa	44
Tabla 4.8. Determinación de la variable fibra	45
Tabla 4.9. Valores representativos de la variable fibra	45
Tabla 4.10. Valores porcentuales físico-químicos del aserrín de Pigüe	47
Tabla 4.11. Cálculo de la variable carbohidratos totales	46
Tabla 4.12. Valores representativos de la variable carbohidratos totales	46
Tabla 4.13. Cálculo de la variable poder calorífico	48
Tabla 4.14. Valores representativos de la variable poder calorífico	48
Tabla 4.15. Determinación del poder calorífico a partir de la humedad	49

Tabla 4.16. Estimación y significación de los coeficientes de la regresión	49
Tabla 4.17. Valores representativos de la humedad de <i>pellets</i>	50
Tabla 4.18. Poder calorífico de <i>pellets</i> en orden ascendente reportados en otros trabajos	52

LISTA DE ABREVIACIONES

PNBSE	Programa Nacional de Biocomercio Sostenible
ECORAE	Instituto para el Eco Desarrollo Regional Amazónico
PIF	Programa para Incentivos para la Reforestación con Fines Comerciales
PFNM	Productos Forestales No Maderables
PFM	Productos Forestales Maderables
PAFSi	Programa de Aprovechamiento Forestal Simplificados
MAG	Ministerio de Agricultura
PCS	Poder calorífico superior
PCR	Poder calorífico real
PCI	Poder calorífico inferior
ITEBE	Institut Technique Européen du Bois-Energy
MAP	Metro cúbico aparente de astillas
ARENE	Agencia Regional de Energía y Medio Ambiente
UEA	Universidad Estatal Amazónica
ANOVA	Análisis de varianza con un factor

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La humanidad está presenciando la disminución de los combustibles fósiles y de alguna manera la alternativa es adoptar nuevas fuentes de energía, amigables con el ambiente y que estas sean renovables, aprovechando los recursos ilimitados (Mena, 2014, p.276). Por otra parte, la generación de energía a partir de la extracción de los recursos no renovables como el petróleo, carbón, entre otros, es considerada como una de las actividades que mayor daño causan al ambiente. La generación de energía con el uso de recursos renovables, es una tendencia mundial porque permite optimizar los recursos vegetales naturales y por ende minimizar el impacto medioambiental generado por las actividades del hombre en el planeta (Yánquez, 2012). En este sentido, diversos organismos internacionales socio-ambientalistas (Conservancy, 2016; Greenpeace, 2015; Morges, 1961; PNUMA, 1972) proporcionan los medios para mejorar la calidad de vida sin poner en peligro la de futuras generaciones. Acordando con los gobiernos, especialmente del Tercer Mundo, mediante el financiamiento de actividades especiales (Dupas y Diegues, 2008), los organismos internacionales implementaron políticas que contribuyeron a conservar la naturaleza y, de alguna manera mitigar el efecto invernadero.

En el Ecuador, existen políticas públicas y programas de gobierno que son orientados a la conservación de sus recursos naturales como lo establece el Artículo 71 de la Constitución de la República del Ecuador: “La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos” (Constituyente, 2008, p.46). Otros programas e instituciones como el Programa Nacional de Biocomercio Sostenible (PNBSE) que plantea la promoción del comercio y las inversiones que potencien el uso de la biodiversidad; el Programa Socio-Bosque que consiste en incentivar económicamente a individuos y comunidades que se comprometan a conservar el bosque, y el Instituto para el Eco Desarrollo Regional Amazónico (ECORAE) que promueven políticas públicas de equidad

de género en la Amazonía, también estimulan una política de conservación de recursos (Llambí, *et al.*, 2016). Tanto los programas como las instituciones están planteadas dentro del cambio en la Matriz Productiva, y por consiguiente supone la Transformación de la Matriz Energética (Llambí, *et al.*, 2016), cuya prioridad es el aprovechamiento de los recursos renovables, para la producción de energía limpia.

En cuanto a la provincia de Pastaza, las políticas energéticas se rigen por el Artículo 415 que establece: “El Estado Central y los Gobiernos Autónomos descentralizados adoptarán políticas integrales y participativas de ordenamiento territorial urbano de uso del suelo... Los gobiernos autónomos descentralizados desarrollarán programas de uso racional de agua y de reducción, reciclaje y tratamiento adecuado de desechos sólidos y líquidos” (Constituyente, 2008, p.180). Al respecto, existen disposiciones establecidas para los municipios que trata sobre la Gestión Integral de Residuos Sólidos referente a residuos orgánicos secos reciclables urbanos. Actualmente, la provincia de Pastaza no cuenta con programas para el aprovechamiento de los residuos sólidos procedentes de las actividades de la industria maderera. Específicamente, a la fecha [junio de 2016] no existe ningún programa de inversión y desarrollo que estimule la investigación energética a partir de la biomasa como la del Pigüe y el posterior desarrollo de tecnologías alternativas y limpias a mediana y gran escala. Al respecto, se espera que la presente investigación represente un ímpetu para futuras investigaciones.

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

- La carencia de un estudio físico-químico sobre la biomasa de Pigüe limita el aprovechamiento del mismo como fuente de energía alternativa para la provincia de Pastaza.

1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

El aserrín de Pigüe (*Pollalesta discolor*) es un biocombustible apto para la producción de energía calorífica debido a sus características físico-químicas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluación de las características físico-químicas y energéticas de los *pellets*, obtenido de la biomasa del aserrín de Pigüe para fines energéticos.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades físico-químicas que contiene el aserrín de Pigüe para fines energéticos del aserradero “San Francisco” del cantón Pastaza de la provincia de Pastaza.
- Determinar el poder calorífico del *pellet* obtenido del aserrín de Pigüe, mediante el uso de una ecuación de correlación/regresión, a partir de los datos de análisis realizados en el laboratorio.
- Evaluar el índice de friabilidad del *pellet* obtenido del aserrín de Pigüe, mediante el ensayo de friabilidad y el proceso de obtención en laboratorio.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Recursos forestales como un valor fundamental del Ecuador

Ecuador es un país que, por su ubicación geográfica, posee una amplia diversidad, riquezas naturales y un gran potencial forestal; especialmente, la innovación y tecnificación de la industria maderera que ofrece una amplia gama de productos con valor agregado. Para mantener la eficiencia y competitividad en este rubro, se requieren acciones como la repoblación forestal. Al respecto, en el país existen iniciativas gubernamentales como el Programa para Incentivos para la Reforestación con Fines Comerciales (PIF) (Proecuador, 2015 p. 5). Teniendo en cuenta que el Ecuador cuenta con aproximadamente 2'616.546 hectáreas disponibles, la meta es reforestar 120.000 hectáreas hasta el 2018, beneficiando a 8.602 productores forestales. De esta manera se garantiza cubrir la demanda local de madera en los años subsiguientes (Proecuador, 2015, p.5).

2.1.1. Especies forestales con mayor uso en el Ecuador

Dentro del gran ecosistema forestal del Ecuador, podemos encontrar diversas especies forestales que están clasificadas por categorías: manglar, bosques, matorral, espinar, sabana y páramo (Grijalva *et al.*, 2012 p.14). Estas especies son aprovechadas constantemente debido a su importancia económica. Según datos recogidos por el Ministerio del Ambiente, hay al menos 750 especies forestales que son aprovechadas anualmente, de las cuales el 48% se utiliza para la obtención de Productos Forestales No Maderables (PFNM), 45% para Productos Forestales Maderables (PFM) y un 7% en leña (Grijalva *et al.*, 2012 p.16). En la **Tabla 2.1** se detalla las especies para el aprovechamiento forestal a nivel nacional, donde se encuentra la especie nativa Pigüe (*Pollalesta discolor*) (Grijalva *et al.*, 2012 p.17).

Tabla 2.1. Principales especies autorizadas para el aprovechamiento a nivel nacional

NOMBRE COMÚN	VOLÚMEN AUTORIZADO (m ³)	PARTICIPACIÓN TOTAL (%)
Balsa	794'359.45	21.53
Eucalipto	619 243.35	16.79
Pino	470 493.80	12.75
Laurel	284 644.57	7.72
Pachaco	188 986.82	5.12
Teca	181'915.43	4.93
Pigüe	132'948.35	3.60
Sande	66'247.84	1.80
Pichango	61'772.54	1.67
Lechero	43'908.35	1.19
Otras Especies Autorizada A Nivel Nacional (348)	844'659.69	22.90

Fuente: Grijalva *et.al.*, 2012

2.1.2. Aprovechamiento de madera por tipo de formación vegetal

La implementación de sistemas agroforestales (regeneración natural y árboles relictos), ha incrementado el aprovechamiento de la madera en un 75,59%, donde el 52,74% pertenece a las formaciones pioneras y el 14,58% a las plantaciones forestales, mientras que en el bosque nativo se han mantenido los porcentajes de aprovechamiento durante los 4 años (Tene *et.al.*, 2011 p.2). En la **Tabla 2.2** observamos los valores del volumen total de maderas autorizadas para el aprovechamiento para cada formación vegetal, correspondientes al período 2007-2010 (Tene *et.al.*, 2011 p.2).

Tabla 2.2. Aprovechamiento forestal de acuerdo al origen de la madera 2007-2010

FORMACIÓN VEGETAL	VOLUMEN (m ³)				
	2007	2008	2009	2010	PROMEDIO m ³ /año
Plantaciones forestales	1'492'510.82	1'711'463.98	1'768'659.85	2'026'696.10	1'746'058.01
Bosque nativo	294'746.16	338'310.47	455'957.93	800'622.05	402'857.19
Sistemas agroforestales	51'227.17	275'009.79	314'617.22	480'576.14	472'394.15
Formaciones pioneras	367'090.99	451'404.81	396'488.55	396'444.41	280'357.58

Fuente: Tene *et.al.*, 2011

2.1.3. Aprovechamiento forestal del bosque nativo

En el 2010, el aprovechamiento de los bosques nativos fue de 396'444.41 m³ de madera, en 23'900.21 hectáreas, representando el 10,70% del total autorizado, mediante la aprobación de 1175 programas, como el Programa de Aprovechamiento Forestal Simplificados (PAFSi) (Tene *et.al.*, 2011 p.6). En la **Tabla 2.3** podemos observar que la provincia de Pastaza se ubica en cuarto lugar con 24'907.63 m³ de madera, en 1'111.35 hectáreas y 146.00 programas (Tene *et.al.*, 2011 p.7).

Tabla 2.3. Aprovechamiento forestal en bosque nativo por provincias en el año 2010

PROVINCIA	VOLUMEN APROBADO	SUPERFICIE AUTORIZADA	CANTIDAD DE PROGRAMAS
Esmeraldas	161 633,27	6 114,59	118,00
Sucumbíos	101 567,82	7 666,05	336,00
Orellana	54 123,63	4 389,10	277,00
Pastaza	24 907,83	1 111,35	146,00
Morona Santiago	19 494,73	2 015,48	140,00
Zamora Chinchipe	19 400,33	1 512,09	48,00
Napo	13 679,82	677,55	100,00
Imbabura	1 308,43	156,00	8,00
Santa Elena	180,08	251,00	1,00
Carchi	148,46	8,00	1,00

Fuente: Tene *et.al.*, 2011

2.1.4. Explotación del Pigüe

El Pigüe es una especie del bosque nativo de la Amazonia. Su aprovechamiento se localiza en 8 provincias, principalmente en Pastaza, Morona Santiago, Napo y Zamora Chinchipe. Su explotación es autorizada mediante la emisión de formularios (11043), que son parte de programas (83) a nivel nacional, con 132'948.35 m³ aprovechados con un incremento del 14% en relación al pasado año (Tene *et.al*, 2011p.7). El volumen producción de madera de los bosques nativos estudios realizados por el Ministerio de Ambiente del Ecuador MAE, como podemos observar representa el 31,18% es de Pigüe (*Pollalesta discolor*) especie pionera en la provincia de Pastaza, para uso industrial en el proceso.

2.1.5. Distribución natural del Pigüe

El Pigüe está distribuido por toda la región amazónica formando extensos bosques secundarios, encontrándose el centro de mayor densidad en el Puyo (**Ver Mapa 1**). Además, la mejor zona para el Pigüe está en el área comprendida en un radio de 25 a 30 Km. Se encuentra desde los 500 hasta los 1500 m.s.n.m en estado normal de desarrollo. Sin embargo su mayor desarrollo está entre los 900 y 1000 m.s.n.m y a temperatura media de 20 °C (Espinoza y Moser citado en Merino, 2011, p.33).

