

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

OBTENCIÓN DE BIOCARBÓN MEDIANTE TORREFACCIÓN SECA A PARTIR DE RESIDUOS DE BALSA (*Ochroma pyramidale*)

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA

**LEIDY VIVIANA BERMEO VALENCIA
(leidy.bermeo@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: ING. MARCELO FERNANDO SALVADOR QUIÑONES
(marcelo.salvadorq@epn.edu.ec)**

Quito, febrero 2018

© Escuela Politécnica Nacional (2018)
Reservados todos los derechos de reproducción.

DECLARACIÓN

Yo, Leidy Viviana Bermeo Valencia declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Leidy Viviana Bermeo Valencia

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita Leidy Viviana Bermeo Valencia bajo mi supervisión.

Ing. Marcelo Salvador
DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

A Dios, quien está con Él lo tiene y lo puede todo, al niño de mis ojos Sebastián, a mi familia en especial a mis padres por todo su esfuerzo y sacrificio. Les amo con todo mi corazón.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	x
INTRODUCCIÓN	xii
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Biomasa	1
1.1.1 Disposición de la biomasa	2
1.1.2 Componentes de la biomasa	4
1.1.3 Propiedades de la biomasa	6
1.1.4 Tipos de biomasa	8
1.1.4.1 Según el contenido de humedad	8
1.1.4.2 Según su origen	8
1.1.4.3 Según su estado	8
1.1.5 La Balsa	9
1.1.6 Métodos de transformación de la biomasa	10
1.2 Torrefacción	11
1.2.1 Descripción del proceso	13
1.2.2 Influencia de las características físicas, químicas y térmicas de la materia prima en el proceso de torrefacción	15
1.2.3 Influencia de la temperatura en el proceso de torrefacción	16
1.2.4 Influencia del tiempo de residencia en el proceso de torrefacción	16
1.3 Biocarbones	17
1.3.1 Generalidades	17
1.3.2 Características de los biocarbones	17
1.3.3 Pellet de biocarbones	18
2. PARTE EXPERIMENTAL	22
2.1 Caracterizar física, química y térmicamente los residuos de balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>)	22
2.1.1 Caracterización física de la materia prima	22
2.1.1.1 Muestreo de la materia prima	22
2.1.1.2 Tamaño de partícula	22
2.1.1.3 Contenido de humedad	23
2.1.1.4 Contenido de volátiles	23
2.1.1.5 Contenido de cenizas	23
2.1.2 Caracterización química de la materia prima	24

2.1.2.1	Determinación del contenido de lignina	24
2.1.2.2	Determinación del contenido de celulosa	25
2.1.2.3	Determinación del contenido de hemicelulosa	25
2.1.3	Caracterización térmica de la materia prima	25
2.1.3.1	Poder calórico	25
2.1.3.2	Análisis termogravimétrico	25
2.2	Determinación a escala laboratorio de las condiciones de proceso que permita obtener biocarbón de residuos de balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>) con la mayor eficiencia energética	26
2.2.1	Proceso de torrefacción	26
2.2.2	Caracterización física del biocarbón	27
2.2.2.1	Determinación de la humedad del biocarbón	27
2.2.2.2	Determinación de volátiles del biocarbón	28
2.2.2.3	Determinación de cenizas del biocarbón	28
2.2.3	Caracterización térmica del biocarbón	28
2.3	Obtención de pellets de biocarbón y determinación de su durabilidad mecánica y poder calórico	29
2.3.1	Obtención del pellet	29
2.3.2	Caracterización de la durabilidad mecánica de los pellets	30
2.3.2.1	Determinación de dureza	30
2.3.2.2	Durabilidad mecánica	31
2.3.2.3	Resistencia al impacto	32
2.3.2.4	Resistencia a la compresión	32
2.3.2.5	Densidad	32
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
3.1	Resultados de caracterización de la materia prima	33
3.1.1	Granulometría	33
3.1.2	Caracterización física	34
3.1.3	Caracterización química	35
3.1.4	Caracterización térmica	36
3.1.4.1	Poder calórico	36
3.1.4.2	Análisis termogravimétrico	36
3.2	Resultados de la caracterización física del biocarbón	38
3.2.1	Humedad	39
3.2.2	Cenizas	42
3.2.3	Volátiles	45
3.2.4	Carbón	49
3.3	Influencia de la temperatura y el tiempo de residencia en el proceso de	

Torrefacción	53
3.3.1 Rendimiento másico	53
3.3.2 Poder calórico del biocarbón obtenido	56
3.3.3 Eficiencia energética	60
3.3.3.1 Efecto del proceso de torrefacción sobre el poder calórico y la eficiencia energética	60
3.4 Caracterización mecánica de los pellets de biocarbón	64
3.4.1 Dureza	64
3.4.2 Durabilidad mecánica	68
3.4.3 Resistencia a la compresión	71
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
4.1 Conclusiones	76
4.2 Recomendaciones	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
ANEXOS	92

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Principales residuos de biomasa que se generan en la provincia de Pichincha	3
Tabla 1.2.	Composición química de diferentes materiales lignocelulósicos	6
Tabla 3.1.	Caracterización física inicial del aserrín de balsa	34
Tabla 3.2.	Caracterización química del aserrín de balsa	35
Tabla 3.3	Rendimiento másico, poder calórico y eficiencia energética	61
Tabla 3.4	Valor de dureza de los pellets a diferente temperatura y presión	64
Tabla 3.5.	Características mecánicas de los pellets	68
Tabla 3.6.	Resistencia a la compresión obtenida en el pellet	71
Tabla 3.7.	Comparación de parámetros de normas internacionales contra resultados de las pruebas del material ensayado	74
Tabla AI.1.	Valor del peso de la muestra retenido en cada malla, para la evaluación del tamaño de partícula del aserrín de balsa	94
Tabla AIV.1.	Datos y resultados de la evaluación del contenido de humedad del biocarbón torrefactado	105
Tabla AIV.2.	Datos y resultados de la evaluación del contenido de volátiles del biocarbón torrefactado	106
Tabla AIV.3.	Datos y resultados de la evaluación del contenido de cenizas del biocarbón torrefactado	108
Tabla AIV.4.	Datos y resultados de la evaluación del contenido de carbón del biocarbón torrefactado	110
Tabla AIV.5.	Datos y resultados de la evaluación del rendimiento másico del biocarbón torrefactado	111
Tabla AV.1.	Valor de la dureza obtenida	113
Tabla AV.2.	Valores de resistencia a la compresión	116

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Tipos de biocombustibles. a) biocombustible líquido, b) biocombustible sólido, c) biocombustible gaseoso	1
Figura 1.2.	Representación de la organización estructural de los componentes lignocelulósicos de la pared celular	5
Figura 1.3.	Métodos de transformación de la biomasa	10
Figura 1.4.	Características estructurales y químicas de la biomasa luego del proceso de torrefacción	12
Figura 1.5.	Evolución térmica de la torrefacción	14
Figura 1.6.	Análisis termogravimétricos de la madera y sus constituyentes	14
Figura 1.7.	Interdependencia entre las propiedades físico-mecánicas de la materia para la elaboración de pellets	18
Figura 1.8.	Materiales peletizados utilizando diferente materia prima	20
Figura 2.1.	Reactor de alta presión utilizado para realizar la torrefacción	27
Figura 2.2.	Prensa hidráulica utilizada para la elaboración de pellets	30
Figura 3.1.	Curva de granulometría del aserrín de balsa d_{80}	33
Figura 3.2.	Análisis termogravimétrico del aserrín de balsa	37
Figura 3.3.	Análisis termogravimétrico del aserrín de balsa variación % peso vs tiempo	38
Figura 3.4.	Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de humedad con la temperatura a 15 min de tiempo de residencia	39
Figura 3.5.	Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de humedad con el aumento de temperatura a 30 min	40
Figura 3.6.	Interacción del tiempo y la temperatura en el contenido de humedad	41
Figura 3.7	Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de cenizas con la temperatura a 15 min	42

Figura 3.8.	Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de cenizas con la temperatura a 30 min	43
Figura 3.9.	Interacción del tiempo y la temperatura en el contenido de cenizas	44
Figura 3.10.	Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de volátiles con la temperatura a 15 min	45
Figura 3.11.	Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de volátiles con la temperatura a 30 min	46
Figura 3.12.	Interacción entre la temperatura y el tiempo del contenido de volátiles a los 15 y 30 min de tiempo de residencia	47
Figura 3.13.	Diagrama de Pareto para evaluar la temperatura y el tiempo sobre el contenido de volátiles	48
Figura 3.14.	Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de carbón con la temperatura a 15 min de tiempo de residencia	49
Figura 3.15.	Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de carbón con la temperatura a 30 min de tiempo de residencia	50
Figura 3.16.	Comparación de la variación del contenido de carbón con la temperatura a los 15 y 30 min de tiempo de residencia.	51
Figura 3.17.	Superficie de respuesta para el contenido de volátiles y carbón con la temperatura a los 15 y 30 min de tiempo de residencia	52
Figura 3.18.	Variación del rendimiento másico con la temperatura y el tiempo durante el proceso de torrefacción	54
Figura 3.19.	Interacción del tiempo y la temperatura sobre el rendimiento másico del aserrín de balsa, durante el proceso de torrefacción	54
Figura 3.20.	Diagrama de Pareto para evaluar el efecto de la temperatura y tiempo sobre el rendimiento másico durante la torrefacción	55
Figura 3.21.	Diagrama de Barras del poder calórico obtenido a 15 y 30 min	57
Figura 3.22.	Diagrama de interacción de la temperatura y el tiempo sobre el poder calórico	58
Figura 3.23.	Diagrama de contorno de superficie de respuesta del poder	

	calórico	59
Figura 3.24.	Efecto de la temperatura y el tiempo sobre la eficiencia energética	61
Figura 3.25	Diagrama de Pareto evaluar el efecto de la temperatura y tiempo sobre el rendimiento másico durante la torrefacción	62
Figura 3.26.	Diagrama de superficie de contorno de la eficiencia energética	63
Figura 3.27.	Diagrama de interacción de la temperatura y la presión para la dureza	65
Figura 3.28.	Diagrama superficie de respuesta estimada de la dureza a diferente presión y temperatura	66
Figura 3.29	Pellets obtenidos a presiones de a) 640, b) 150 y c) 50 kgf/cm ²	67
Figura 3.30.	Fotografía del pellet obtenido antes (a) y después (b) del ensayo de durabilidad	70
Figura 3.31.	Curva de resistencia de la probeta a la compresión	72
Figura AI.1.	Balanza analítica con la muestra de aserrín de balsa; b) tamiz vibratorio con la muestra de aserrín de balsa	93
Figura AI.2.	a) Partículas de aserrín retenidas en la malla 16; b) partículas de aserrín que pasó al fondo del tamiz rotatorio	94
Figura AII.1.	Equipo de extracción soxhlet	98
Figura AII.2.	a) Agitación del aserrín en hipoclorito de sodio, b) celulosa extraída del aserrín de balsa	99
Figura AII.3.	a) Equipo utilizado para la extracción de la lignina, b) lavado y filtrado de la lignina y c) lignina extraída	100
Figura AIII.1.	Resultado del análisis termogravimétrico en el cual varía la temperatura con el tiempo	101
Figura AIII.2.	Análisis termo gravimétrico del aserrín de balsa, en el que varía el porcentaje de peso con respecto al tiempo	102
Figura AIII.3	Ensayo termogravimétrico del aserrín de balsa, en el que varía el porcentaje de peso con la temperatura	102