Mapa 1. Distribución natural del Pigüe en la región amazónica centro-sudamericana.



Fuente: Erazo *et.al.*, 2014

2.1.6. Clasificación y descripción botánica

Pertenece a la familia *Asteraceae*, son plantas herbáceas anuales o perennes, su característica principal, agrupar las flores en una inflorescencia compuesta como escamas floral, una especie

pionera, se regenera en forma natural en claros. El árbol es de madera blanda y de crecimiento rápido con una altura máxima de 30 m; el diámetro del tronco es de aproximadamente 60 cm con forma cilíndrica y presenta ramificaciones por encima del tercio inferior. Crece en suelos limosos y arcillosos, que posean buen drenado (Merino, 2011, p.34).

2.1.7. Usos del Pigüe

El aprovechamiento del Pigüe se realiza mediante la comercialización en troza destinada a los aserraderos; donde es aprovechado por procesos de transformación primaria destinada fundamentalmente a la construcción; también es comercializada en forma de latilla o tablilla para cajonería como envase y transporte de fruta. Otro de sus usos es en la elaboración de panela y como combustible (Erazo, *et.al.*, 2014, p.1; Merino, 2011, p.36).

2.2. Biomasa

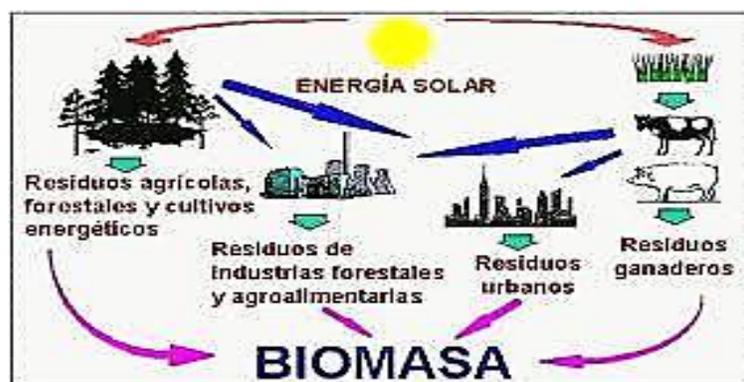
La biomasa es toda la materia orgánica que se puede convertir en energía. A partir de esta definición se entiende entonces que la misma puede obtenerse a partir de plantas, árboles, desechos de animales, agricultura, aserraderos y residuos urbanos, etc. (Madrid, 2012, p.9).

Una de las directivas de la Unión Europea destinada al tema de las energías renovables define a la biomasa como: “fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias y forestales, así como de los residuos industriales y municipales” (Madrid, 2012, p.9).

2.2.1. Categorización de la biomasa

En la **Figura 2.2** podemos apreciar la clasificación de la biomasa de forma gráfica, considerando el origen y fuentes de biomasa energética (Madrid, 2012, p.9).

Figura 2.2. Origen y fuentes de biomasa energética



Fuente: www.google.com

2.2.1.1. Clasificación de la biomasa según su origen

- **Fuentes vegetales** procedente de cualquier parte de la planta, considerado también como residuos (agrícolas, forestales, madera), diversos cultivos (maíz, caña de azúcar, soja, entre otros).
- **Fuentes animales** procedentes de cualquier parte del animal, que se considera como residuo (pezuñas, cuernos, sangre, entre otros).
- **Fuentes industriales diversas** que proceden de las diferentes actividades realizadas a nivel de fábricas e industrias de todo tipo, consideradas como residuos (agrícolas, alimenticios, forestales, entre otros).
- **Actividad humana**, generada por la acumulación de basura, que son residuos sólidos y aguas residuales (Madrid, 2012, p.10).

2.2.1.2. Clasificación de la biomasa según su aplicación

- **Biomasa Térmica:** es la utilizada para el suministro de calor mediante la aplicación de tecnologías, se usa para la obtención de agua caliente sanitaria y procesos industriales. Entre los tipos de biomasa para el uso térmico están los procedentes de industrias agrícolas, industrias forestales (astillas, aserrín, virutas, entre otras), y actividades silvícolas, incluido los cultivos leñosos (podas, leñas, entre otras). La biomasa es transformada en briquetas, *pellets*, astillas, etc. mediante técnicas de compactación (Madrid, 2012, p.24).
- **Biomasa Eléctrica:** es la utilizada para la generación de energía eléctrica; se puede utilizar de forma exclusiva y como sistema de cogeneración o co-combustión (2 combustibles, un fósil junto con biomasa), de esta manera se puede obtener energía eléctrica y térmica (Madrid, 2012, p.24).

2.2.2. Ventajas y desventajas de la biomasa como recurso energético

2.2.2.1. Ventajas

- Nueva energía renovable disponible que se puede almacenar y se puede encontrar disponible en momentos de necesidad para la producción de calor, electricidad o biocarburantes.

- Combustible poco peligroso en estado seco o tiene un riesgo limitado, para lo que se requiere de un control en las condiciones de almacenamiento, detectores de incendios y medios de extinción.
- Representa una mejora en la situación de los agricultores y productores forestales, por la reutilización de residuos, confiriendo valor agregado y generación de fuentes de empleo.
- Fuente de energía versátil, esto se debe a que la biomasa puede producir diversas formas de energía como calor, electricidad y biocombustible.
- Reduce la producción de gases con efecto invernadero.
- Representa un paliativo a la contaminación, ya que constituye una forma de reciclaje energético mediante el uso de la biomasa de residuos (Damien, *et al.*, 2010, p.249-252).

2.2.2.2. Desventajas

- Transporte de larga distancia de la biomasa (Damien, *et al.*, 2010, p.247).
- El rendimiento de las calderas es inferior.
- Menor densidad energética, lo que conlleva a que los sistemas de almacenamiento sean mayores.
- Los sistemas de alimentación de combustible y eliminación de cenizas requieren de mayores costes de operación y mantenimiento.
- Los canales de distribución de la biomasa no están tan desarrollados.
- La mayoría de recursos poseen elevados contenidos de humedad, para lo que se requiere la aplicación de procesos previos de secado (Madrid, 2012, p.95-96).

2.2.3. Densificación de la biomasa

La densificación o compactación es un proceso donde la biomasa (viruta, astillas, aserrín, etc.), aumenta su densidad teniendo como resultado productos combustibles densificados. Los mismos presentan propiedades y dimensiones homogéneas, con un alto poder calorífico y forma de dosificación más eficiente. Mediante la automatización de los sistemas de alimentación y control de combustión el uso del combustible densificado es propicio como energía térmica, reduciendo gastos de transporte y almacenamiento; además que facilita las

operaciones de envasado y mantenimiento (Soto y Núñez, 2008, p.2). Hace unas décadas el proceso de densificación se aplicaba en la elaboración de alimentos para animales conocidos como piensos. Utilizando este mismo sistema en la biomasa de origen vegetal y de diversas industrias se producen *pellets* y briquetas (Arpi, y Calderón, 2010, p.81).

2.2.3.1. Características energéticas de los densificados

Las briquetas y *pellets* son principalmente los productos obtenidos por la densificación de residuos, por tanto cada uno posee características energéticas similares. El aserrín compactado en briquetas y *pellets*, tiene un mayor poder calorífico e comparación a la leña utilizada comúnmente; es de encendido rápido, y sobre todo al momento de quemar no produce humo ni olores; su reutilización permite disminuir la tala indiscriminada y evitar la pérdida de bosques (Arpi y Calderón, 2010, p.81).

En la **Tabla 2.4.** tenemos las principales características físicas, químicas y físico-químicas que tienen los productos densificados para el comportamiento energético.

Tabla 2.4. Características físicas, químicas y físico-químicas de briquetas y *pellets*.

Propiedades	Indicadores	Unidades
Físicas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Forma 2. Tamaño 3. Aspecto (color, brillo) 4. Densidades 5. Humedades 6. Friabilidad 	<p>....</p> <p>....</p> <p>....</p> <p>Kg/dm³</p> <p>%</p> <p>Índice</p>
Químicas	<ol style="list-style-type: none"> 3. Composición química elemental 4. Composición química por compuestos 5. Poderes caloríficos 	<p>%</p> <p>%</p> <p>KJ/kg, kcal/kg</p>
Físico - Químicas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coeficiente de conductividad térmica 2. Combustibilidad e inflamabilidad: Temperaturas y tiempos de combustión e inflamación. 3. Temperatura máxima de llama 4. Potencia calorífica 5. Densidad energética 	<p>W/m.s</p> <p>°C, s</p> <p>°C</p> <p>J/(kg.s)=w/kg KJ/dm³</p>

Fuente: Arpi y Calderón, 2010

2.3. Potencial del Pigüe para biomasa energética

Del procesamiento del Pigüe se pueden obtener productos maderables acabados, otros subproductos de la madera y residuos (Tene *et.al.*, 2011, p.16). Además, en los aserraderos de la provincia de Pastaza se genera un volumen aproximado de biomasa que se desaprovecha anualmente como son: aserrín 7.712,43 m³, canteado 8.942,42 m³ y corteza 3.919,06 en relación al volumen de madera aprovechada que fue de 30.334,02 m³ (Pérez, 2016), lo que representa otra oportunidad para crear valor agregado. El presente trabajo plantea una vía de utilización para los residuos, como es la pelletización del aserrín de Pigüe o elaboración de *pellets*, conocidos como biocombustibles sólidos densificados. La elaboración y comercialización de *pellets* permite la reducción y aprovechamiento de los residuos, reduciendo también el volumen para su transportación. La combustión de los *pellets* de Pigüe es más limpia que la de los combustibles tradicionales basados en hidrocarburos, lo que contribuye a la reducción del daño ambiental (Arpi y Calderón, 2010, p.72).

2.4. Características físicas de los residuos forestales

2.4.1. Densidad aparente

La densidad aparente se refiere a la masa del material por unidad de volumen aparente (volumen total = volumen del gránulo + volumen intersticios). Como el volumen aparente es mayor que el volumen real (gránulo), esto debido a los espacios (intersticios) que están presentes en medio de estos, la densidad aparente es menor que la densidad real, ya que esta se mide sin tomar en cuenta los huecos entre las partículas. El poder calorífico y la densidad aparente determinan la densidad de energía que es, la energía potencial disponible por unidad de volumen de la biomasa. En general, las densidades de energía de la biomasa son aproximadamente un décimo de los combustibles fósiles tales como el petróleo o carbón de alta calidad (Toscano, 2009 citado en Portero, 2014, p.31).

2.4.2. Humedad

La humedad es una variable importante a considerar debido a su influencia en el poder calorífico ya que determina el aprovechamiento energético en las maderas; como promedio, los desechos de la madera presentan un contenido de humedad sobre el 50% (Yánquez, 2012, p.26). Para el procesado de la materia prima (aserrín), el contenido de humedad óptimo es de

8-12% (Portero, 2014, p.31). Esta se puede medir tanto en base seca como en base húmeda mediante el uso de expresiones dadas (Yánquez, 2012, p.26). De acuerdo al contenido de humedad se puede establecer una clasificación de las maderas que se muestra en la **Tabla 2.5**.

Tabla 2.5. Denominación de la madera según el contenido de humedad

% HUMEDAD	DENOMINACIÓN
>30	Madera Saturada
30-23	Madera Semi-Seca
22-18	Madera Comercialmente Seca
17-13	Madera Secada al aire
<13	Madera Desecada

Fuente: Yanquez, 2012

Como se muestra en la **Tabla 2.4**, los rangos de humedad y su denominación varían ampliamente en sus límites. Por ejemplo, porcentajes del 30% corresponden a una madera saturada de humedad, que a su vez quiere decir que corresponden a un árbol recién cortado. Los valores de humedad pueden variar de acuerdo a la región de procedencia, especie forestal y la época del año (Yánquez, 2012, p.27). Porcentajes de humedad elevados afectan los procesos de transformación de la madera, como el aserrado, cepillado, barnizado, etc. Al mismo tiempo influyen en el tiempo de duración, peso, resistencia y dimensiones, entendiéndose que una madera que adquiere más humedad estará hinchada; por tanto, si disminuimos su humedad reducirá su tamaño (Yánquez, 2012, p.27).

La madera verde contiene agua en los siguientes estados:

- **Líquida**, contenida en los lúmenes celulares;
- **Vapor de agua**, rellena los espacios vacíos de los lúmenes;
- **Forma higroscópica**, en el interior de paredes celulares.

Por tanto, es necesario determinar el contenido de humedad antes de aplicar técnicas de secado en dependencia al uso final (Yánquez, 2012, p.24).

Con respecto al poder calorífico, este será menor mientras mayor sea la humedad, ya que se reduce la materia seca por unidad de masa. Al quemar la materia seca se genera calor, el cual puede ser consumido por el agua si esta forma parte de la troza en forma de humedad. De esta

forma, el agua reduce el calor suministrado porque este calor se consume para evaporar el agua, haciendo que la reacción de combustión se revierta, teniendo como resultado una disminución del poder calorífico (Yánquez, 2012, p.27).

2.4.3. Contenido de humedad

Como regla general, los materiales maderables están constituidos de materia seca y agua. De este modo, se establece que la masa total del material (m_t), es igual a la suma de la masa seca (m_s) y masa del agua (m_{H_2O}) (Portero, 2014, p.32).

Masa total

$$m_t = m_s + m_{H_2O} \quad (2.1)$$

Fuente: Martínez, 2010 citado en Portero, 2014, p.32

Donde

m_t = es la masa total,

m_s = es la masa seca

m_{H_2O} = es la masa de agua

El contenido de humedad en base húmeda permite identificar la composición de materia seca (0%), y la composición de agua (100%). En algunas situaciones es útil representar la masa de agua que contiene la muestra en relación a la masa total, teniendo en cuenta que la masa del agua es menor a la masa total del material (Portero, 2014, p.32). De esta forma. El porcentaje de humedad en base húmeda puede calcularse como:

Porcentaje de humedad en base húmeda

$$\%H_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_t} * 100 \quad (2.2)$$

Fuente: Martínez y Lira 2010 citado en Portero, 2014, p.33

Donde

H_{bh} = porcentaje de humedad en base húmeda

m_t = es la masa total

m_{H_2O} = es la masa de agua

2.4.4. Secado de la madera

El secado de la madera empieza desde el momento en que el árbol es talado; este proceso se acelera en el descortezado y es aún más rápido cuando se utilizan maquinarias con sierra. Además, al poner la madera en contacto con el aire se favorece la evaporación del agua. Dependiendo de los estados ambientales y, de la humedad del aire y la madera, se pueden determinar los parámetros para alcanzar un secado de calidad. Los procesos de secado pueden ser natural o artificial; este último se conoce también como secado forzado (Yanquez, 2012, p.29).

2.4.5. Poder calorífico

El poder calorífico es una característica principal de los biocombustibles. Es la cantidad de energía que se obtiene por la combustión total de un kilogramo depende fundamentalmente de la humedad y la densidad. Mientras mayor es la densidad y menor el contenido de humedad, se elevará el poder calorífico del material (Chang, y Del AGuila, 2013, p.22). La medición de este tipo de parámetro considera el poder calorífico superior (PCS), y poder calorífico real (PCR), valores que van de acuerdo a la técnica utilizada para su efecto.

- Poder calorífico superior (PCS)

El valor del poder calorífico superior se mide con una bomba calorimétrica, su resultante es el calor que genera un kilogramo de biomasa forestal; se lo conoce también como calor de combustión superior.

- Poder calorífico inferior (PCI)

Es el calor desprendido por un kilogramo de biomasa forestal, en una combustión en la que el agua libre se libera en forma de vapor. Si esta agua se condensa desprendería calor y obtendríamos entonces el PCS, añadiendo al PCI este calor desprendido. El PCI es menor que el PCS, y cuanto mayor es la humedad mayor resulta esta diferencia.

- Poder calorífico real o efectivo (PCR):

Se obtiene multiplicando el PCI por el rendimiento de la combustión que a efectos prácticos suele ser de 0,85.

2.5. Biocombustibles sólidos

El biocombustible sólido es el conjunto heterogéneo de materias orgánicas, de origen biológico reciente, que al combinarse con el oxígeno se produce la combustión y se libera energía. Entre ellos se encuentran la leña sin procesar, astillas (chips), aserrín y triturados finos, *pellets*, briquetas y carbón vegetal (Arpi J.; Calderón C., 2010). En la **Tabla 2.6** se especifica las propiedades y características de los diferentes tipos de biocombustibles y maderas (Yanquez, 2012, p.37).

Tabla 2.6. Aspecto físico de los principales biocombustibles

PRINCIPALES BIOCOMBUSTIBLES	ASPECTO FÍSICO
Leñas	Sólido
Astillas	
Briquetas	
<i>Pellets</i>	
Carbón vegetal	
Líquido piroleñoso	Líquido
Líquido de hidrólisis	
Bioetanol	
Bioaceite	
Metiléster	Gaseoso
Biogás	

Fuente: Martín, 2001 citado en Yanquez 2012

La principal fuente para los biocombustibles sólidos se encuentra en los bosques, de donde se originan subproductos de trabajos silvícolas o de recogidas (árboles, cepas, ramas, etc.), y de maderas con poco valor (troncos pequeños, leña, etc.); estos son utilizados como energía térmica en forma de madera-energía. Los residuos generados en las fábricas se constituyen como segunda fuente. El Institut Technique Européen du Bois-Energy ITEBE facilita una aproximación de los valores medios de los sub-productos como son: 21% de corteza, 10.5% de aserrín, 21% entre astillas y virutas, y el 3.2% de tacos cortados de listones de madera (Damien, et al., 2010, p.195). Además, hay cultivos específicos que una vez secos son quemados en calderas automáticas individuales. Los residuos de la agricultura también son reutilizables, con requerimiento de adaptación de maquinarias para su recolección, por lo que

en la actualidad son triturados y extendidos en los campos como materia orgánica (Damien, et al., 2010, p.195).

2.5.1. Leña

La leña se utiliza con frecuencia en zonas rurales como fuente de calor tradicional, cuyo uso se ha ido desarrollando en zonas urbanas como consecuencia al aumento del precio de combustible y el deseo de contar con el fuego en la chimenea. La leña tiene un contenido de humedad que va desde el 15% al 40%, dependiendo de las condiciones de almacenamiento como la humedad del aire, temperatura y exposición a la intemperie. Para el uso de leña en calderas, la leña debe estar con un contenido de humedad inferior al 25% (Damien, et al., 2010, p.195).

2.5.2. Astillas forestales

Son residuos generados de la explotación forestal de corta duración, para su obtención se requiere de las operaciones de tala del árbol, limpieza del tronco, recolección de troncos, reducción de tamaño hasta astillas, transporte y secado. En estado bruto la humedad de estos residuos es del 20% a 50%; se mide en toneladas o en MAP (metro cúbico aparente de astillas). Las características de las astillas para su entrega son:

- Humedad de 20 a 30% después del secado.
- Densidad de 250 a 350 kg/m³ (en función de la humedad).
- Dimensión aproximada de 4cm x 5cm x 0,5cm.

Las astillas pueden clasificarse en:

- **Astillas blancas**, destinadas a la industria de pasta de papel, se obtienen de la madera sin corteza, con tolerancia < 1-2%;
- **Astillas grises**, destinadas a la industria de fabricación de paneles, se obtienen de ramas que contienen cortezas;
- **Astillas verdes**, utilizados en las propias fábricas para cubrir necesidades como el secados de madera y locales; provienen de la madera fresca (cortezas, ramas, hojas, entre otras) (Damien, et al., 2010, p.196).

2.5.3. Gránulos o *pellets*.

Los *pellets* son gránulos estandarizados, cilíndricos, con diámetro de 5 a 10 mm y longitud de 10 a 30 mm). Está constituido por virutas, aserrines y astillas molidas, que proceden de residuos de madera de aserríos, industrias forestales y agroforestales. Los *pellets* son obtenidos por la aplicación de altas presiones, provocando la subida de temperatura hasta 90°C, lo que hace que la lignina se funda que mediante el enfriamiento se solidifica, interviniendo como agente ligante (Arpi y Calderón, 2010, p.86). Los *pellets* deben tener un contenido de humedad entre los 7 a 12%, con densidad media de 650 a 700 kg/m³, y un contenido de cenizas inferior al 0,7% sobre masa seca (Damien, et al., 2010, p.197).

2.5.4. Virutas y aserrín.

Las virutas y el aserrín son subproductos que se obtienen de las operaciones realizadas en la madera como el aserrado, taladrado y cepillado. Los mismos representan una especie de polvo más o menos grueso, con propiedades químicas idénticas a la composición química de la madera (Medrano y Pallasco, 2015, p.25). Estos son recogidos directamente en las zonas de maquinarias, en dependencia al uso que se le dé posteriormente. Por la relación: superficie de contacto con el aire/masa, se facilita el secado desde el 50-70% hasta menos del 20% de humedad. Estos materiales son utilizados para la fabricación de tableros, camas para animales, producción de gránulos para calderas o producción de vapor. La cantidad de aserrín que se produce es del 10 al 12% con base al total de madera entrante. Mediante el proceso de compresión podemos utilizar estos productos en la fabricación de briquetas o troncos reconstituidos, y gránulos o *pellets* (Damien, et al., 2010, p.199).

Figura 2.3. Obtención del aserrín en los aserraderos



Fuente: Janeth Cárdenas, 2016

2.5.4.1. Usos del aserrín

Dependiendo de los tratamientos aplicados al aserrín, este tiene una amplia gama de usos prácticos en áreas como (Medrano y Pallasco, 2015, p.26):

Agricultura

- Para camas en galpones y criaderos de animales (aves, ganado, cerdo).
- Utilizándolo en bajas porciones ayuda al cultivo de plantas.
- Sustrato para abono orgánico.
- En plantaciones sirve como material de conservación de la humedad del suelo
- Material para la recuperar suelos degradados.

Industria

- Combustible para la obtención de vapor en calderas, en hornos secadores, en cocinas y estufas.
- En la producción de carbón activado.
- Pirolisis y gasificación.
- En procesos de filtración de líquido y limpieza de suelo.
- Fabricación de fertilizantes, briquetas, pulpas, *pellets*, tableros aglomerados, ladrillos, etc.
- Embalaje de paquetes (material, adsorbente y de limpieza).
- Fabricación de monigotes.

Construcción

- Preparación de masillas, aglomerados, entre otros materiales diversos de construcción.

2.5.6. Carbón de madera.

El carbón de madera tiene un contenido de carbono comprendido entre el 50% y el 95%. Presenta un contenido de cenizas está normalmente entre el 0.5% y el 5%, correspondiendo el

3% a un carbón de calidad, lo que depende de la especie del árbol, la contaminación posterior con tierra y la cantidad de corteza. Este material absorbe agua con facilidad, por lo que se requiere proteger durante su almacenamiento y transporte; la friabilidad del producto y la manipulación favorece a la formación de polvo. Las características del producto son: 75% contenido de carbono, 20% contenido en materias volátiles, 5% contenido de cenizas y densidad comprendida entre 0.25 y 0.30 (Damien, et al., 2010, p.200).

2.6. Poder calorífico de biocombustibles derivados de la madera.

La **Tabla 2.7.** muestra los valores de poder calorífico para los diferentes biocombustibles derivados de la madera, la transformación y el tipo de proceso aplicado para su obtención (Yanquez, 2012, p.37).

Tabla 2.7. Propiedades de los biocombustibles derivados de la madera

BIOCOMBUSTIBLE	TRANSFORMACIÓN	PROCESO	Poder Calorífico Superior Anhidro (Kcal/Kg.)
Leñas	Física	Fragmentación	4500 -5300
Astillas	Física	Fragmentación	4500 -5300
Briquetas de madera	Física	Fragmentación, secado y compactación	4500 -5300
<i>Pellets</i>	Física	Fragmentación, secado y compactación	4500 -5300

Fuente: Martín, 2001 citado en Yanquez 2012

2.7. Pellets

Los *pellets* son elementos densificados de forma cilíndrica con diámetros comprendidos normalmente entre 6-12 mm y longitudes de 10-30 mm. El densificado permite elevar la densidad del poder calorífico, además al ser homogéneos en propiedades y dimensiones. También permiten la automatización de los sistemas de alimentación y control de la combustión (Yánquez, 2012, p.40). Este tipo de biocombustible modificado es obtenido en una matriz por la aplicación de altas presiones y no contiene aditivos artificiales. Se obtiene a partir de residuos procedentes de la industria maderera mediante procesos industriales. Su contenido promedio de humedad es de 8 a 10% (Lipsia, 2011, p.1).