Figura AIII.4.	Formación del aserrín de balsa a pastilla	103
Figura AIII.5.	Ingreso del oxígeno en la bomba calorimétrica	104
Figura AIII.6.	Acondicionamiento de la camisa adiabática con agua a 20 °C	104
Figura AV.1.	Ensayo de compresión realizado en una probeta de biocarbón	115
Figura AV.2.	Compresión de la probeta de biocarbón durante el ensayo	115
Figura AV.3.	Probeta de pellet de biocarbón luego del ensayo de compresión	116
Figura AVI.1	Esquema de la metodología realizada	117
Figura AVII.1	Informe del ensayo de poder calórico obtenido del biocarbón luego de la torrefacción	118
Figura AVII.2.	Informe del ensayo de poder calórico del pellet de biocarbón	119

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Determinación de las propiedades físicas del aserrín de balsa	93
ANEXO II Determinación de las características químicas del aserrín de balsa	98
ANEXO III Caracterización térmica del aserrín de balsa	101
ANEXO IV Datos experimentales de la caracterización física del biocarbón	105
ANEXO V Determinación de las propiedades mecánicas de los pellets	113
ANEXO VI Esquema de la metodología realizada	117
ANEXO VII Resultados del poder calórico obtenido	118

RESUMEN

El presente estudio se realizó con el objetivo de obtener biocarbón mediante torrefacción seca a partir de residuos de aserrín de balsa. Los residuos se caracterizaron física, química y térmicamente antes y al final del proceso, se determinaron a escala laboratorio las condiciones de operación para obtener un biocarbón con la mejor eficiencia energética y finalmente se caracterizaron las propiedades mecánicas de los pellets obtenidos.

Para determinar las mejores condiciones del proceso de torrefacción se realizó un diseño experimental 4x2, para lo cual se colocó el aserrín de balsa en un reactor de alta presión en atmósfera inerte (libre de oxígeno), y se lo sometió a diferentes temperaturas, estas fueron 220, 250, 280 y 300 °C, durante 15 y 30 min.

Una vez que se obtuvo el biocarbón, se realizó su caracterización física y térmica, y al biocarbón cuya eficiencia energética fue mayor, se lo compactó para la elaboración de pellets. Para conocer las condiciones de presión y temperatura de peletización del biocarbón se realizó un diseño experimental 3x3. Las presiones fueron de 50, 150 y 640 (kgf/cm²) y temperaturas de 17, 80 y 160 °C. Se determinó la durabilidad mecánica, dureza, densidad, resistencia a la compresión y al impacto de los pellets para mejorar su manejo, almacenamiento y transporte.

De la caracterización física inicial del aserrín de balsa se obtuvo un contenido de humedad, volátiles, cenizas y carbón de 14,56, 79,34, 1,13, y 4,96 % respectivamente, y de la caracterización térmica se determinó un poder calórico de 17,58 (MJ/kg).

Las condiciones de operación para la obtención del biocarbón con la mejor eficiencia energética fueron a 220 °C y 15 min, con una eficiencia energética de 87,18 %.

Los pellets con mejores características mecánicas fueron los obtenidos a 160 °C y 640 (kgf/cm²), con una dureza de 76 (shore A), una resistencia a la compresión de

7,12 MPa; durabilidad mecánica de 76,25 %, resistencia al impacto del 100 %, densidad de 574,69 (kg/m³), y poder calórico final de 24,83 (MJ/kg) mayor al poder calórico de la materia prima, considerándose una alternativa viable para reemplazar a los biocombustibles tradicionales.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las energías renovables actualmente es un tema de gran interés, debido a las crecientes preocupaciones medio ambientales y a la crisis energética actual relacionada con el agotamiento de los combustibles fósiles, siendo la biomasa la fuente de energía globalmente disponible, a diferencia de otros combustibles como el petróleo o el gas (Proskurina, Heinimó, Shipfer y Vakkilainen, 2017, p. 3).

La biomasa es favorable en la combustión debido a sus propiedades físicas, químicas y térmicas, sin mencionar que está ampliamente disponible. La industria forestal genera una gran cantidad de biomasa residual, ya que, para la producción maderera, de cada árbol sólo se aprovecha comercialmente el 20 %, un 40 % queda en el campo (ramas y raíces), y el 40 % restante durante el proceso, en forma de astillas y aserrín (Arteaga, Carballo , García , López y Geada, 2012, p. 91). La inhalación del polvo contenido en el aserrín provoca afecciones respiratorias debido al tamaño de partícula, a más de afectar recursos como el agua y el aire al ser arrojados indiscriminadamente (Cajas, 2009, p.3).

Se ha establecido que en el Ecuador el 65 % de la madera movilizada tiene como destino la industria maderera del cual el 18,5 % van a las procesadoras de balsa, (Romero, Velasteguí y Robles, 2011, p. 8), valor que representa el 90 % de la madera de balsa que se comercializa en el mundo (Parra, 2016, p. 42).

Sin embargo, su bajo poder calórico, mala resistencia mecánica y en algunos casos el alto contenido de humedad, hacen que el uso de la biomasa sea menos atractivo; es por ello que es indispensable el conocimiento de sus propiedades físicas, químicas y térmicas, y para mejorarlas se han desarrollado varios tipos de conversiones termoquímicas (Yan, Pérez y Sheng, 2017, p. 473). Estas propiedades determinan el comportamiento de los combustibles en los procesos de combustión, gasificación, pirólisis y torrefacción seca que es uno de los métodos más prácticos con requisitos de temperatura relativamente bajos (Proskurina et al., 2017, p. 3).

La torrefacción seca es un pretratamiento termoquímico de la materia previo a la combustión, durante la cual la biomasa se calienta en un reactor a temperaturas entre 200 y 300 °C en atmósfera libre de oxígeno para obtener biocarbón (Gil, 2012, pp. 65-66).

En este trabajo se determinaron las características físicas, químicas y térmicas de los residuos de balsa (*Ochroma pyramidale*) provenientes de la empresa “GIBAGO CIA LTDA” ubicada en Puembo, provincia de Pichincha. Al ser el estudio del biocarbón una temática actual por ser un combustible renovable a corto plazo, formado por vía biológica (Arteaga et al., 2012, p. 91), se determinó a escala laboratorio las condiciones de proceso que permitan obtener un biocarbón con la mejor eficiencia energética.

Para poder realizar un uso adecuado del biocarbón y aprovechar el potencial energético, es necesario densificar la biomasa torrefactada y elaborar pellets, debido a que el consumo de los mismos se ha incrementado en los últimos años, aumentando en Europa las importaciones del 12 al 34 % de la producción en la última década (Atuesta y Sierra, 2015, p. 19; Acharya, Sule y Dutta, 2012, p. 360), es por ello que adicionalmente se elaboraron pellets de biocarbón y se caracterizó su durabilidad mecánica y poder calórico.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 BIOMASA

La biomasa se define como la masa total de la materia orgánica que se puede aprovechar energéticamente (Arauzo, Bimbela, Ábrego, Sánchez y Gonzalo, 2014, p. 2). Esta materia proviene de un proceso de fotosíntesis, donde el dióxido de carbono presente en la atmósfera es capturado y combinado con el hidrógeno del agua para formar macromoléculas mayoritariamente compuestas por H, C y O (Jara, 2009, p. 24).

La energía solar que se almacena en la biomasa durante el crecimiento de los vegetales mediante la fotosíntesis, se transforma en energía química y es empleada en la síntesis de hidratos de carbono (Carrillo, 2004, p. 7). La biomasa es considerada como la única y mayor fuente de energía renovable en el mundo, pues supone el 9,2 % de la oferta total de energía primaria (toda forma de energía disponible en la naturaleza antes de ser transformada, como los combustibles crudos, energía eólica, solar y geotérmica), y el 70,2 % de la oferta total de energía renovable disponible para la producción de productos basados en carbón, y al ser transformada se puede obtener un combustible sólido, líquido o gaseoso como se observa en la Figura 1.1 (Cerdá, 2012, p. 124).

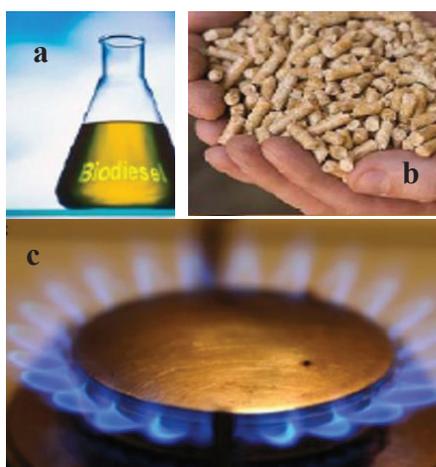


Figura 1.1. Tipos de biocombustibles. a) biocombustible líquido, b) biocombustible sólido, c) biocombustible gaseoso
(Durán y Agresott, 2016, p. 32)

La combustión de la biomasa no aumenta el efecto invernadero, ya que el carbono que se libera, es absorbido por las plantas durante su crecimiento. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), las emisiones de contaminantes como SO₂ y NO, son generalmente más bajas para la biomasa que para el carbón y gasóleo, pero la cantidad de partículas que ésta emite son mayores (IPCC, 2011, p. 63).