Los *pellets* son considerados como biocombustibles que poseen un alto poder calorífico; son económicos, fáciles de transportar, limpios, ecológicos y son energía renovable; al combustionar libera el carbono que el árbol absorbió durante su vida lo que permite un balance del CO₂ (Chang y Del Aguila, 2013, p.23; Lipsia, 2011, p.2).

2.7.1. Características físicas

2.7.1.1. Forma y Tamaño.

La diferencia entre los *pellets* y briquetas u otros combustibles densificados es el tamaño, lo que facilita la manipulación y automatización en su almacenamiento y dosificación, permitiendo utilizar medios mecánicos de una manera rápida y eficiente (Arpi y Calderón, 2010, p.87). El tamaño de los *pellets* varían de acuerdo a normativas establecidas por cada país, comprendidas en un rango que no exceda de los 25 mm de diámetro y con longitud variable entre los 10 y 35 mm (Yunquez, 2012, p.40).

Figura 2.4. Forma y tamaño de *pellets*



Fuente: www.google.com

2.7.1.2. Densidad

La densidad de los *pellets* varía de acuerdo al grado de compactación aplicado a la biomasa y el contenido de humedad, entre otros parámetros. Es una de las características principales a considerar para la comparación con otros tipos de biomasa, facilitando su uso y manejo. El proceso de densificación permite transportar grandes cantidades de producto ocupando menos volumen con igual peso (Paredes, 2014, p.54). Cuando el material tiene una alta densidad

natural, este ejerce mayor resistencia a la compresión, necesitándose aplicar mayor presión para conseguir un alto nivel de compactación (Paredes, 2014, p.54). La densidad promedio en los *pellets* es de 1000 a 1200 Kg/m³; cuando su distribución es a granel la densidad es de 800m³ (Arpi y Calderón, 2010, p.82).

2.7.1.3. Humedad

El contenido de humedad para la elaboración de *pellets* debe estar entre 10 -15%, lo que permite ahorro en los costes de energía. La carencia o exceso de humedad dificultan el trabajo de compactación y contribuye a la formación de grietas, lo que conlleva a deformaciones en los productos densificados (Arpi y Calderón, 2010, p.82). Por lo general al aumentar la humedad en la obtención de *pellets* aumenta la emisión de gases volátiles, los residuos sólidos o ceniza, disminuye el poder calorífico y la efectividad energética.

2.7.1.4. Friabilidad

La friabilidad es un parámetro utilizado para medir la resistencia y dureza de los combustibles densificados, a los golpes o abrasión que se dan, como consecuencia al manejo y transporte (Portero, 2014, p.39). Es una variable que debe controlarse en el proceso de obtención de los *pellets* porque tiene una alta influencia en la transportación de este material y la forma de su almacenamiento. Esta característica física varía en relación a la materia prima y a los equipos utilizados en los procesos para su obtención.

- **Ensayo de friabilidad**

Para determinar la friabilidad se aplica el método del *golpeteo contra el suelo* que consiste en dejar caer 100 *pellets* en un suelo cerámico desde un metro de altura. El golpeteo de los *pellets* permite contabilizar el número de *pellets* o fracciones de *pellets* de las unidades que se rompen (Arpi y Calderón, 2010, p.91).

2.7.2. Características químicas

2.7.2.1. Contenido de Cenizas

Es el residuo sólido no aprovechable energéticamente que resta al combustionar la biomasa. El valor del contenido de cenizas en *pellets* está normado debido a la influencia en la emisión de partículas no biodegradables fácilmente, y por los costos de tratamientos para su eliminación;

aunque en ciertas cantidades puede ser utilizado en la elaboración de fertilizantes. Un mayor contenido de cenizas nos indica un biocombustible de baja calidad menor y menor aprovechamiento de la biomasa (Paredes, 2014, p.134).

2.7.2.2. Poder calorífico

El poder calorífico es la principal característica de los *pellets* y representa la cantidad de energía que se desprende al quemar un kilogramo de *pellets*. El mismo que puede estar influenciado por diversos factores como procedencia de la madera.

2.7.2.3. Cálculo del poder calorífico mediante análisis bromatológico

Para determinar el poder calorífico de sustancias sólidas que son utilizadas como combustible, aplicamos técnicas y formulaciones en base al análisis bromatológico o de alimentos. Para ello es necesario determinar características químicas representadas en porcentajes, como son: fibra, proteína, grasa, carbohidratos totales por diferencia, humedad y cenizas (Tingo y Fonseca, 2012, p.106).

2.7.3. Uso de los *pellets*

La calidad final de los *pellets* y el origen de la materia prima determina el uso final de los *pellets* en:

- **Uso industrial:** para la generación de electricidad y en la industria metalúrgica en el funcionamiento de grandes hornos, etc.
- **Uso en pequeñas y medianas instalaciones:** en sistemas de calefacción y producción de agua caliente en viviendas, polideportivos, etc. A nivel doméstico se utiliza en instalaciones de calefacción como las estufas, calderas y chimeneas; en el mercado se ofertan modelos de hornos y cocinas domésticas.

El desarrollo de la tecnología ha llegado al nivel de la automatización en busca del confort adaptando instalaciones y equipos que inicialmente usaban gas al uso automático de *pellets*, alcanzando altos rendimientos y disminución de emisiones (Yánquez, 2012, p.47).

2.8. Proceso de pelletizado

El proceso de pelletización empieza con la recogida y picado del aserrín. Pasa por un secador con la finalidad de normalizar el contenido de humedad. La reducción de partículas es posible mediante el uso de molinos, lo que permite mejorar el rendimiento energético en la combustión. Como paso final se produce la compactación en forma cilíndrica, obteniéndose el producto final: los *pellets* (Madrid, 2012 p.91).

En la actualidad existe la normativa de referencia para *pellets*, es la DIN 51731 a nivel Europeo, para todo el proceso de fabricación y comercialización. A instancias del “*European pellet counsin*” (EPC) o Consejo Europeo del Pellet se han elaborado diversas normas, destacando la normativa EN 14961, que regula las especificaciones que deben cumplir los biocombustibles sólidos. Para el pellet de madera de uso no industrial, la norma concreta es la EN 14961-2:2011, siendo desarrollada por AENOR con las siguientes especificaciones (BUREBA, 2012) ver **Tabla 2.8**. La norma distingue tres calidades en los *pellets*, según las siguientes características: p.2-3

Tabla 2.8. Propiedades de los *pellets* según normativa EN 14961-2:2011

Propiedad	Pellet baja calidad	Pellet estándar	Pellet alta calidad
Origen	Biomasa leñosa sin corteza		
Diámetro (D)	D 6 ± 1 mm ó D 8 ± 1 mm		
Longitud (L)	L 5 – 40 mm		
Humedad base humedad (M)	M $10 \leq 10\%$		
Cenizas (A)	A $0,5 \leq 0,5\%$		A $1,0 \leq 1,0\%$
Durabilidad (DU)	DU $96,5 \geq 96,5\%$	DU $97,5 \geq 97,5\%$	DU $95,0 \geq 95\%$
Finos (F)	F $1,0 \leq 1\%$	F $2,0 \leq 2\%$	F $3,0 \leq 3\%$
Poder Calorífico (Q)	16,5 (MJ/kg) ó 4,6 (MJ/kg)		
Densidad aparente (BD)	≥ 625 kg/m ³ suelto		≥ 600

Fuente: BUREBA, 2012

2.8.1. Materia prima

El aserrín constituye la materia prima para la elaboración de *pellets*; es recogida y almacenada en sitios de almacenamiento libre de posibles agentes dañinos o cualquier otro tipo de materiales distintas a la madera (Tingo y Fonseca, 2012, p.96).

2.8.2. Secado

Para conseguir un pelletizado exitoso el contenido de humedad de la materia prima debe estar comprendida en el rango de 8 al 15%. La utilización de sistemas de secado permite disminuir el contenido de humedad del aserrín, con valores característicos superiores al 50%. Al igual que el secado de la madera, se puede secar el aserrín de forma natural o mediante secado forzado (Arpi y Calderón, 2010, p.118).

2.8.3. Granulometría

La distribución de partículas permite separar fracciones con dimensiones específicas, la aplicación diferenciada puede contribuir a mejorar la calidad de la biomasa como fuente de energía, de materiales compuestos y químicos (Silva *et al.* 2011 citado en Correa-Méndez et al., 2014, p.3). Es importante conocer las dimensiones y distribución granulométrica de partículas de las materias primas antes de la aplicación de los procesos de densificación (Miranda *et al.* 2012 citado en Correa-Méndez et al., 2014, p.3).

2.8.3.1. Análisis de granulometría

El tamaño de la materia prima a pelletizar, debe contar con factores geométricos en referencia al tamaño. La dimensión de las partículas está en dependencia del diámetro del agujero de compactación. Tomando en cuenta el diámetro y longitud del pellet, la granulometría de la materia prima debe ser inferior a los 8 mm. Considerando que los residuos generados en los aserraderos es variable, se determina su dimensión mediante un análisis de tamaño para posteriormente implementar un proceso de molido según requerimientos y obtener un compactado eficiente (Arpi y Calderón, 2010, p.143).

2.8.4. Molido

El molido permite conseguir una mayor homogeneidad y granulometría adecuada, considerando que las partículas deben ser de 0.3 mm a 0.5 mm. El proceso de molido se puede realizar en diferentes tipos de molinos que cumplan con las especificaciones anteriores; entre los tipos de molinos se tiene el molino de disco, molino de martillos, molino de rodillos y molino de bolas (Arpi y Calderón, 2010, p.142).

2.8.5. Presión de compactación

La compactación de biomasa es posible mediante la aplicación de presiones comprendidas entre 1100 Kg/cm² a 2500 Kg/cm², que dependen de las características de las especies maderables (Portero, 2014, p.34).

2.8.6. Calor aplicado exteriormente

Para conseguir que los procesos de densificación sean más acentuados, es preciso controlar la humedad y la temperatura. Aplicar calor al material en el proceso de formación permite la cohesión, lo que conlleva a reducir la aplicación de presión para obtener la densidad deseada. La aplicación de calor exterior se justifica porque al incrementar la temperatura entre los 80°C y 200°C la lignina modifica su estructura y se reblandece; en el proceso inverso de enfriamiento, en cambio, la lignina actúa como agente aglutinante natural que permite una mayor unión de partículas. En la naturaleza, la lignina es un componente de las fibras de madera que actúa como cola termoplástica (Portero, 2014, p.36).

2.9. Herramientas estadísticas

2.9.1. Diseños experimentales

Son procedimientos estadísticos para planificar un experimento, i.e. el coleccionar datos apropiados los cuales, luego de su análisis por métodos estadísticos, resultan en conclusiones válidas. El diseño incluye la selección de las unidades experimentales, la especificación de las condiciones experimentales (i.e. la especificación de los factores cuyo efecto será estudiado en los resultados de los experimentos), la especificación de los niveles de los factores involucrados y la combinación de tales factores, la selección de la respuesta a ser medida, y la elección del modelo estadístico para ajustar los datos (Box, Hunter, & Hunter, 1978). Entre los diseños experimentales más conocidos se encuentran los Diseños Factoriales Completos, los Diseños Factoriales Fraccionados, los Diseños estratificados, los Diseños Compuestos, los Diseños Óptimos y los Diseños de Mezclas.

2.9.2. Análisis de Regresión

Este término representa un conjunto de métodos estadísticos que usan ecuaciones matemáticas para modelar la relación entre una respuesta medida u observada y una o más variables

predictoras. El objetivo de este análisis es doble: modelar y predecir. La relación se describe en formas algebraica como:

$$y = f(x) + e$$

Con f una función en el caso más simple lineal, de las componentes del vector x . en el caso lineal, el problema puede ser expresado en forma matricial $Y = B \bullet X + E$.

Donde, x denota la(s) variable(s) predictora(s), y la(s) variable(s) respuesta(s), $f(x)$ es la parte sistemática del modelo, y e es el error aleatorio, también conocido como error o residual del modelo. En la forma generalizada contigua: \mathbf{Y} , es el vector de las respuestas para cada uno de los datos de aprendizaje; \mathbf{B} es el vector constante de coeficientes de regresión a ser estimados; \mathbf{X} se denomina usualmente la matriz de datos, i.e. sus columnas son las variables independientes usadas en el modelo de regresión y sus filas representan los datos de aprendizaje; \mathbf{E} , es el vector de los errores aleatorios intrínsecos al modelo correspondiente. La ecuación matemática usada para describir la relación entre la(s) variable(s) respuesta(s) y la variable(s) predictora(s) se denomina modelo de regresión. (Draper & Smith, 1998; Frank & Friedman, 1993; Ryan, 1997; Wold, 1994) (Draper, 1998)

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización

Para la realización del trabajo experimental, en primer lugar se procedió a la recolección de muestras. Para su efecto se contó con la colaboración del aserradero particular “San Francisco”, propiedad del Sr. Don Pedro Pilla, que se encuentra ubicado en la vía Baños-Puyo, sector La Primavera de la parroquia Puyo, del cantón Pastaza y provincia de Pastaza.

Como paso siguiente se procedió a realizar el análisis correspondiente a la materia prima (aserrín) y producto final (*pellets*) en el Laboratorio de Bromatología, perteneciente a la Universidad Estatal Amazónica UEA, localizada en la Provincia de Pastaza. Km 2½, vía Napo (paso lateral). Mediante la aplicación de diversas técnicas, se determinaron las propiedades físico-químicas, térmicas de la materia prima y producto final, planteados en el objetivo del trabajo de investigación y desarrollo.

El proceso de pelletización del aserrín de Pigüe (*Pollalesta discolor*), fue realizado por la autora del trabajo en un prototipo de maquinaria a baja escala, con requerimientos de presión y control de temperatura para la compactación del aserrín y obtener los *pellets*. Para la ejecución de dicho proceso se contó con la colaboración del taller de Mecánica en General “Cárdenas”, propiedad del Sr. Don César Cárdenas. El mismo que se encuentra ubicado entre las calles Vilen Kubes y Agustín Ruales, barrio San Luis, parroquia Shell, cantón Mera; provincia de Pastaza.

3.2. Tipo de investigación

3.2.1. Carácter

El carácter de la investigación es cuantitativo, por cuanto todas las unidades estudiadas (temperatura, humedad, cenizas, friabilidad) son variables que se miden numéricamente.

3.2.2. Métodos de investigación

El método de investigación es del tipo empírico-analítico, ya que se parte de una hipótesis acerca del potencial energético del Pigüe que se fundamenta y valida a través de la experimentación con los parámetros físico-químicos y térmico. Para Rodríguez y Valldeoriola (2012) es el plan o estrategia que permite tener respuestas a los objetivos planteados en el estudio, y a su vez validar o rechazar la hipótesis y la posibilidad de solucionar el problema definido en la investigación.

Para Albert: "El problema de investigación establece el marco de referencia para el estudio de las relaciones entre variables, indica en cierto sentido qué observaciones hay que hacer, cómo hacerlas y cómo realizar las representaciones cuantitativas de las observaciones." (Albert, 2007, pág. 58 citado en Rodríguez y Valldeoriola, 2012).

Dentro de este tipo de método se contempla elementos como: variables implicadas en el problema y su operativización, grupos y número de sujetos de cada grupo, asignación de los sujetos a los grupos, categorías o niveles de la variable independiente si resulta necesario, concluyendo con las fases de la medición de la variable dependiente (Rodríguez y Valldeoriola, 2012).

3.2.3. Alcance

Se trata de un estudio correlacional, porque va más allá de la pura descripción biofísica, bioquímica del material y se adentra en revelar las relaciones cuantitativas, entre las variables que cuantifican la obtención de la unidad experimental (*pellets*) y la variable físico-química y térmica que caracterizan su potencial energético.

3.3. Diseño de la investigación

El presente trabajo investigativo está basado en un diseño experimental estratificado. Se tomaron cinco (5) muestras de diferentes zonas del área de aserrado del aserradero "San Francisco", inmediatamente se procedió al envasado y etiquetado según normativa ASTM D346-04 (ASTM, 2016) como paso previo a la aplicación de los diferentes análisis en el laboratorio.

3.3.1. Diseño experimental para el aserrín de Pigüe

3.3.1.1. Determinación de humedad, cenizas y proteína bruta

El diseño del experimento fue completamente aleatorio (DCA), con las siguientes propiedades, con número de tratamientos 5 y 3 observaciones, dando un total de 15 unidades experimentales para el estudio de la materia prima, ver **Tabla 3.1**. Especificando que el peso de las muestras para la determinación de cenizas y proteína fue de 2 g y 1 g respectivamente.

Tabla 3.1. Determinación de humedad del aserrín de Pigüe

MUESTRAS	OBSERVACIONES		
Peso (5g)	1	2	3
A	A.1.	A.2.	A.3.
B	B.1	B.2.	B.3.
C	C.1.	C.2.	C.3.
D	D.1.	D.2.	D.3.
E	E.1.	E.2.	E.3.

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2. Determinación de grasa y fibra

Se aplicó un DCA, con las siguientes propiedades, con número de tratamientos 5 y una observación, dando un total de 5 unidades experimentales para cada variable, ver **Tabla 3.2**. Especificando que el peso de las muestras para la determinación de grasa y fibra fue de 2 g y 1 g respectivamente.

Tabla 3.2. Determinación de grasa y fibra

OBSERVACIÓN	MUESTRAS				
	A	B	C	D	E
1	A.1.	B.1.	C.1.	D.1.	E.1.

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Diseño experimental para la obtención de los *pellets*

3.3.2.1. Obtención de *pellets*

El diseño del experimento fue completamente aleatorizado (DCA), con las siguientes propiedades, número de tratamientos 2 x 2 moldes y 5 observaciones, dando un total de 20 unidades experimentales, ver **Tabla 3.3**. Para su efecto se dividieron las muestras para la obtención de *pellets* a 85°C y 105°C.

Tabla 3.3. Descripción experimental. *Pellets*

Temperatura	Moldes	MUESTRAS				
		A	B	C	D	E
a. 85°C	1	A.1.a	B.1.a	C.1.a	D.1.a	E.1.a
	2	A.2.a	B.2. a	C.2. a	D.2. a	E.2. a
b. 105°C	1	A.1.b	B.1.b	C.1.b	D.1.b	E.1.b
	2	A.2.b	B.2.b	C.2.b	D.2.b	E.2.b

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2. Determinación de humedad y cenizas de los *pellets*

Se aplicó un DCA, con las siguientes propiedades, número de tratamientos 5 y una observación, dando un total de 5 unidades experimentales para cada variable, ver **Tabla 3.4**. Especificando que el peso de las muestras para la determinación de humedad y cenizas fue de 5 g y 2 g respectivamente.

Tabla 3.4. Diseño experimental para humedad y cenizas. *Pellets*

Temperatura	MUESTRAS				
	A	B	C	D	E
a. 85°C	A.a.	B.a.	C.a.	D.a.	E.a.
b. 105°C	A.b.	B.b.	C.b.	D.b.	E.b.

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3. Ensayo de friabilidad de los *pellets*

Aplicando un DCA para el total de *pellets* obtenidos se seleccionaron 20 unidades de cada muestra y por cada tratamiento aplicado, contabilizándose un total de 100 unidades, ver **Tabla 3.5**. Las mismas que se utilizaron para la realización del ensayo de friabilidad. Con los datos obtenidos se efectuó el cálculo del índice de friabilidad.

Tabla 3.5. Diseño para el cálculo del índice de friabilidad

Temperatura	UNIDADES					TOTAL
	A	B	C	D	E	
a. 85°C	20	20	20	20	20	100
b. 105°C	20	20	20	20	20	100

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Tratamiento de los datos

Los datos resultantes de los diseños experimentales fueron aplicados en base a los diferentes métodos, para las variables en estudio. Estos datos obtenidos en el Laboratorio de Bromatología fueron registrados y pre procesados en una hoja Excel. Para la comparación de homogeneidad de muestras, mediciones directas y variables derivadas fueron analizados con el programa de procesamiento estadístico Statgraphics Centurion v. 15.2.14.

3.3.3.1. Contenido de humedad

Las muestras recogidas en el aserradero fueron llevadas al laboratorio, en el mismo que se procedió al pesaje (peso húmedo, 5 g.) de cada una de las submuestras (15). El secado se lo realizó en la estufa, a una temperatura de 100 ± 5 °C durante 24 horas consecutivas; para determinar el peso seco de la biomasa (aserrín), se realizaron varias mediciones de peso, hasta la estabilización del valor y calcular el contenido de humedad. Este análisis de humedad total, se realizó de acuerdo a la norma NTE INEN 896 (INEN, 2005).

El cálculo del contenido de humedad se determinó por diferencias de peso, la muestra obtenida no debe estar en contacto con la humedad del ambiente.

Contenido de Humedad

$$CH = \left(\frac{P_{inicial} - P_{seco}}{P_{seco}} \right) * 100 \quad (3.1)$$

Fuente: NTE INEN 896

Donde

CH = contenido de humedad,

P_{inicial} = peso inicial del pellet húmedo

P_{seco} = peso del pellet seco.

3.3.3.2. Porcentaje de cenizas

Para realizar este análisis se colocó la muestra húmeda en una cápsula de porcelana, a una temperatura de 500°C en un tiempo de 2 horas. Bajo el parámetro que se establece en la NTE INEN 520, que debe alcanzar una velocidad controlada en un tiempo aproximado de 2 horas y las temperaturas entre los 500 hasta los 800°C, hasta lograr la estabilidad (INEN, 1980).

Porcentaje de cenizas

$$\%C = \frac{100 (m_2 - m)}{(100 - H)(m_1 - m)} * 100 \quad (3.2)$$

Fuente: NTE INEN 520

Donde

C = contenido de ceniza en % de masa.

m = masa del crisol vacío en g.

m₁ = masa del crisol más muestra en g.

m₂ = masa del crisol con la ceniza en g.

H = porcentaje de humedad en la muestra

3.3.3.3. Determinación de proteína bruta

METODO KJELDAHL

Se basa en la digestión en húmedo de la muestra por calentamiento con ácido sulfúrico concentrado en presencia de catalizadores metálicos y de otro tipo para reducir el nitrógeno orgánico de la muestra hasta amoníaco, el cual queda en solución en forma de sulfato de amonio. El amoníaco digerido una vez alcalinizado con hidróxido de sodio concentrado se destila para desprender el amoníaco, el cual es atrapado y luego titulado.

Determinación de proteína

$$P = \frac{V*N*F*0.014}{m} * 100 \quad (3.3)$$

Fuente: AOAC 19th 954.01

Donde

P = Contenido de proteína

V = ml de ácido sulfúrico consumido

N = Normalidad del ácido

F = Factor para convertir el contenido de nitrógeno a proteína 6.25 proteína en general y 5.7 trigo y polvillo

m = peso de muestra en g

3.3.3.4. Determinación de grasa

El contenido de grasa llamado también extracto etéreo, grasa neutra o grasa cruda, consiste en grasas neutras y ácidos grasos libres que se determinan por extracción del material seco y molido con éter de petróleo, éter etílico, hexano u otro solvente adecuado en un aparato de extracción continua.

El residuo obtenido no está constituido únicamente por lípidos; sino que incluye además fosfatos, lecitina, esteroides, ceras, clorofila, carotenos, pigmentos y otros en cantidades relativamente pequeñas que no llegan a constituir una diferencia significativa en los resultados.

Determinación de grasa

$$G = \frac{(m_2 - m_1)}{m(100 - H)} * 100 \quad (3.4)$$

Fuente: AOAC 19th 920.39

Donde

G = contenido de grasa, en %

M = masa de la muestra, en g.

m₁ = masa del vaso vacío, en g.

m₂ = masa del vaso con grasa, en g.

H = porcentaje de humedad en la muestra.

3.3.3.5. Determinación de fibra

METODO WEENDE

Se entiende por fibra cruda el residuo lavado, secado y pesado que queda luego de la digestión de la muestra desengrasada con ácido sulfúrico e hidróxido de sodio diluido sucesivamente. Este tratamiento proporciona una fibra cruda que consiste en celulosa, lignina, hemicelulosa y otros contenidos en la muestra original.