Según Major (2008), la biomasa es “un elemento indispensable para mantener el equilibrio ecológico y permite conservar y enriquecer la diversidad biológica y el suelo” (p. 21), derivada de transformaciones naturales e industriales, desechos y residuos de la agricultura, silvicultura e industrias relacionadas; comprende una diversidad de fuentes energéticas que pueden compartir características, pero no la tecnología para su obtención, ni su aplicación en la producción energética (Cerdá, 2012, pp. 117, 118).

1.1.1 DISPOSICIÓN DE LA BIOMASA

Según datos del Fondo de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), “algunos países obtienen el 90 % de su energía de la leña y otros biocombustibles”, por lo tanto, representan la tercera parte del consumo energético en Latinoamérica, África y Asia. Al ser la principal fuente de energía en el ámbito doméstico para alrededor de dos millones de personas su aprovechamiento ofrece oportunidades de empleo y beneficios ambientales (Abad y García, 2010, p. 235). Generalmente se utiliza leña para cocinar y proporcionar calor, pero su eficiencia es baja y genera problemas de salud debido a los gases y partículas contaminantes que emite como producto de la combustión incompleta de la biomasa (Mich, 2003, p. 3).

Según la Unión Europea (UE), la demanda de biomasa esperada excederá el potencial antes de 2020, y posiblemente en ese año no se suministrará suficiente madera para satisfacer las necesidades de la industria y alcanzar los objetivos de energía renovable de forma sostenible (Cerdá, 2012, p. 128).

El Ecuador produce una alta cantidad de materia orgánica por los recursos que posee (agrícolas, forestales y pecuarios), cuyos residuos pueden ser utilizados para la producción de energía limpia y renovable. Su aprovechamiento dependerá de la cantidad de los mismos, condiciones de cultivo, poder calórico y localización. El Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, durante el 2014 realizó el levantamiento de la información sobre los cinco principales residuos de biomasa generados en la provincia de Pichincha, estos se pueden apreciar en la Tabla 1.1 (Instituto Nacional de Preinversión, 2014, pp. 3-18).

Tabla 1.1. Principales residuos de biomasa que se generan en la provincia de Pichincha

PROVINCIA	SUPERFICIE (km ²)	PRODUCTO	PRODUCCIÓN ABSOLUTA (t/año)	RESIDUOS (t/año)	ENERGÍA BRUTA (TJ/año)
Pichincha	9 537,87	Palma africana	199 204,36	510 421,32	6 523,58
		Palmito	80 196,78	195 038,57	2 582,43
		Forestal	13 456,39	28 931,24	557,20
		Cacao	4 087,72	50 610,9	342,32
		Piña	6 548,28	6 269,98	56,82
		Total	303 493,53	791 272,01	10 062,35

(Instituto Nacional de Preinversión, 2014, p. 18)

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático indica que la biomasa que se genera depende de factores como: la población, el desarrollo económico y tecnológico, la agricultura, los cambios climáticos, la silvicultura y su influencia en la demanda de alimentos, el uso futuro de la tierra, la capacidad de adaptación, la conservación de la naturaleza, la degradación de la tierra y la escasez de agua. La biomasa hoy en día proporciona alrededor de 50 EJ/año, pero podría llegar entre 100 y 300 EJ/año (IPCC, 2011, p. 48). Entre las principales aplicaciones que tiene la biomasa para consumo doméstico es la generación de calor en la producción de agua caliente, y en la industria para la generación de electricidad, también se menciona la cogeneración, co-combustión, hibridación; y en el transporte puede utilizarse como un sustitutivo de la gasolina (bioetanol), o sustitutivo del gasóleo (biodiésel) (Giraldo, 2009, p. 4).

En el Ecuador se han implementado diferentes proyectos para el aprovechamiento de residuos sólidos agrícolas y urbanos, actualmente existen dos biodigestores ubicados en el norte y sur de la ciudad de Quito. En Chone se construyó una planta generadora de energía eléctrica a partir de basura, y en Cuenca se procesará biogás obtenido del relleno sanitario y con la ayuda de dos generadores de combustión interna producirán energía que servirá para autoabastecimiento. Adicionalmente se cuentan con proyectos piloto para propiciar que ganaderos o agricultores opten por esta alternativa, ya que al ser puestos en marcha se podrán conocer posibles mercados para el uso de biocombustibles, otorgar una mejor economía e incentivar a la vez la investigación científica (CONELEC, 2013, pp. 290-291).

Las principales ventajas que tiene el uso de la biomasa son: disminución del riesgo de incendios, solución de problemas con respecto a la destrucción de residuos, y la reducción del consumo de fuentes de energía no renovables, como el carbón o el petróleo (Monroy, 2008, pp. 2-3).

Entre los inconvenientes están el difícil aprovechamiento de la biomasa acuática, riesgo de agotamiento debido a las talas excesivas, falta de conocimiento del producto por parte de potenciales productores y usuarios, falta de garantía de suministro a largo plazo y tecnología nacional, sin mencionar que aún no está establecida en el mercado y sus costos pueden ser altos (Giraldo, 2009, p. 16).

1.1.2 COMPONENTES DE LA BIOMASA

La biomasa, independiente de su origen tiene una composición elemental muy similar con tres principales compuestos poliméricos que son: la hemicelulosa (10 – 34 %), celulosa (25 – 67 %) y lignina (32 – 55 %), las tres forman la pared celular de las células que la componen (Álvarez, Pizarro y Folgueras, 2013, p. 1).

En la Figura 1.2 se pueden observar los componentes poliméricos; lignina, celulosa y hemicelulosa de la biomasa.

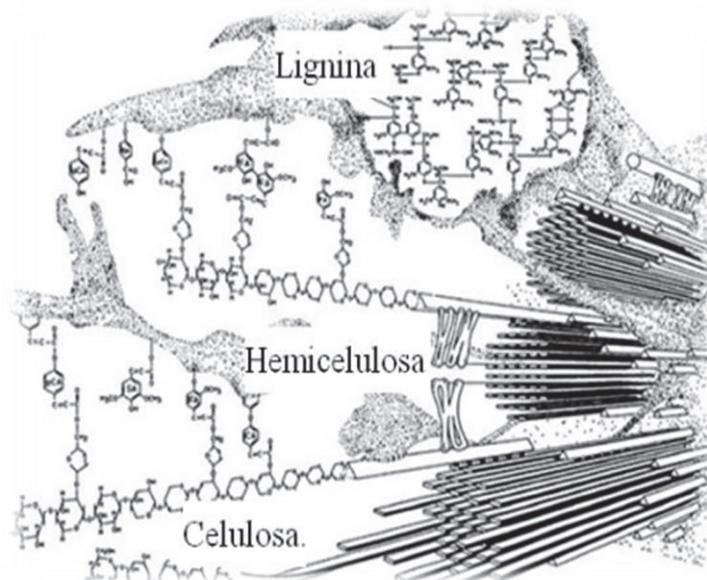


Figura 1.2. Representación de la organización estructural de los componentes lignocelulósicos de la pared celular
(Prinsen, 2010, p. 17)

La celulosa es un polímero lineal que representa el 45 % del peso de la madera, está compuesta por unidades de D-glucosa y es el componente que se encuentra en mayor cantidad en las paredes celulares de las fibras de biomasa. Las moléculas de la glucosa están unidas por enlaces β -(1,4), y el número de azúcares pueden formar puentes de hidrógeno inter e intramoleculares cuyos grupos $-OH$ sobresalen, y otorgan las características que determinan propiedades físicas y químicas de la biomasa, como el que sean difíciles de penetrar por disolventes o reactivos (Acharya et al., 2012, p. 35; Álvarez et al., 2013, p. 3).

La hemicelulosa está constituida por más de un tipo de azúcares (hexosas o pentosas) que son polímeros de unidades anhidroazúcaradas unidas por enlaces glucosídicos, los cuales forman una estructura polimérica compleja, que favorece la unión de la lignina y la celulosa; existen dos tipos de hemicelulosas; los xilanos que se encuentran en las maderas duras y los glucomananos en las maderas blandas (Guarnizo, Martínez y Valencia, 2009, p. 285).

La lignina es uno de los polímeros más abundantes en las plantas, considerada como un recurso renovable asequible y de potencial uso industrial, su estructura

es amorfa y tridimensional, resultado de la polimerización deshidrogenativa de unidades de fenilpropanoides (Urien, 2013, p. 15).

El mayor contenido de carbono e hidrógeno de la lignina incide en el contenido final de energía. La estructura y composición química de la hemicelulosa, celulosa y lignina determinan las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la madera, la organización de las fibras de la celulosa provocan una estabilidad térmica elevada (Urien, 2013, p. 16). En la Tabla 1.2 se indica la composición química de diferentes materiales lignocelulósicos.

Tabla 1.2. Composición química de diferentes materiales lignocelulósicos

Material	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Madera dura	40-55	24-40	18-25
Madera suave	45-50	25-35	25-35
Cáscara de nuez	25-30	25-30	30-40
Papel	85-99	0	0-15
Desechos sólidos de ganado	1,6-4,7	1,4-3,3	2,7-5,7
Paja de trigo	25,7	32	0-15
Paja de arroz	27	34	14,2

(Arteaga, Segura y Diéguez, 2016, p. 62)

1.1.3 PROPIEDADES DE LA BIOMASA

Las propiedades de la biomasa consideradas como las más relevantes para definir su calidad son:

- **Contenido de humedad.**- Es la cantidad de agua que contiene una muestra. Controla la cantidad de energía liberada, ya que parte de esta energía se utiliza para vaporizar el agua producida (Durán y Agresott, 2016, p. 24). Este parámetro influye en el valor de energía, ya que se requiere 2,44 MJ de energía por cada kilogramo de agua evaporada y un kilogramo de biomasa seca tiene de 18 a 19 MJ, es por eso que la humedad sobre el

55 % no es recomendable, lo que hace a la medición de la humedad un parámetro necesario para procesar la biomasa (Jará, 2009, p. 26).

- Tamaño de partícula.- No siempre es el adecuado para su procesamiento pues en ocasiones la biomasa necesita ser triturada para procesarla, y su forma puede afectar la dinámica de combustión (Melissari, 2011, p. 56).
- Poder calorífico.- Es la cantidad de energía que se desprende por un kilogramo de combustible cuando este se quema. Si en la combustión se recoge el agua condensada se trata del poder calórico superior (PCS) y si el agua se evapora se trata del poder calórico inferior (PCI) (Martín, 2005, p. 59). Por lo tanto, determina la energía disponible en la biomasa, ya que, a mayor humedad, menor eficiencia de combustión, pues una gran parte del calor que se libera es utilizado para evaporar el agua (Herguedas, Taranco, Rodríguez y Prieto, 2012, p. 8).
- Densidad.- Se define como el valor de la masa por la unidad de volumen y es un parámetro fundamental ya que indirectamente mide el contenido neto de energía de la biomasa (Herguedas et al., 2012, p. 9).
- Contenido de volátiles.- Es la combinación de carbono, hidrógeno y compuestos gaseosos determinados por la ruptura de los enlaces químicos en la descomposición de la materia (Castells et al., 2005, p. 64).
- Contenido de cenizas.- Determina la cantidad de combustible que no participa en el proceso de combustión, son cationes como el calcio, o el potasio (Camps, 2008, p. 88). Un alto contenido de cenizas es perjudicial para su aprovechamiento energético (Castells et al., 2005, p. 64). En varios combustibles de biomasa su valor está entre 0,3 a 6,2 % (Francescato, Antonini y Zuccoli, 2008, p. 22).
- Contenido de carbono fijo.- Es la masa sobrante después de la liberación de las sustancias volátiles, cenizas y humedad (Urien, 2013, p. 17).

1.1.4 TIPOS DE BIOMASA

1.1.4.1 Según el contenido de humedad

- Bajo contenido de humedad.- Plantas leñosas, herbáceas.
- Alto contenido de agua.- Plantas herbáceas o gramíneas, acuáticas y los abonos (Urien, 2013, p. 12).

1.1.4.2 Según su origen

- Primaria.- Es formada por cultivos energéticos que son especies vegetales para uso energético, como el cardo, sorgo o la colza, etc, y especies forestales leñosas como el chopo, eucalipto, sauce, (Giraldo, 2009, p. 5).
- Residual o secundaria.- Son residuos forestales generados por las operaciones de poda, residuos de olivos, viñedos y frutales, incluyen a los residuos herbáceos como la paja o el maíz, residuos de industrias forestales como las cortezas, aserrín o astillas y residuos agrícolas como cáscaras de frutos secos o arroz (IDAE, 2007, p. 20).

1.1.4.3 Según su estado

- Biomasa sólida.- Agrupa a los residuos de industrias agrícolas y forestales que son la mayor fuente de biomasa actualmente poco explotada. De cada árbol extraído en la producción maderera, se aprovecha únicamente el 20 %, el 40 % es dejado en el campo, y el 40 % restante durante el proceso, en donde se obtienen varios residuos como astillas, cortezas y aserrín, contaminantes para el ambiente (Arteaga et al., 2012, p. 91).
- Biomasa líquida.- La cual abarca a los residuos ganaderos, industriales y aguas residuales urbanas, aceites y biocarburantes.

- Biomasa gaseosa.- Trata el metano o biogás obtenido de residuos animales, vertederos y escombreras mediante procesos termoquímicos o microbiológicos (Herguedas et al., 2012, p. 7).

1.1.5 LA BALSA

Según datos del Banco Central del Ecuador se registran 40 empresas procesadoras de madera de balsa (Parra, 2016, p. 42). El árbol de balsa (*Ochroma pyramidale*) crece en gran cantidad en la zona ecuatorial, este árbol se reproduce fácilmente y es un recurso constantemente renovado ya que tiene extensiones muy grandes debido a su rentabilidad (Andrade, Bonet y Coello, 2014, pp. 36-37).

Para su procesamiento los árboles de balsa son cortados en trozos los cuales son aserrados en forma recta y transportados a las plantas de producción, allí son secados a 70 °C hasta tener una humedad aproximadamente de 8 % y desaparecer el riesgo fitosanitario. Luego se somete a un proceso de mecanización para tener una forma recta, plana, lisa y libre de defectos, proceso durante el cual se generan residuos como trozos de madera y aserrín (Andrade et al., 2014, p. 41).

La madera de balsa tiene usos tanto profesionales como industriales, pues es utilizada para la elaboración de modelos y maquetas a escala, muebles, juguetes, artesanías, entre otros (Parra, 2016, p. 42), también se la utiliza para el aislamiento térmico, acústico y vibratorio, embalajes para alimentos congelados, productos flotadores, aviones, construcción de casas, artículos deportivos como tablas hawaianas y botes (Molina, 2014, p. 16). En el campo energético la balsa es utilizada para la elaboración de las aspas de los molinos de viento empleados para la obtención de energía limpia, ya que se transforma la energía eólica en energía eléctrica, los países involucrados son China, EEUU y la Comunidad Europea, siendo China el mayor productor de energía eólica del mundo (Parra, 2016, p. 43).

1.1.6 MÉTODOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA

La biomasa debe ser sometida a diferentes procesos para ser utilizada como fuente de energía, estos procesos transforman la energía acumulada en forma de carbono e hidrógeno, combustibles sólidos, líquidos, gaseosos o directamente en electricidad (Patiño, 2014, p. 48), la biomasa puede transformarse en productos de mayor valor agregado, al tratarse con diferentes métodos como se puede apreciar en la Figura 1.3.

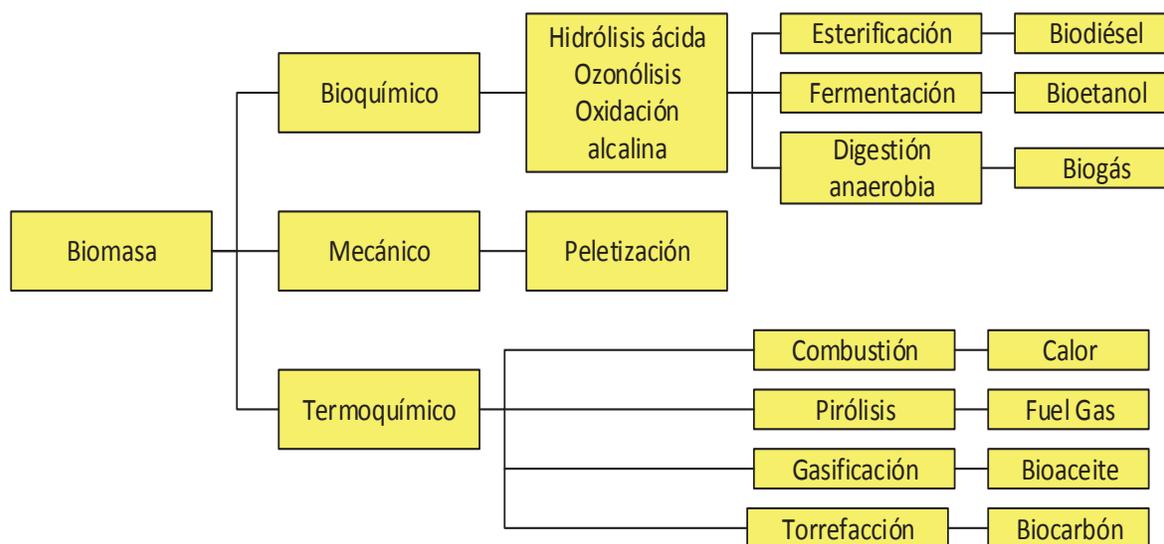


Figura 1.3. Métodos de transformación de la biomasa
(Arauzo et al., 2014, p. 2; Chew y Doshi, 2011, p. 2)

La tecnología adecuada para dicha transformación depende de su composición, grado de humedad y producto final deseado, ya que para biomazas con un bajo contenido de humedad es recomendable realizar una conversión térmica, y para biomazas con alto contenido de humedad es mejor realizar una conversión bioquímica (Arauzo et al., 2014, p. 1).

Para fangos dentro del tratamiento de aguas residuales y vertederos se utiliza la digestión anaerobia, ya que, mediante la biometanización, se obtiene una mezcla de gases con contenido de metano (Urien, 2013, p. 18), mientras la fermentación de azúcares produce el bioetanol con almidón de maíz o paja (Patiño, 2014, p. 49).

Los tratamientos térmicos más utilizados son: pirólisis, licuefacción, gasificación y torrefacción.

- La gasificación.- Es un proceso termoquímico en el que se transforma un combustible sólido en gaseoso mediante la oxidación parcial de la biomasa, a temperaturas entre 500 y 1 400 °C y en presencia de aire y/o vapor de agua (Patiño, 2014, p. 49).
- La licuefacción.- Es un proceso en el cual mediante una transformación termoquímica se obtiene un combustible líquido a baja temperatura, alta presión y se utiliza catalizadores para mejorar la reacción (Míguez, 2012, p. 16).
- La pirólisis.- Es un proceso endotérmico de calentamiento y descomposición de la biomasa en ausencia de oxígeno a temperaturas de hasta 600 °C para obtener biocarbón (Urien, 2013, p. 21).

Factores como la dificultad de molienda del material, alto contenido de humedad, bajo poder calórico y biodegradabilidad son los que limitan el uso de los residuos en la combustión, y una manera para poderlos utilizar como sustituto del carbón son pretratamientos mecánicos como la peletización y termoquímicos como la torrefacción (Arteaga, Flores, Escobar , Segura y Gordon, 2015, p. 6).

1.2 TORREFACCIÓN

Es un pretratamiento termoquímico realizado a temperaturas entre 200 y 300 °C en ausencia de oxígeno, y puede aplicarse a diferentes materiales orgánicos, ya que a pesar de que los primeros trabajos de investigación fueron sobre material a base de madera como el aserrín, poco a poco los estudios han involucrado cultivos agrícolas y residuos agroforestales (Chew y Doshi, 2011, p. 3), por lo que genera ventajas sobre sus propiedades en cuanto al uso energético, ya que produce un biocombustible sólido hidrofóbico, bio-resistente, fácil de triturar

(Arteaga et al., 2015, p. 8), y mejora sus propiedades ya que aumenta considerablemente la densidad energética de la materia, con propiedades físicas parecidas a las del carbón (CENER, 2016, p. 1).

En la Figura 1.4 se puede observar la degradación química de la madera luego del proceso de torrefacción.