Determinación de fibra

$$F = \frac{(m_1 - m_2)}{m} * 100 \quad (3.5)$$

Fuente: NTE INEN 542

Donde

F= Contenido de fibra en %

m₁= Peso del crisol + muestra (estufa)

m₂= Peso del crisol + muestra (mufla)

m= Peso de muestra desengrasada

3.3.3.6. Cálculo de carbohidratos totales

Según el DECAP (Departamento de Ciencias de los Alimentos y Biotecnología de la Escuela Politécnica Nacional), el cálculo de los carbohidratos totales se realiza mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

Carbohidratos totales

$$CT = 100 - (H + C + P + G) \quad (3.6)$$

Fuente: Tingo y Fonseca, 2012

Dónde

CT = carbohidratos totales

H = humedad

P = proteínas

G = grasa

C = cenizas.

3.3.3.7. Cálculo del poder calorífico

Para el cálculo del poder calorífico mediante el análisis bromatológico, aplicamos la siguiente ecuación (Tingo y Fonseca, 2012, p.107).

Poder calorífico

$$PC \left(\frac{kcal}{100g} \right) = A + B + C \quad (3.7)$$

Fuente: Tingo y Fonseca, 2012

Dónde

A = es (4 kcal)(% CT)

B = es (9 kcal)(%G)

C = es (4kcal)(%P).

3.3.3.8. Determinación de las características físico-químicas y térmicas de los *pellets*

Después de realizar el proceso de compactación del aserrín, y obtener los *pellets* a temperaturas de 85°C y 105°C. se realizó análisis de humedad, cenizas, carbohidratos totales y poder calorífico con base a las normativas establecidas en los literales 3.4.1.1., 3.4.1.2., 3.4.1.6., y 3.4.1.7., respectivamente.

3.3.3.9. Determinación de friabilidad

De los *pellets* obtenidos a las temperaturas de 85°C y 105°C, para las diferentes muestras (5), se seleccionaron un total de 100 *pellets* para cada temperatura. Posteriormente se procede a aplicar el ensayo de golpeteo contra el suelo cerámico a partir de 1 m de altura, donde se recogieron los datos del número de *pellets* finales en referencia al número de *pellets* iniciales, a partir de estos datos se puede calcular el índice de friabilidad mediante la fórmula (Arpi y Calderón, 2010, p.91):

Ecuación de friabilidad

$$FR = \frac{N_f}{N_i} \quad (2.3)$$

Fuente: Arpi y Calderón, 2010

Dónde

FR = es el índice de friabilidad resultante

N_i = es el número de *pellets* al inicio del ensayo

N_f = es el número de *pellets* enteros o partes de *pellets* al final del ensayo.

De la fórmula anterior puede comprenderse qué valor de *FR* es siempre mayor o igual a 1.

3.3.4. Recursos humanos y materiales.

El trabajo de investigación y desarrollo para su inicio se realizó en el aserradero particular “San Francisco”, con la colaboración de su propietario Sr. Pedro Pilla; la Ing. Derwing Viáfara, encargada del Laboratorio de Bromatología; el Sr. César Cárdenas, maestro en Mecánica en General; el Dr. Oscar Miguel Rivera Borroto, PhD. y tutor principal de la

presente tesis, al Ing. Juan Elías González, MsC., ejecutor del proyecto y docente de la UEA; y Miryam Janeth Cárdenas Bonifa, egresada de la Universidad Estatal Amazónica.

3.3.5. Equipos y materiales

Tabla 3.6. Tabla de materiales, equipos y normativas para análisis

ANALISIS	EQUIPOS Y MATERIALES	NORMA
Humedad	<ul style="list-style-type: none"> - Estufa - Cajas Petri 	NTE INEN 896
Cenizas	<ul style="list-style-type: none"> - Mufla 600°C. - Crisoles de porcelana - Desecador 	NTE INEN 520
Proteína bruta	<ul style="list-style-type: none"> - Ácido sulfúrico concentrado - Pastillas Kjeldahl - Hidróxido de sodio - Ácido bórico - Agua destilada - Unidad de digestión Kjeldahl - Unidad de destilación Kjeldahl - Tubos de digestión de 200 ml - Fiola de 250 ml - Bureta de 50 ml - Probeta de 100 ml - Pipeta graduada 	AOAC 19th 954.01
Grasa	<ul style="list-style-type: none"> - Aparato de extracción de grasas - Balanza analítica - Estufa regulada a 105 °C - Desecador - Papel filtro cualitativo libre de grasa 	AOAC 19th 920.39
Fibra	<ul style="list-style-type: none"> - Crisol de porcelana - Vasos de precipitación - Desecador - Mufla - Balanza analítica - Estufa ajustada - Espátula de acero inoxidable - Pinza de crisoles - Franela blanca - Ácido sulfúrico - Hidróxido de sodio - Alcohol potable - Agua destilada - Antiespumante 	NTE INEN 542

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7. Tabla de materiales, equipos y normativas para obtención de *pellets*

PROCESO	EQUIPOS Y MATERIALES	NORMA
Recolección de materia prima	- Bolsas plásticas	DIN 51731, EN 14961-2:2011
Secado	- Estufas - Bandeja	
Molido	- Molino de discos - Tamiz de malla, 3mm	
Compactación	- Dispositivo de compactación - Termocupla	

Fuente: Elaboración propia

3.3.5.1. Instalaciones

- Aserradero de construcción mixta, madera y concreto.
- Laboratorio de Bromatología (UEA).
- Taller de Mecánica.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis de homogeneidad de las muestras de aserrín de Pigüe

Para el análisis de homogeneidad del aserrín de Pigüe se determinó el contenido de humedad, porcentaje de: cenizas, grasa, y proteína.

4.1.1. Humedad

Para determinar la homogeneidad en las muestras del aserradero respecto a la humedad se aplicó el programa estadístico ANOVA. El análisis de las muestras tomadas en las distintas partes o zonas del aserradero, mostró que no existen diferencias significativas entre los valores medios de humedad ($p > 0.05$) ver **Tabla 4.1.** con lo cual se infiere que las condiciones de “almacenamiento” como humedad, temperatura, cargas biológicas, entre otros, son similares.

Tabla 4.1. Determinación de la variable humedad

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados medios	Cociente F	P
Entre grupos	0.0259512	4	0.0064878	1.48	0.2783
Dentro de grupos	0.0436963	10	0.00436963	-	-
Total (Corr.)	0.0696475	14	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2. Valores representativos de la variable humedad

PARÁMETRO	VALOR
Tamaño	15
Promedio	0.436735
Desviación Estándar	0.0705324
Coef. de variación	16.15%
Mínimo	0.358434
Máximo	0.654821
Rango	0.296387

Fuente: Elaboración propia

Las estadísticas descriptivas indican que como promedio las muestras contienen un 44% de humedad, variando dentro del rango 36-66%, el cual representa valores esperados si consideramos las condiciones climáticas del entorno amazónico. Además, este valor se encuentra dentro del rango del contenido de humedad 50% determinados por (Yánquez, 2012, p.26).

4.1.2. Cenizas

Similarmente al caso de la variable humedad, se aplicó un análisis ANOVA para determinar la homogeneidad en las muestras del aserradero respecto a su contenido de cenizas. El análisis mostró que no existen diferencias significativas entre los valores medios de cenizas ($p > 0.05$). Dado que el aserrín es depositado en los aserraderos en forma de capas sucesivas no puede establecerse un estimativo sólido acerca de la similitud de la composición bioquímica de los troncos. En cualquier caso este resultado permite inferir que las muestras son homogéneas, lo cual si cumple un rol muy importante en la conformación y análisis de las variables físico-químicas de los *pellets*.

Tabla 4.3. Determinación de la variable cenizas

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados medios	Cociente F	P
Entre grupos	0.0112168	4	0.00280421	0.77	0.5686
Dentro de grupos	0.0364119	10	0.00364119	-	-
Total (Corr.)	0.0476287	14	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

A partir del análisis estadístico descriptivo de la variable cenizas se observa que el contenido promedio de cenizas es de 0.96%, lo cual indica que el porcentaje de los residuos sólidos no combustible en el aserrín del Pigüe es muy bajo, o sea, que en la combustión de este material se aprovecha casi la totalidad energética de la biomasa. Estos resultados se encuentran dentro

de los rangos de la norma establecida por EN 14612-2:2011 (BUREBA, 2012), lo que permite el aprovechamiento para la producción de *pellets*.

Tabla 4.4. Valores representativos de la variable ceniza

PARÁMETRO	VALOR
Tamaño	15
Promedio	0.956667
Desviación Estándar	0.0591205
Coef. de variación	6.17985%
Mínimo	0.8
Máximo	1.01
Rango	0.21

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Proteína

El análisis estadístico de ANOVA para la carga de proteína mostró un valor de probabilidad $p > 0.05$ lo cual indica que no existen diferencias significativas en los contenidos de estos compuestos en el aserrín muestreado.

Tabla 4.5. Determinación de la variable proteína

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrados Medios	Cociente F	P
Entre grupos	0.0424713	4	0.0106178	0.36	0.8306
Dentro de grupos	0.293792	10	0.0293792	-	-
Total (Corr.)	0.336263	14	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

El análisis estadístico descriptivo de las muestras indica que el contenido porcentual promedio de proteína es de 1.43%, el cual es un valor relativamente bajo al igual que las cenizas. La presencia de estas biomoléculas es lógica por las funciones estructurales y bioquímicas que cumplen en las plantas. Por otra parte, su presencia es positiva desde el punto de vista

energético ya que dichas biomoleculares presentan propiedades comburentes por sus largas cadenas carbonadas. Este resultado permite realizar el cálculo del poder calorífico de la biomasa vegetal basado en la norma AOAC 19th 954.01.

Tabla 4.6. Valores representativos de la variable proteína

PARÁMETRO	VALOR
Tamaño	15
Promedio	1.42914
Desviación Estándar	0.15498
Coef. de variación	10.8443%
Mínimo	1.09531
Máximo	1.72154
Rango	0.626233

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Grasa

El contenido de grasas resultó ser muy similar para las diferentes muestras, lo cual fue confirmado por la simple observación de los valores (ver **Tabla 4.10**). De todas las variables físico-químicas estudiadas, las grasas se presentan en menor valor porcentual que las restantes. Similar al caso de las proteínas, estas biomoléculas son combustibles, quizás con menor densidad energética que los carbohidratos pero contribuyen positivamente al poder calorífico del aserrín de Pigüe. En el caso de las muestras analizadas, la cantidad porcentual promedio es de 0.16%. Permitiendo de la misma manera realizar el cálculo del poder calorífico de la biomasa vegetal basado en la norma AOAC 19th 920.39.

Tabla 4.7. Valores representativos de la variable grasa

PARÁMETRO	VALOR
Tamaño	15
Promedio	0.163983
Desviación Estándar	0.0110487
Coef. de variación	6.73768%
Mínimo	0.149985

Máximo	0.179991
Rango	0.030006

Fuente: Elaboración propia

4.1.5. Fibra

El análisis de varianza que se muestra en la **Tabla 4.8.** mostró que existen diferencias altamente significativas entre los valores determinados de la fibra entre las muestras colectadas ($p < 0.05$). Esta variable contribuye significativamente al cálculo del poder calorífico del aserrín de Pigüe encontrándose dentro de los carbohidratos totales como biomoléculas en forma de polisacáridos, oligosacáridos, lignina y sustancias análogas que se presentan de forma apreciable en el árbol de Pigüe.

Tabla 4.8. Determinación de la variable fibra

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrados Medios	Cociente F	P
Entre grupos	302.968	4	75.7419	395.88	0.0000
Dentro de grupos	1.91324	10	0.191324	-	-
Total (Corr.)	304.881	14	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

El contenido porcentual promedio de fibra en las muestras estudiadas es del 75.18%, con un valor mínimo de 71.17% y máximo de 84.46%. Basado en el método de la norma NTE INEN 542.

Tabla 4.9. Valores representativos de la variable fibra

PARÁMETRO	VALOR
Tamaño	15
Promedio	75.7604
Desviación Estándar	4.66661
Coef. de variación	6.15969%
Mínimo	71.1686
Máximo	84.4631

Rango	13.2945
Std. Skewness	2.17988
Std. Kurtosis	0.373699

Fuente: Elaboración propia

4.2. Cálculo y análisis de homogeneidad del aserrín de Pigüe

4.2.1. Carbohidratos totales

El contenido de carbohidratos totales fue calculado mediante la ecuación (3.6). La ecuación anterior detalla que, por carbohidratos totales, se consideran todos aquellos componentes que no sean agua, residuos sólidos no combustibles (mayoritariamente inorgánicos), proteínas y grasas. Este concepto es más amplio que el contenido de fibras que solo constituye un grupo de biomoléculas determinable por la técnica analítica propuesta.