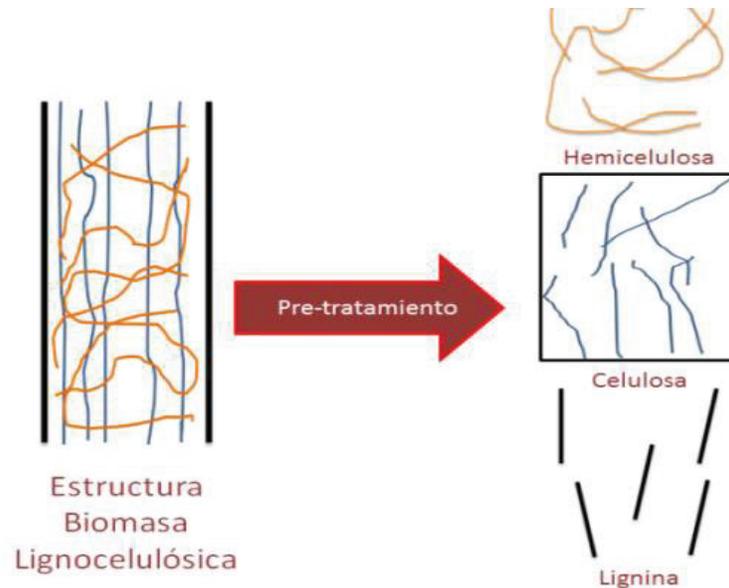


Figura 1.4. Características estructurales y químicas de la biomasa luego del proceso de torrefacción

(Tumuluru, Sokhansanj, Hess, Wringht y Boardman, 2011, p. 385)

La torrefacción experimenta diferentes procesos como la desvolatilización, deshidratación, despolimerización y carbonización, durante el cual la estructura original de la biomasa se destruye parcialmente mientras se calienta, ya que las reacciones producidas provocan un cambio en la estructura de la biomasa pues degradan la hemicelulosa a bajas temperaturas, luego la celulosa a temperaturas altas, y finalmente cambian las características de la lignina ya que se reduce el contenido en fibra (Chew y Doshi, 2011, p. 3).

Como subproducto de esas reacciones se generan agua, compuestos orgánicos volátiles como el metanol, ácido fórmico y acético, e incondensables como el CO, CO₂, y trazas de hidrocarburos, disminuye la relación de O/C e H/C, y aumenta el poder calórico (Gil, 2012, pp. 63-64).

1.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

A medida que transcurre el proceso de torrefacción, la biomasa cambia su color y sus características se parecen a las del carbón, el consumo de calor y la pérdida de masa más intensos ocurren en las primeras etapas del proceso. Cuando la biomasa se calienta desde la temperatura ambiente hasta 100 °C, pierde humedad y se encoge, sin embargo, si se vuelve a humedecer puede recuperar su estructura, y la mayoría de constituyentes químicos permanecen intactos. La siguiente etapa es la de secado, en esta etapa se elimina completamente la humedad y se da a temperatura constante. La lignina se ablanda lo que hace al material adecuado para la densificación, ya que en este estado actúa como aglutinante (Arteaga et al., 2016, p. 61).

El proceso de postsecado se da a temperaturas entre 150 y 200 °C, se rompen los enlaces de hidrógeno y carbono dando como resultado la emisión de extractos lipofílicos, y se da la deformidad, pues la biomasa no puede recuperar su estructura original si vuelve a humedecerse.

En la torrefacción (200-300 °C) al pasar una temperatura de 280 °C la reacción es totalmente exotérmica y la producción del gas aumenta debido a la carbonización y desvolatilización, en esta etapa se da la mayoría de interacciones intramoleculares de los enlaces de hidrógeno, C-C y C-O, se forman extractos hidrófilos, ácidos carboxílicos, alcoholes, aldehídos, éteres y gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), por lo que la estructura celular se destruye y pierde su naturaleza haciéndose frágil (Uslu, Faaij, y Bergman, 2008, p. 1207). Finalmente, a una temperatura mayor a 300 °C, se da la desvolatilización y carbonización de los polímeros, cambia totalmente su color y al enfriarse no existen cambios en su estructura o composición (Tumuluru, et al., 2011, p. 387).

En la Figura 1.5 se puede observar el proceso de descomposición de la biomasa durante el calentamiento en la cual se describen los cambios estructurales, y cambios de color en diferentes etapas durante la torrefacción.

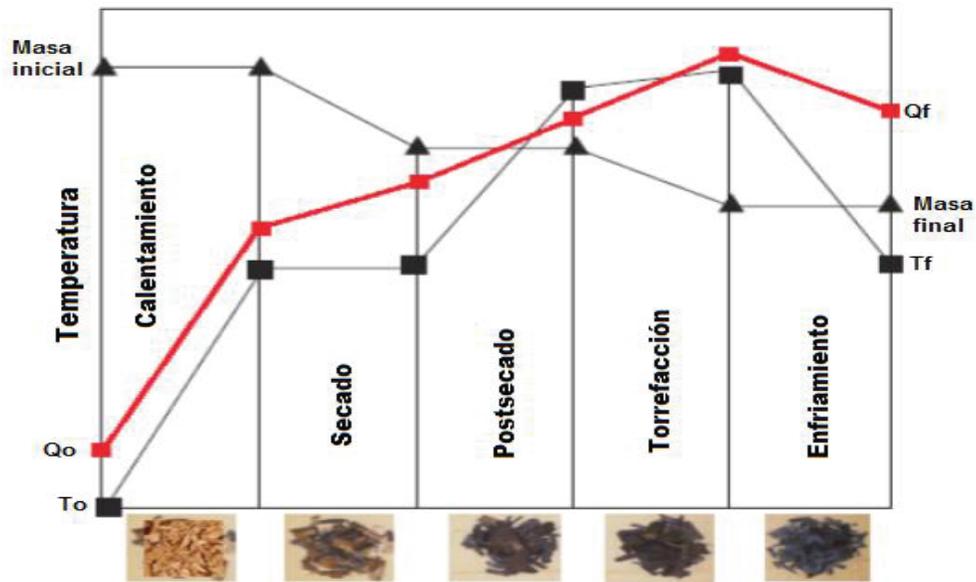


Figura 1.5. Evolución térmica de la torrefacción
(Arteaga et al., 2016, p. 62)

El comportamiento de la biomasa se puede observar mediante curvas en las cuales se aprecia su degradación conforme el aumento de la temperatura, mediante un estudio de análisis termo gravimétrico (TGA) como se observa en la Figura 1.6 (Martín, 2005, p. 111).

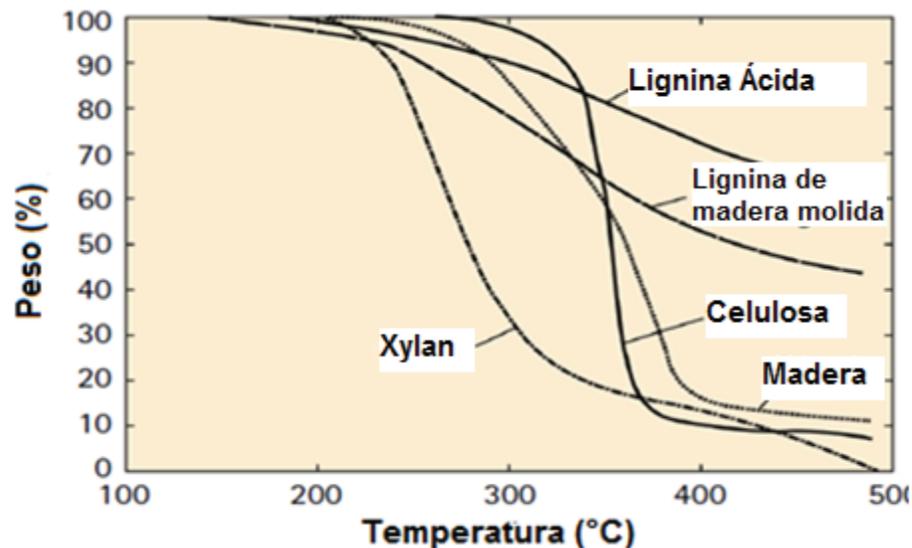


Figura 1.6. Análisis Termogravimétricos de la madera y sus constituyentes
(Tumuluru et al., 2011, p. 389)

Los reactores utilizados se clasifican según el mecanismo de transferencia de calor en; calefacción directa e indirecta.

- Reactores de Calefacción directa.- Equipos en los cuales el calentamiento se da en contacto directo con la biomasa y utilizan gas, vapor sobrecalentado o sólidos calientes.
- Reactores de Calefacción indirecta.- En estos reactores la biomasa se calienta a través de las paredes del reactor (Boissonnet, Dupont, Haarlemmer, Peduzzi , y Maréchal, 2014, p. 1).

Algunos de los reactores utilizados son: el reactor de tornillo sinfín, reactor rotatorio, reactor de lecho fluidizado, reactor de lecho fijo o móvil (García, 2016, p. 54).

La temperatura y el tiempo de residencia del proceso deben ser controlados para obtener una mayor eficiencia energética ya que estos parámetros determinan el grado de despolimerización de la biomasa (Tumuluru et al., 2011, p. 387).

1.2.2 INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y TÉRMICAS DE LA MATERIA PRIMA EN EL PROCESO DE TORREFACCIÓN

El tipo de biomasa influye sobre la distribución de los productos, por ejemplo, de las muestras de madera se obtiene mayor cantidad de producto sólido que líquido o gaseoso en comparación con el residuo agrícola, esto se da debido a la composición lignocelulósica de cada biomasa (Tito, Beatón y Zanzi, 2009, p. 185).

El tamaño de partícula interviene en los mecanismos de reacción, la cinética y la duración del proceso, ya que los reactivos que intervienen están atrapados en una matriz gruesa y difieren de las situaciones en las que los productos pueden escapar (Tumuluru, et al., 2011, p. 394). Los parámetros que deben ser controlados durante el proceso para obtener una mayor eficiencia son: la temperatura y el tiempo de residencia.

1.2.3 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE TORREFACCIÓN

La temperatura es un parámetro muy importante en la torrefacción, ya que define la degradación térmica alcanzada, misma que puede explicarse a través de la descomposición de cada uno de los polímeros que conforman su estructura celular (Arteaga, et al., 2015, p. 10).

La temperatura de torrefacción influye directamente sobre el aumento o disminución de la composición de la biomasa, ya que las pérdidas de hidrógeno y oxígeno se dan por la formación de agua, monóxido y dióxido de carbono durante la torrefacción, aumenta el contenido de carbono y disminuye el contenido de hidrógeno (H) y oxígeno (O), (Tito et al., 2009, p. 183).

A temperaturas menores a 250 °C la pérdida de masa es mínima, y a temperaturas mayores, la hemicelulosa se descompone en volátiles, y un producto sólido tipo carbón; la materia prima cambia de color marrón a negro entre 150 y 300 °C, debido al cambio en su composición y esto puede ser un buen indicador para describir la torrefacción (Tumuluru et al., 2011, p. 387). A temperaturas sobre 250 y 280 °C el efecto de la temperatura sobre el producto torrefactado es mayor, ya que aumenta su poder calorífico (Tito et al., 2009, p. 183). Un aumento de la temperatura mejora las propiedades de adsorción tales como el área superficial, la porosidad y el carácter químico recalcitrante en los biocarbones leñosos, sin embargo, si la porosidad es muy alta puede afectar la eficiencia del material torrefactado al ser utilizado como combustible (Jindo, Mizumoto, Sawada, Sanchez y Sonoki, 2014, p. 6 619; Yan et al., 2017, p. 479).

1.2.4 INFLUENCIA DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN EL PROCESO DE TORREFACCIÓN

El tiempo de residencia, aunque en menor medida, también afecta la descomposición térmica de la biomasa. Al aumentar el tiempo de residencia en la

torrefacción aumenta el poder calorífico (Tito et al., 2009, p. 183); sin embargo, mientras mayor es el tiempo de residencia, menor será el rendimiento en masa y energía (Arteaga et al., 2016, p. 64).

La densidad energética del sólido aumenta con el tiempo, de aquí que debe establecerse un compromiso entre el grado de torrefacción deseado, la temperatura y el tiempo de operación, pues aumentar el tiempo de operación no siempre trae beneficios considerables sobre las propiedades del sólido producido (Arteaga et al., 2015, p. 10).

1.3 BIOCARBONES

1.3.1 GENERALIDADES

Se entiende por biocarbones al material sólido carbonoso, de color negro, cuyas propiedades físico-químicas son aptas para el almacenamiento seguro y a largo plazo, ya que presenta una superficie desordenada y amorfa con relaciones oxígeno-carbono más altas que el carbón mineral, que es formado por procesos geológicos (Robolledo et al., 2016, p. 370). Se obtiene como producto de la torrefacción, y muestra una disminución en la relación hidrógeno-carbono (H/C) y oxígeno-carbono (O/C), la misma depende de la temperatura y tiempo de reacción a los cuales ha sido sometido (Boissonnet et al., 2014, p. 2). La producción de biocarbón provee una serie de beneficios complementarios ambientales, económicos y sociales debido a las características que posee (Robolledo et al., 2016, p. 370).

1.3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS BIOCARBONES

Entre las principales propiedades de los biocarbones se puede indicar que el tamaño de las partículas es muy variado (<2, 2-50 y >50 nm) y cuentan con una alta porosidad pues depende de la fuente y tamaño de la materia prima. En

cuanto a su composición química se ha determinado que tiene una amplia variabilidad, ya que un biocarbón producido a partir de roble presenta 90,8 % de carbono; 7,20 % de oxígeno y 1,70 % de hidrógeno, mientras que un biocarbón a partir de trigo presenta 80,40 % de carbono; 9,03 % de oxígeno y 2,75 % de hidrógeno (Robolledo et al., 2016, p. 171). La torrefacción y la compactación se han combinado para mejorar las propiedades de los biocarbones tomando la forma de pellet, obteniendo así una mayor resistencia a la degradación biológica, y un bajo contenido de humedad (3-4 %) de allí que tenga baja higroscopicidad (Gil, 2012, p. 63). En la Figura 1.7 se indica la interdependencia de las propiedades de la biomasa para la obtención de pellets.

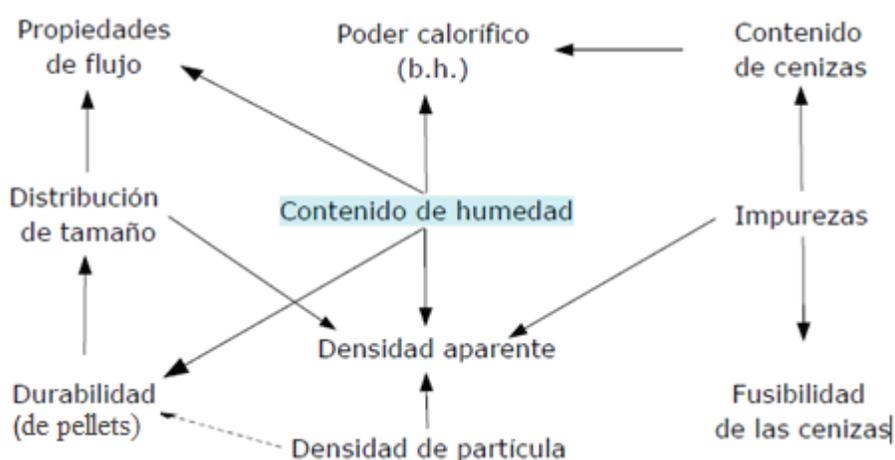


Figura.1.7. Interdependencia entre las propiedades físico-mecánicas de la materia para la elaboración de pellets
(Arroyo, 2010, p. 5)

1.3.3 PELLET DE BIOCARBONES

La peletización se trata de un proceso en el cual se compacta un material lignocelulósico o torrefactado con determinadas características de humedad y granulometría, para obtener cilindros cuya longitud puede variar de 2,0 a 7,0 cm y diámetro de 7 a 22 mm, con o sin la ayuda de aditivos, los cuales pueden proporcionar mayor cohesión al pellet, sin embargo, éstos pueden incidir en el costo, o resultar contaminantes en caso de que se utilicen en chimeneas domésticas (Martín, 2005, p. 61).

Para poder realizar un uso adecuado del biocarbón y aprovechar este potencial energético es necesario densificar la biomasa torrefactada para utilizarla de mejor manera, creando dos tipos de productos, las briquetas y los pellets, los cuales tienen una densidad que aumenta entre 40 y 200 kg/m³ hasta un rango de 600 a 800 kg/m³, y junto al poder calorífico son las características que se requiere a la hora de diseñar equipos para el aprovechamiento energético (Acharya et al., 2012, p. 360).

La densificación es un fenómeno complejo que depende de parámetros como la composición química de los materiales, el pretratamiento que se le dé y el equipo utilizado para la densificación (Forero, Camargo y Sierra, 2014).

A presiones bajas las partículas se reorganizan y se elimina el aire situado en las aberturas de la masa, sin afectar sus propiedades mecánicas, a medida que aumenta la presión, las partículas sólidas comienzan a reorganizarse y disminuyen su porosidad; sin embargo, las estructuras comienzan a sufrir de algunos efectos mecánicos por la deformación elástica y plástica, ya que aumenta el contacto entre partículas y actúan las fuerzas intermoleculares de corto alcance (fuerzas de van der Waals, fuerzas electrostáticas) de esta manera la resistencia mecánica del pellet aumenta, pero si el valor de la presión aplicada al biocarbón durante la densificación para la obtención del pellet es demasiado alto, las partículas quebradizas del mismo se fracturarán (Forero et. al., 2014, p. 198; Gaitán y Moya , 2016, p. 335; Kaliyan y Morey, 2009, p. 48).

Es importante indicar que un menor tamaño de las partículas produce mayor densidad de los pellets y facilita la compresión de la biomasa (Forero et al., 2014, p. 198).

Los pellets prensados a temperaturas altas generalmente muestran áreas de falla de compactación, probablemente debido a la disminución de lignina, lo que provoca el aumento de la presencia de compuestos hidrofóbicos y disminuye las fuerzas intermoleculares del material ligno-celulosico (Stelte et al., 2011, p. 917), al tener una alta concentración de compuestos hidrofóbicos, tienen una baja

resistencia a la compresión, debido a que existe muy poca acción de las fuerzas intermoleculares como las fuerzas de Van der Waals (González, Rincón, Camargo, Dévora y Sierra, 2014, p. 85).

En la Figura 1.8 se presentan algunos ejemplos de material peletizado



Figura 1.8. Materiales peletizados utilizando diferente materia prima (Acharya et al., 2012, p. 361)

La durabilidad dominada por el proceso de densificación, está relacionada con la densidad energética del gránulo torrefactado, y depende a su vez de las características de la materia prima y condiciones de torrefacción, pues generalmente un grado más alto de torrefacción conduce a tener una mayor dificultad de peletización, debido a la resistencia limitada entre los enlaces de la partícula. Esta limitación se da por la pérdida de sitios de enlace de hidrógeno durante la deshidratación y despolimerización de la biomasa, sin embargo, se puede superar mediante el uso de un aglutinante, como la lignina, o el almidón (Arteaga, Grandón, Flores, Segura y Kelley , 2017, p. 19).

El valor de la durabilidad en comparación con los pellets convencionales de madera, es mayor, ya que según la Norma UNE-EN ISO 17831-1:2016 ésta debe estar entre el 97,5 y 98,0 % (ENplus, 2015, p. 7).

Si el pellet tiene alta resistencia al impacto, significa que tiene gran capacidad de absorber golpes sin romperse, los materiales que contienen celulosa absorben energía al momento de impactarse (González et al., 2014, p. 88).

La densidad másica de los pellets torrefactados oscila entre 750-850 kg/m³, y la densidad energética puede llegar a ser 8 veces superior a la de la biomasa sin tratar (Arteaga et al., 2016, p. 65).

Tanto la temperatura, la composición química de las capas superficiales, concentración de compuestos hidrofóbicos, influyen en el enlace entre partículas, por lo tanto, tienen una influencia significativa en la calidad del producto durante el proceso de peletización (Kaliyan y Morey, 2009, p. 61; Stelte et al., 2011, p. 912).

Las normas utilizadas para garantizar la calidad de los pellets dependen del país en el cual se desea emplear el producto, en las mismas se evalúan la longitud, densidad, contenido de cenizas, poder calórico, entre otros (Forero, Guerrero, y Sierra, 2012, p. 23).

Las ventajas de los pellets a partir de material torrefactado es que, debido a sus características, el manejo del material, transporte y almacenamiento es mejor, además de poseer una mejor hidrofobicidad, resistencia y durabilidad (Chew y Doshi, 2011, p. 4220).

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y TÉRMICA DE LOS RESIDUOS DE Balsa (*Ochroma pyramidale*)

La metodología presentada se realizó con el fin de cumplir objetivos como: caracterizar física, química y térmicamente del aserrín de balsa, así como también determinar a escala laboratorio las condiciones del proceso que permita obtener biocarbón de residuos de balsa (*Ochroma pyramidale*) con la mejor eficiencia energética, y finalmente caracterizar los pellets obtenidos por ensayos de durabilidad mecánica y poder calórico.