La aplicación del ANOVA en este caso nos conduce a establecer que, y de acuerdo con las muestras, no existen diferencias significativas ($p > 0.05$), de lo cual se infiere que el contenido promedio de carbohidratos totales es similar para las muestras de aserrín tomadas del aserradero.

Tabla 4.10. Cálculo de la variable carbohidratos totales

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrados Medios	Cociente F	P
Entre grupos	261.907	4	65.4767	1.54	0.2647
Dentro de grupos	426.225	10	42.6225	-	-
Total (Corr.)	688.132	14	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

La **Tabla 4.18** (Ver subdivisión 4.5) muestra que los contenidos de carbohidratos totales alcanzan un valor promedio del 54%. Básicamente, el aserrín de Pigüe consiste en los componentes mayoritarios de humedad y carbohidratos totales.

Tabla 4.11. Valores representativos de la variable carbohidratos totales

PARÁMETRO	VALOR
Tamaño	15
Promedio	53.7747

Desviación Estándar	7.01087
Coef. de variación	13.0375%
Mínimo	32.1348
Máximo	61.5936
Rango	29.4588

Fuente: Elaboración propia

En la **Tabla 4.12.** se muestra las propiedades físico-químicas del aserrín de Pigüe, el mismo que permitió realizar el cálculo de los carbohidratos totales con un valor 53,78% en base húmeda, considerando un contenido de humedad del 12% tenemos un 85,45% de carbohidratos (base seca), los datos obtenidos están relacionados con investigaciones realizadas globalmente en la madera de carbohidratos totales que están en el rango de 65 a 85% (en base seca) (Gómez *et al*, 2012, p.82)

Tabla 4.12. Valores porcentuales físico-químicos del aserrín de Pigüe

PARÁMETRO	ASERRÍN DE PIGÜE
Humedad	43,67
Cenizas	0,96
Fibra	75,18
Proteínas	1,43
Grasas	0,16
Carbohidratos totales	53,78

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Poder calorífico

Una vez determinadas las variables bromatológicas acerca de los componentes bioquímicos estructurales del aserrín de Pigüe, se pasó al cálculo del poder calorífico de este material. Esta etapa es importante para los propósitos de la presente investigación pues constituye el núcleo de la caracterización energética del material. El poder calorífico del aserrín de Pigüe fue calculado mediante la ecuación (3.7). Los valores del poder calorífico calculados a partir de las determinaciones bromatológicas o derivadas de las mismas (carbohidratos totales) se muestran en la **Tabla 4.18** (Ver subdivisión 4.5). La aplicación del programa estadístico ANOVA para esta variable permitió inferir que las muestras son homogéneas ($p > 0.05$).

Tabla 4.13. Cálculo de la variable del poder calorífico

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrados Medios	Cociente F	P
Entre grupos	4.1076E9	4	1.0269E9	1.49	0.2773
Dentro de grupos	6.89983E9	10	6.89983E8	-	-
Total (Corr.)	1.10074E10	14	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Según el análisis estadístico descriptivo de la variable “poder calorífico”, el valor promedio del poder calorífico asciende 2 291 kcal/kg de aserrín de Pigüe. Este resultado es positivo ya que los valores del poder calorífico para los materiales maderables en seco suelen estar en el rango (3 500-5 500 kcal/kg).

Tabla 4.14. Valores representativos de la variable del poder calorífico

PARÁMETRO	VALOR
Tamaño	15
Promedio	2291.
Desviación Estándar	280401
Coef. de variación	12.6141%
Mínimo	1 357,02
Máximo	2 534,02
Rango	117701.

Fuente: Elaboración propia

4.3. Cálculo del poder calorífico del aserrín de Pigüe a partir de la humedad

Dado que el contenido de carbohidratos totales en el aserrín de Pigüe tiene una relación decreciente con el porcentaje de humedad, y esta variable tiene un carácter preponderante dentro de las variables bromatológicas, tiene fundamento el tratar de encontrar una relación empírica entre el poder calorífico del aserrín de Pigüe y la humedad. Teóricamente, se espera que al disminuir el porcentaje de humedad aumente el porcentaje de carbohidratos totales, y con este, aumente el poder calorífico de la muestra.

Para comprobar este supuesto, fue llevado a cabo un análisis de regresión simple entre la variable poder calorífico y el porcentaje de humedad. Los resultados del ANOVA para la correspondencia del modelo lineal con los datos mostró que $p \sim 0$ (ver **Tabla 4.15**) lo cual indica que este modelo empírico explica satisfactoriamente la relación subyacente entre la variable energética y la variable bromatológica o físico-química.

Tabla 4.15. Determinación del poder calorífico a partir de la humedad

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrados Medios	Cociente F	P
Modelo	1.10071E10	1	1.10071E10	394968.68	0.0000
Residual	362287.	13	27868.2	-	-
Total (Corr.)	1.10074E10	14	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

La técnica de análisis de regresión simple mostró la siguiente dependencia lineal:

$$p_{caloric} = 3959.11 - 39.7542 * humedad \quad (4.1)$$

La prueba estadística correspondiente para contrastar la significación de los coeficientes mostró que, efectivamente, los parámetros del modelo son extremadamente significativos. El coeficiente de correlación (PMCC) de Pearson ($r = -0.999984$) indica una fuerte correlación lineal entre las variables poder calorífico vs. humedad con una tendencia lineal decreciente (ver **Figura 4.1**). El valor de $R^2 = 99.9967$ indica que más del 99% de la variabilidad en la variable dependiente “poder calorífico” puede ser estimada a través de la variable bromatológica “humedad”. Este resultado es alentador ya que indica que con solo determinar la humedad de una muestra de aserrín de Pigüe podemos predecir su poder calorífico con gran exactitud en el rango 36-66 % de humedad.

Tabla 4.16. Estimación y significación de los coeficientes de la regresión

Parámetro	Est. Mín. Cuadrados	Error Estándar	Estadístico t	P
Intercepto	3959.11	2.79603	1415.98	0.0000
Pendiente	-39.7542	0.063256	-628.465	0.0000

*Estadístico de Durbin-Watson = 2.11433 ($p = 0.5958$). El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba si existe correlación significativa en los residuales (independencia de residuales). Dado que el valor de P es mayor que 0.05, no existe indicio de autocorrelaciones seriales en los residuales a un nivel de significación $\alpha = 0.05$.

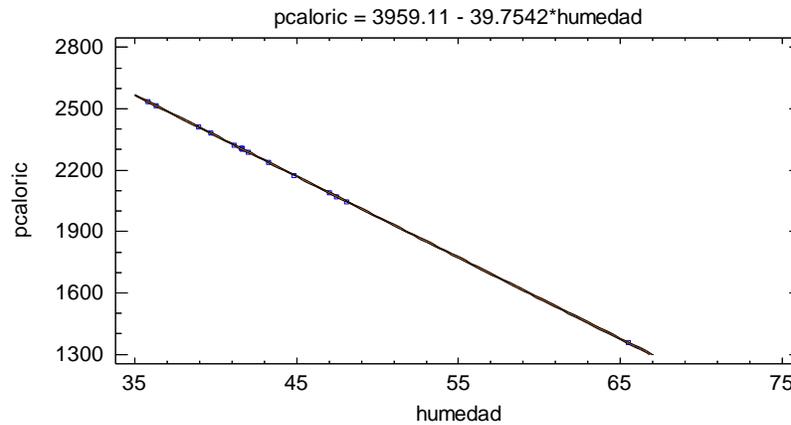


Figura 4.1. Tendencia lineal decreciente que describe la relación entre las variables poder calorífico y humedad (“poder calorífico” vs. “humedad”).

4.4. Comparación de parámetros físico-químico

4.4.1. Porcentaje de humedad en *pellets* a temperaturas de 85°C y 105°C

La **Tabla 4.17** muestra los datos estadísticos descriptivos para la variable “humedad” de los *pellets*, los cuales fueron obtenidos a las dos temperaturas de 85°C y 105°C.

Tabla 4.17. Valores representativos de la humedad de *pellets*

Parámetro	85°C	105°C
Tamaño	5	5
Promedio	7.59375	7.35642
Desviación Estándar	2.01345	0.472229
Coef. de variación	26.5146%	6.41928%
Mínimo	5.02743	6.73584
Máximo	10.6644	7.99152
Rango	5.63694	1.25567

Fuente: Elaboración propia

Para comparar las dos muestras de *pellets* se optó por una prueba estadística *F de Fisher-Snedecor* para contrastar homogeneidad de varianza, y por una prueba *t de Student* para la comparación de medias. La prueba de homogeneidad de varianza mostró un valor $F(4, 4) = 18.1793$ con un valor de probabilidad asociado de $p = 0.0157 < \alpha = 0.05$, lo cual indica que existen diferencias significativas entre la varianzas de ambos conjuntos de datos a las dos temperaturas. El estadístico *t de Student* mostró un valor de $t = 0.2566$ con un valor de probabilidad asociado de $p = 0.8040$ lo cual indica que no existen diferencias significativas en los valores de humedad en ambas muestras de Pigüe. Las muestras anteriores indican claramente que la variación de la temperatura en la obtención de los *pellets* no desempeña un rol apreciable en la humedad final de los mismos. Esto puede ser consecuencia de que en el proceso de molido del aserrín Pigüe se genera una cantidad de calor apreciable. El calentamiento del aserrín hace que gran parte de la humedad se pierda en forma de vapor, llegando a valores de humedad en sólido relativamente bajos del 8%, que probablemente se correspondan a valores de humedad estructural de la madera o difícil de superar reversiblemente a temperaturas ordinarias.

4.4.2. Friabilidad de los *Pellets* a temperaturas de 85°C y 105°C

Para comparar la calidad de los *pellets* a través de la friabilidad se emplearon las mismas pruebas que en caso de la humedad. El estadístico *F de Fisher-Snedecor* mostró un valor $F = 8.5055$ con un valor de probabilidad asociado de $p = 0.0618$ lo que indica que no existe una diferencia significativa entre las varianzas de las dos muestras. La prueba estadística *t de Student* mostró un valor de $t = 0.7140$ con un valor de probabilidad asociado de $p = 0.4955$, por lo cual se puede inferir que no existen diferencias significativas entre la friabilidad de las dos muestras de *pellets* obtenidos a las dos temperaturas trabajadas. Este resultado sugiere que la temperatura, en el rango de valores estudiado, no influye apreciablemente en la resistencia mecánica de los *pellets* a la ruptura por caída o impacto.

4.5. Predicción del poder calorífico de los *pellets* de Pigüe

Para predecir el poder calorífico de los *pellets* se decidió usar la ecuación de predicción (4.1). Esta ecuación representa la única herramienta viable para la presente investigación ya que no fue posible disponer de la bomba calorimétrica ni del equipo de determinación elemental que se encuentran en el Laboratorio de Bromatología por limitaciones de reactivos y otras condiciones de operación. Los valores predichos por la **Ec. 1** se muestran en la **Tabla 4.18** donde además se muestran los valores energéticos de *pellets* obtenidos por otros autores y de acuerdo con los tipos de aserrín: aserrines de madera (no especificadas) y de cascarilla de arroz (Tingo y Fonseca, 2011); aserrines de las maderas *Capirona*, *Shihuahuaco* y *Quinilla* (Chang y del Águila, 2013); aserrines de las maderas Fernán Sánchez y Guayacán (Arpi y Calderón, 2010, p.80).