2.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA MATERIA PRIMA

2.1.1.1 Muestreo de la materia prima

Para la obtención de un biocombustible sólido se utilizó como materia prima residuos de balsa procedentes de la Empresa “Gibago Cía Ltda”, ubicada en Puembo, provincia de Pichincha. Debido a que existen 9 000 kg/mes de residuos en dicha empresa, para el muestreo se siguió la Norma UNE-CEN/TS 14778, 14778 (*Biocombustibles sólidos-Muestreo*), para ello se tomó 1 muestra de alrededor del 5 % de la cantidad total de la pila de aserrín de madera de balsa (UNE-CEN/TS 14778, 2013). Posteriormente se realizó su caracterización física, térmica y química.

2.1.1.2 Tamaño de partícula

El tamaño de partícula del aserrín de balsa se determinó siguiendo la norma ASTM C136/C136M-14, (*Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*) mediante tamizado. Para el ensayo se colocó un tamiz vibratorio con un juego de mallas (#16, 20, 30, 50 y 60) en orden decreciente,

luego se colocó 100 g de muestra y se encendió el tamiz durante 10 min. Posteriormente se pesaron las porciones retenidas en cada malla, se registró su valor y se determinó el porcentaje retenido en cada una, al igual que el retenido acumulado, para elaborar una curva granulométrica y determinar el d_{80} , que fue la abertura del tamiz a la que pasó el 80 % de la muestra (ASTM C136/C136M-14, 2014).

2.1.1.3 Contenido de humedad

El contenido de humedad se determinó para conocer la cantidad de agua con la que entra la muestra al proceso. Este parámetro se determinó con la Norma ASTM E 871-82, (*Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*). El ensayo consistió en pesar 1 g de muestra, después se la colocó en una estufa a la temperatura de 103 °C durante 16 h. Posteriormente se colocó la muestra en un desecador hasta que se enfríe y se pesó nuevamente. La humedad se determinó por diferencia de peso (ASTM E 871-82, 2013).

2.1.1.4 Contenido de volátiles

El contenido de volátiles se determinó según la Norma ASTM E 872-82, (*Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels*), la cual consistió en colocar 1 g de muestra en un crisol, previamente tarado, y luego se colocó en una mufla a 950 °C durante 7 min, finalmente se pesó nuevamente y por diferencia de pesos se determinó el contenido de volátiles (ASTM 872-82, 2013).

2.1.1.5 Contenido de cenizas

El contenido de cenizas se realizó bajo la Norma ASTM D 1102-84, (*Standard Test Method for Ash in Wood*). Para ello se pesaron 2 g de muestra en un crisol previamente tarado. Luego se colocó el crisol en un horno a 580 °C, y se

realizaron repeticiones del calentamiento durante períodos de 30 min hasta que el peso final después del enfriamiento fue constante, posteriormente se colocó dentro de un desecador durante 30 min y finalmente se pesó (ASTM D 1102-84, 2013).

Los contenidos de humedad, volátiles y cenizas se realizaron para la determinación de la cantidad de carbón fijo en la muestra, este valor se obtuvo al restar 100 de la suma de los contenidos de humedad, volátiles y cenizas (Panduro, 2012, p. 7).

La caracterización se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria de la Escuela Politécnica Nacional de acuerdo a las normas ASTM, ya que la materia prima utilizada fue aserrín de balsa y dichas normas son aplicadas para aserrín, pellets, virutas de árbol u otro tipo de combustible particulado de madera.

Se realizó una repetición por cada ensayo y los procesos realizados junto con el ejemplo de cálculo se pueden observar a detalle en el Anexo I.

2.1.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA PRIMA

2.1.2.1 Determinación del contenido de lignina

Para la determinación del contenido de lignina primero se obtuvo el porcentaje de humedad de la muestra y luego se removió la cera o grasa de la misma, ya que para el análisis químico la muestra debe estar libre de grasa, esto se realizó mediante la Norma ASTM D1107-96 (*Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood*) (ASTM D1107-96, 2013). Una vez removida la grasa se determinó el contenido de lignina, mediante la Norma ASTM D1106-96, (*Standard Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood*) (ASTM D1106-96, 2013).

El procedimiento realizado se puede observar a detalle en el Anexo II.

2.1.2.2 Determinación del contenido de celulosa

Luego de remover la grasa se determinó el contenido de celulosa mediante la norma TAPPI T17 M-55 – 2016 (*Cellulose in Wood*) (Palacios, 2011, p.82).

2.1.2.3 Determinación del contenido de hemicelulosa

El porcentaje del contenido de hemicelulosa se determinó con la diferencia entre 100 y los porcentajes del contenido de celulosa y de lignina.

2.1.3 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LA MATERIA PRIMA

2.1.3.1 Poder Calórico

Para determinar el poder calórico se siguió la Norma ASTM D-5865-13, (*Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*) que reemplazó a la Norma ASTM E 711-87, (*Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter*) (ASTM D-5865-13, 2013). La bomba calorimétrica utilizada para este ensayo está ubicada en el Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria de la Escuela Politécnica Nacional.

2.1.3.2 Análisis Termogravimétrico

El ensayo de TGA se determinó según la Norma ASTM E1131-08, (*Thermogravimetric Analysis*), para ello se sometieron 10 mg de aserrín de balsa a un calentamiento de 20 °C/min desde la temperatura ambiental hasta de 850 °C y bajo atmósfera inerte en un analizador termo-gravimétrico (ASTM-E 1131-08, 2008), ubicado en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

2.2 DETERMINACIÓN A ESCALA LABORATORIO DE LAS CONDICIONES DE PROCESO QUE PERMITA OBTENER BIOCARBÓN DE RESIDUOS DE Balsa (*Ochroma pyramidale*) CON LA MAYOR EFICIENCIA ENERGÉTICA

2.2.1 PROCESO DE TORREFACCIÓN

Para la obtención del biocarbón se tomaron en cuenta parámetros como el tiempo y la temperatura, siendo la variable de salida la eficiencia energética. Por ello, se realizó un experimento factorial 4x2, donde las variables de entrada fueron la temperatura y el tiempo.

Las temperaturas de torrefacción fueron: 220, 250, 280 y 300 °C, y el tiempo de reacción o residencia fue de 15 y 30 min, para ello se utilizó un reactor batch cilíndrico de acero inoxidable de alta presión y 1 L de capacidad, cuyas dimensiones son 11,5 cm de diámetro y 34,0 cm de longitud.

Para el proceso de torrefacción, la materia prima no necesitó de un pretratamiento como secado, o molienda para reducir su tamaño, ya que al ser residuos de procesos como cepillado o cortado, el tamaño de partícula del aserrín fue pequeño. Por lo tanto, una vez realizada la caracterización física, química y térmica de los residuos de balsa, se procedió a iniciar la conversión térmica, para lo cual se pesó y se colocaron 62,5 g de aserrín de balsa en el reactor.

Posteriormente se cerró totalmente el reactor para evitar fugas y se introdujo nitrógeno, ya que el proceso debía darse en atmósfera inerte, luego se colocó la termocupla por la parte superior del reactor para poder determinar la temperatura dentro del reactor. Después se cerró la válvula por la que ingresó el nitrógeno, y se introdujo en el panel de control el valor de la temperatura a la cual se dio el proceso. Una vez que se alcanzó la temperatura establecida, se esperó el tiempo de retención propuesto en el diseño. Cuando finalizó el proceso de torrefacción se abrió la válvula del equipo para que salgan todos los gases y material volátil

eliminado como resultado del proceso de calentamiento. Finalmente se esperó a que el equipo se enfríe, y se lo destapó, para poder extraer el material torrefactado, el mismo se colocó en una bolsa para posteriormente pesarlo y determinar su rendimiento másico. En la Figura 2.1 se presenta el equipo utilizado durante el proceso de torrefacción, junto con el panel de control de temperatura del mismo.



Figura 2.1. Reactor de alta presión utilizado para realizar la torrefacción

2.2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL BIOCARBÓN

Una vez obtenido el biocarbón, se realizó la caracterización física del mismo siguiendo las normas ASTM utilizadas para carbón o coque, ya que el producto obtenido fue biocarbón.

2.2.2.1 Determinación de la humedad del biocarbón

La humedad se determinó siguiendo la Norma ASTM D3173-17, (*Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*). Para este ensayo

se colocó 1 g del biocarbón obtenido en un crisol previamente pesado y se colocó en una estufa a 105 °C, durante 1 h, luego se colocó en un desecador hasta que se enfríe y se volvió a pesar (ASTM D3173-17, 2013).

2.2.2.2 Determinación de volátiles del biocarbón

El contenido de volátiles se determinó según la norma ASTM D3175-17, (*Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke*) se colocó 1 g de la muestra en un crisol previamente tarado y sometió a 950 °C durante 7 min, se tomó su peso final cuando el crisol se enfrió (ASTM D3175-17, 2013).

2.2.2.3 Determinación de cenizas del biocarbón

El contenido de cenizas se determinó según la Norma ASTM D3174-12, (*Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*). Para lo cual se pesó 1 g del biocarbón en un crisol previamente tarado, y se colocó en una mufla a 500 °C durante 1 h, y luego se aumentó la temperatura hasta 750 °C durante otra hora, una vez que se enfrió el crisol se pesó y se registró su valor (ASTM D3174-12, 2013).

2.2.3 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL BIOCARBÓN

Se evaluó el poder calórico siguiendo la Norma ASTM D-5865-13, (*Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*) de cada uno de los biocarbónes obtenidos (ASTM D-5865, 2013).

Al obtener el poder calórico de cada uno de los experimentos realizados, se determinó su eficiencia energética en función del rendimiento másico. La eficiencia energética se determinó con la Ecuación 2.1:

$$Eficiencia\ Energética = \frac{Pc_{final} - n_{reacción}}{Pc_{inicial}} \quad [2.1]$$

Donde:

Pc_{final} : Poder calórico final del biocarbón obtenido, [kJ/kg]

$Pc_{inicial}$: Poder calórico inicial del aserrín de balsa, [kJ/kg]

El rendimiento másico se determinó con la Ecuación 2.2:

$$n_{reacción} = \frac{W_{Biocarbón}}{W_{Aserrín}} * 10 \quad [2.2]$$

Donde:

$n_{reacción}$: Rendimiento másico del proceso, [%]

$W_{Aserrín}$: Masa inicial del aserrín de balsa, [g]

$W_{Biocarbón}$: Masa final del biocarbón obtenido, [g]

2.3 OBTENCIÓN DE PELLETS DE BIOCARBÓN Y DETERMINACIÓN DE SU DURABILIDAD MECÁNICA Y PODER CALÓRICO

2.3.1 OBTENCIÓN DE PELLET

Para la obtención de los pellets se realizó un experimento factorial 3X3, donde las variables fueron la presión y la temperatura. Los valores de presión fueron 50, 150 y 640 kgf/cm², y de temperatura 17, 80 y 160 °C (Pérez, 2012, p. 2).