Tabla 4.18. Poder calorífico de *pellets* en orden ascendente reportados en otros trabajos

PELLETS DE ASERRÍN	PODER CALORÍFICO (KCAL/KG)
Cascarilla de arroz	2948.20
Maderas Varias	3641.60
Pigüe (promedio)	3661.94
Capirona	4164.00
Shihuahuaco	4230.00
Quinilla	4261.00
Fernán Sánchez	4701.20
Guayacán	4835.20

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse de la **Tabla 4.18**, los *pellets* de aserrín de Pigüe tienen poder calorífico promedio de 3661.94 kcal/kg que lo sitúa como el tercer material más energético de entre los reportados. Sin embargo, la diferencia entre este valor y el promedio para todos los aserrines de aprox. 4055 kcal/kg es de tan solo 394 kcal/kg. Este resultado es alentador ya que a pesar de que se encuentra por debajo de los poderes caloríficos de los *pellets* de aserrines de *Capirona*, *Shihuahuaco*, *Quinilla*, Fernán Sánchez y Guayacán, el Pigüe presenta una abundancia natural y potencial de biomasa superior, además de ser abundante en los aserraderos y presentar un menor costo como recurso maderable.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Con base en el análisis bromatológico realizado con el aserrín de Pigüe se logró determinar las propiedades físico-químicas de humedad 43.67%, grasa 0.16%, fibra 75.18%, proteína 1.43% y cenizas 0,96%, lo que a su vez permitió calcular el poder calorífico de la materia prima.
- Una vez obtenido los pellets de aserrín de Pigüe, se determinó el poder calorífico y se calculó usando una ecuación de correlación/regresión, obteniendo un valor de 3.661,94 (Kcal/Kg), lo que indica su potencial energético, considerando el rango establecido para recursos maderables el cual oscila entre 3.500 y 4.500 (Kcal/Kg). Este estudio nos permite afirmar que los pellets de Pigüe es un material prometedor para fines energéticos en la provincia de Pastaza.
- El proceso de pelletizado se realizó, obteniéndose *pellets* con índices de friabilidad bajos (positivo) en términos resistencia a la manipulación. Demostrando que es factible obtener los *pellets* de biomasa maderable para futuros estudios a nivel de laboratorio.

5.2. RECOMENDACIONES

- Con el fin de obtener datos más precisos, y realizar comparaciones, del poder calorífico del aserrín del Pigüe se recomienda el uso de la bomba calorimétrica y el análisis fundamental.
- En el proceso de elaboración de los *pellets* de Pigüe, es importante conocer la medida de presión exacta y necesaria para la compactación y determinar su grado de resistencia de los mismos.
- En caso de realizarse estudios comparados de los *pellets* de Pigüe con respecto al uso de otros combustibles fósiles, se recomienda efectuar pruebas de combustión que permiten precisar la cantidad de calor que aportan dichos *pellets*.

CAPITULO VI

1. BIBLIOGRAFIA

Arpi Trujillo, J. E., & Calderón Toral, C. S. (2010). *Diseño de una máquina pelletizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros de la ciudad de Cuenca para su aprovechamiento energético*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca. Recuperado de: https://scholar.google.com.ec/scholar?q=Dise%C3%B1o+de+una+m%C3%A1quina+pell+etizadora+en+base+a+la+disponibilidad+de+residuos+madereros+de+la+ciudad+de+Cue+nca+para+su+aprovechamiento+energ%C3%A9tico&btnG=&hl=es&as_sdt=0%2C5.

Visitado el 26 de febrero del 2016.

Standard Test Method for Sieve Analysis of Glass Spheres (2016).

Box, G. E. P., Hunter, W. G., y Hunter, J. S. (Eds.). (1978). *Statistics for Experimenters*. New York (NY):Wiley.

BUREBA, D. B. S. L.-P. D. S. G. (2012). *Fabricación de pellets* (pp. 23). Brucellas.

Conservancy, T. N. (2016). *Conservando la naturaleza. Protegiendo la vida*, Recuperado de: www.mundotnc.org/. Visitado el: 2 de marzo del 2016.

Constituyente, A. N. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Montecristi: Asamblea Nacional Constituyente.

Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., H., G.-R., Jurado Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). *Distribución granulométrica en subproductos de para su posible uso en pellets y briquetas*. Revista Mexicana de Ciencias forestales, 5, 12.

Chang Chumpen, A. A., & Del Aguila Vela, T. A. (2013). *Estudio de factibilidad para la fabricación de pellets de madera a partir de un subproducto de la industria maderera peruana*. Escuela Profesional de Ingeniería Industrial, Lima. Recuperado de: http://www.repositorioacademico.usmp.edu.pe/bitstream/usmp/1157/1/chang_caa.pdf

Visitado el: 10 de mayo del 2016.

Damien, A., Madrid Cenzano, A., Madrid Cenzano, J., Lopez Gomez, A., y Madrid Vicente, A. (Eds.). (2010). *La biomasa: Fundamentos, tecnologías y aplicaciones*.

Draper, N., y Smith, H. . (1998). *Applied Regression Analysis*. New York (NY):Wiley.

Dupas, G., y Diegues, A. C. S. A. (2008). *Meio ambiente e crescimento econômico: tensões estruturais*: Editora UNESP.

Erazo, G., Izurieta, J. C., Cronkleton, P., Larson, A., y Putzel, L. (2014). *El uso de pigüe (Piptocoma discolor) por los pequeños productores de Napo, Ecuador: Manejo sostenible de una especie pionera de madera para los medios de vida locales*. (Vol. 26): CIFOR.

Gómez, E.A., Ríos. L.A., Peña, J.D. (2012). *Madera, un potencial material lignocelulósico para la producción de biocombustibles en Colombia*. Vol.23(6), pp.73-86.

Greenpeace. (2015). Greenpeace International, Recuperado de: www.greenpeace.org/. Visitado el: 2 de marzo del 2016.

Grijalva Jorge, C. X., Ramos Raúl, Barrera Paulo, Limorgi Ricardo. (2012). *Situación de los Recursos Genéticos Forestales en el Ecuador*. Recuperado de: http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/stories/descargas/informe_pas_rgf_ecuador_final.pdf. Visitado el: 12 de marzo del 2016.

INEN. (1980). *Harinas de origen vegetal determinación de la ceniza*. Recuperado de: <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0520.1981.pdf>. Visitado el: 15 de junio del 2016

INEN. (2005). *Tableros de madera aglomerada contrachapada y de fibras de madera (MDF)*. Recuperado de: <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0896.2005.pdf>. Visitado el: 15 de junio del 2016.

Lipsia. (2011). *Avalan el origen de la materia prima, la calidad de los pellets y el compromiso social de Lipsia*. 8.

Llambí, L., Tocancipá-Falla, J., Pardo, D., Merino, T., Vargas, J. R., Vargas, J. C., y Soria, R.

(2016). *Estado Prurinacional, Interculturalidad y Derechos de la Naturaleza. Los retos de la Amazonía Ecuatoriana*. Puyo: Universidad Estatal Amazónica.

Madrid Vicente, A. (2012). *La biomasa y sus aplicaciones energéticas*: Madrid. Díaz de Santos.

Medrano Rodríguez, A. E., y Pallasco Catota, V. A. (2015). *Estudio de factibilidad para la elaboración de inciensos en base a aserrín generados por el gremio de maestros artesanos de la madera y conexos de Pichincha y su distribución en la ciudad de Quito*. Universidad Politécnica Salesiana sede Quito, Quito. Recuperado de: https://scholar.google.com.ec/scholar?q=estudio+de+factibilidad+para+la+elaboracion+d+e+inciensos+en+base+a+aserrin+generados+por+el+gremio+de+maestros+artesanos+de++la+madera+y+conexos+de+pichinchaybtnG=yhl=esyas_sdt=0%2C5. Visitado el: 18 de mayo del 2016.

Mena Pachano, A. (2014). *El desarrollo de la energía renovable en el Ecuador*. Corporación para la Investigación Energética. Recuperado de: <http://www.energia.org.ec/cie/>. Visitado el: 20 de marzo del 2016.

Merino Castillo, J. P. (2011). *Estudio Económico de dos formas de aprovechamiento forestal del pigue (pollalesta discolor) en el cantón Mera, provincia de Pastaza*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba. Recuperado de: https://scholar.google.com.ec/scholar?q=Estudio+Econ%3%B3mico+de+dos+formas+d+e+aprovechamiento+forestal+del+pigue+%28pollalesta+discolor%29+en+el+cant%3%B3n+Mera%2C+provincia+de+PastazaybtnG=yhl=esyas_sdt=0%2C5. Visitado el: 17 de marzo del 2016.

Morges, S. (1961). *Fondo mundial para la naturaleza*. Directorio Biodiversidad, Recuperado de: http://www.wwf.org.mx/quienes_somos/. Visitado el: 2 de marzo del 2016.

Paredes Asensio, N. (2014). *Análisis de los parámetros que afectan sobre la viabilidad de una planta de producción de pellets*. Universidad de Valladolid, Valladolid. Recuperado de: <https://scholar.google.com.ec/scholar?q=Dise%3B1o+de+la+ingenieria+basica+de+una+planta+productora+de+pellets+elaborados+a+partir+de+biomasa+forestalybtnG=y>

hl=esyas_sdt=0%2C5. Visitado el: 26 de mayo del 2016.

PNUMA. (1972). *Medio ambiente para el desarrollo*. Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Recuperado de: www.pnuma.org/AcercaPNUMA.php. Visitado el: 2 demarzo del 2016

Portero Jijón, A. M. (2014). *Análisis térmico del proceso de peletizado del aserrín de madera de eucalipto (eucaliptus globulus labill) y copal (dacryodes olivifera cuatrecasas) y su influencia sobre la friabilidad de los pelets*. Universidad Técnica de Ambato, Ambato. Recuperado de: https://scholar.google.com.ec/scholar?q=AN%C3%81LISIS+T%C3%89RMICO+DEL+PROCESO+DE+PELETIZADO+DEL+ASERR%C3%8DN+DE+MADERA+DE+EUCALIPTO+%28EUCALIPTUS+GLOBULUS+LABILL%29+Y+COPAL+%28DACRYODES+OLIVIFERA+CUATRECASAS%29+Y+SU+INFLUENCIA+SOBRE+LA+FRIABILIDAD+DE+LOS+PELLETS.ybtnG=yhl=esyas_sdt=0%2C5. Visitado el: 11 de mayo del 2016.

Proecuador. (2015). *Análisis sectorial de muebles y acabados de construcción*. Quito: Recuperado de: http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2015/12/PROEC_AS2015_MUEBLESYACABADOS5.pdf. Visitado el:19 de abril del 2016.

Soto, G., y Núñez, M. (2008). *Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de pinus radiata (D. Don), como material aglomerante*. Maderas. Ciencia y tecnología, 10(2), 129-137.

Tingo, T., Fernando, L., y Fonseca Cuenca, E. G. (2012). *Desarrollo de un Proceso Tecnológico para la Obtención de Briquetas de Aserrín de Madera y Cascarilla de Arroz, y Pruebas de Producción de Gas Pobre*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba. Recuperado de: <https://scholar.google.com.ec/scholar?hl=esyg=DESARROLLO+DE+UN+PROCESO+TECNOL%C3%93GICO+PARA+LA+OBTENCI%C3%93N+DE+BRIQUETAS+DE+ASERR%C3%8DN+DE+MADERA+Y+CASCARILLA+DE+ARROZ%2C+Y+PRUEBAS>

+DE+PRODUCCI%C3%93N+DE+GAS+POBRE%E2%80%9DybtnG=ylr=. Visitado el: 15 de marzo del 2016.

Toscano Morales, L. A. B. R., Alfredo Nicolas (Ed.). (2009). *Análisis de los parámetros y selección de hornos para la combustión de biomasa.*: 18-feb-2009.

Wladimir, T., Estefanía, A., Marco, R., Diego, V., y Soledad, C. (2011). *Aprovechamiento de Recursos Forestales en el Ecuador: Productos maderables.* (período 2010).

Recuperadode:http://www.itto.int/files/user/pdf/PROJECT_REPORTS/PD%20406_06_%20Forest%20Harvesting%20in%20Ecuador%202010%20offenses%20and%20forfeiture.pdf. Visitado el: 3 de marzo del 2016.

Yánquez, G. G. (2012). *Diseño de una planta de peletización en Castilla y León.* Universidad Carlos III de Madrid. Recuperado de: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/14463/PFC_Guillermo_Gonzalez_Yanquez.pdf?sequence=2. Visitado el: 25 de febrero del 2016.

CAPÍTULO VII

ANEXOS



Fotografía: Cárdenas, 2016

Muestreo de aserrín



Fotografía: Cárdenas, 2016

Secado de aserrín



Fotografía: Cárdenas, 2016

Preparación de muestras



Fotografía: Cárdenas, 2016

Pesado de muestras



Fotografía: Cárdenas, 2016

Muestras de ceniza



Fotografía: Cárdenas, 2016

Muestras de aserrín



Fotografía: Cárdenas, 2016

Quemado de aserrín



Fotografía: Cárdenas, 2016

Determinación de proeína



Fotografía: Cárdenas, 2016

Molido de aserrín



Fotografía: Cárdenas, 2016

Compactación de aserrín



Fotografía: Cárdenas, 2016

Manómetro de temperatura



Fotografía: Cárdenas, 2016

Pellets de aserrín