Para ello se colocó 5 g del biocarbón obtenido y se añadió 2 mL de aglutinante. El aglutinante utilizado fue el almidón de trigo al 10 % en masa. Luego se homogenizó bien la mezcla y se colocó en un molde de acero inoxidable de

2,8 cm de diámetro interno por 10 cm de altura. Después este molde se colocó en la prensa hidráulica calefactada y se sometió a los diferentes valores de presión y temperatura señalados en el párrafo anterior. Finalmente se desmoldó y se obtuvo el pellet de biocarbón, se realizó una réplica por cada ensayo. Los pellets obtenidos se secaron por 5 días a temperatura ambiente, para que obtener una mejor compactación.

La prensa hidráulica utilizada para la obtención de los pellets se puede apreciar en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Prensa hidráulica utilizada para la elaboración de pellets

2.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA DURABILIDAD MECÁNICA DE LOS PELLETS

2.3.2.1 Determinación de dureza

El ensayo de dureza se realizó siguiendo la Norma ASTM D2240, (*Standard Test Method for Rubber property- Durometer Hardness*), para ello se colocó el durómetro previamente encerado sobre la muestra, y se registró el valor señalado

al presionarlo contra la misma, se tomaron 10 valores de dureza en diferentes puntos del pellet (ASTM D2240, 2000). Este ensayo se realizó en el Centro de Investigación Aplicada a Polímeros (CIAP) de la Escuela Politécnica Nacional.

Los siguientes ensayos de durabilidad mecánica se realizaron a los pellets cuyo valor de dureza obtenido a las diferentes condiciones de peletización fue más alto.

2.3.2.2 Durabilidad mecánica

El ensayo de la durabilidad mecánica se realizó de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 17831-1, 2016, (*Determinación de la durabilidad mecánica de pélets y briquetas. Parte 1: Pélets*) (UNE-EN ISO, 2016). Para lo cual se tomó alrededor de 50 g de pellets y se los colocó en una cámara de ensayo rotatoria a 40 rpm por 10 min. Luego se pesó la cantidad de masa que quedó después de separar las partículas finas y erosionadas, a través de tamizado con orificio menor a 3,15 mm (Cancho, 2015, p. 34). El valor de la durabilidad se obtuvo con la Ecuación 2.3:

$$\%Du = \frac{M_f}{M_i} * 100 \quad [2.3]$$

Donde:

Du : Índice de durabilidad, [%]

M_f : Masa final de los pellets después del tamizado, [g]

M_i : Masa inicial de los pellets antes del tamizado, [g]

2.3.2.3 Resistencia al impacto

Se evaluó la resistencia al impacto según la Norma ASTM D440-86, (*Standard Test Method of Drop Shatter Test for Coal*), (ASTM, 2002) para lo cual se dejó

caer 4 veces una cierta cantidad de pellets desde una altura igual a 1,85 m al suelo sobre una placa metálica (Atuesta y Sierra, 2015, p. 21).

La resistencia al impacto se determinó con la Ecuación 2.4:

$$RI = \frac{N_{pi}}{N_{pf}} * 100 \quad [2.4]$$

Donde:

RI : Resistencia al impacto, [%]

N_{pi} : Número de pellets al inicio, [unidades]

N_{pf} : Número de pellets al final, [unidades]

2.3.2.4 Resistencia a la compresión

Se evaluó la resistencia a la compresión siguiendo la Norma ASTM 39/C 39M, (*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*), (ASTM, 2005) que consistió en colocar el pellet entre dos placas horizontales y comprimirlo hasta que se rompa. Mediante la obtención de la curva tensión-deformación se determinó la resistencia a la compresión del mismo (Atuesta y Sierra, 2015, p. 21).

2.3.2.5 Densidad

La densidad se determinó según la norma UNE-EN ISO 17828, (*Solid biofuels - Determination of bulk density*), (UNE-EN ISO, 2015) que consistió en pesar el pellet y tomar sus dimensiones para obtener el volumen, con el fin de determinar su densidad (ENplus, 2015, p. 5).

El análisis estadístico de los datos obtenidos en la experimentación, se realizará con el programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

3.1.1 GRANULOMETRÍA

En la Figura 3.1 se presenta la curva granulométrica para determinar el tamaño de partícula del aserrín de balsa, los datos que fueron necesarios para su elaboración se presentan en el Anexo I.

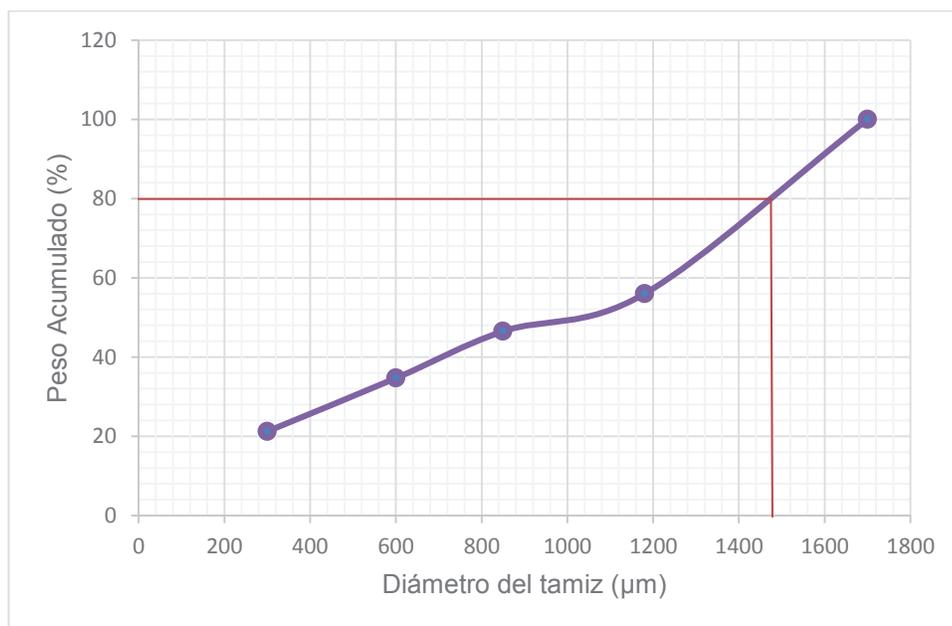


Figura 3.1. Curva de granulometría del aserrín de balsa d_{80}

Al ser los residuos de un proceso de corte y cepillado, no fue necesaria la disminución de su tamaño inicial, por lo tanto, de acuerdo a la Figura 3.1, el tamaño de partícula del aserrín de balsa está entre 1 180 y 1 700 (μm), lo que corresponde a las mallas 12 y 16.

El d_{80} determinado fue de 1 440 (μm), valor que está en el rango mencionado anteriormente, por lo tanto, no presentaría problema al momento de torrefactor ya que no intervendría en la dinámica de la combustión (Melissari, 2011, p. 56).

3.1.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

En la Tabla 3.1, se presentan los resultados de contenido de volátiles, humedad, cenizas y carbón del aserrín de balsa utilizado como materia prima.

Tabla 3.1. Caracterización física inicial del aserrín de balsa

Parámetros	Valor (%)
Humedad	9,25 ± 0,0031
Volátiles	84,51 ± 0,0036
Cenizas	1,13 ± 0,0008
Carbón	5,11 ± 0,0003

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 2)

Como se puede apreciar en la Tabla 3.1, el aserrín de balsa contiene en mayor porcentaje el contenido de volátiles con un valor promedio de 84,51 %, por lo tanto, poseen una gran cantidad de compuestos como el monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano e hidrocarburos, que debido al proceso de torrefacción pasan al estado gaseoso, estos compuestos contienen hidrógeno y carbono (Tito et al., 2009, p. 189).

En cuanto al contenido de humedad se observa que su valor promedio no es alto (9,25 %), en comparación con otras especies madereras, esto se debe a que se trabajó con residuos obtenidos de un proceso en el cual la madera ya fue tratada, es decir, pasó por un proceso de secado.

El contenido de cenizas es el menor de los componentes de la materia prima (1,13 %) ya que los residuos utilizados provienen de una biomasa (balsa) considerada limpia, sin mencionar que el obtener un valor bajo es importante para este estudio pues según Castells et al. (2005), un alto contenido de este material, puede limitar su aprovechamiento energético (p. 24), y está dentro del rango de varios combustibles de biomasa (0,3 a 6,2 %) (Francescato et al., 2008, p. 20). El valor promedio del contenido de carbón fue 5,11 %, y es menor comparado con

otros tipos de biomasa, ya que al ser obtenido por diferencia entre 100 y el resto de los componentes (humedad, volátiles, cenizas) depende del valor de los mismos, pues es la parte sólida no volátil de la materia prima obtenida luego del proceso de torrefacción.

3.1.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

En la Tabla 3.2, se presentan los valores de contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa del aserrín de balsa.

Tabla 3.2. Caracterización química del aserrín de balsa

Parámetros	Valor (%)
Lignina	34,32 ± 0,88
Celulosa	52,83 ± 5,78
Hemicelulosa	12,85 ± 4,90

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 2)

De acuerdo a la Tabla 3.2, el aserrín de balsa está compuesto en su mayor parte de celulosa (52,83 %), seguido de la lignina con un valor promedio de 34,32 % parámetro de mayor importancia e incidencia en el contenido final de energía, y finalmente se observa a la hemicelulosa con un valor de 12,85 %, esta favorece la unión de la lignina y la celulosa.

Los azúcares que conforman la celulosa son los que otorgan las características que determinan las propiedades físicas y químicas de la balsa, y el mayor contenido de hidrógeno y carbono de la lignina es el que incide en su estructura y composición química, por lo tanto, la hemicelulosa, celulosa y lignina, son los componentes que determinan las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la madera (Urien 2013, p.16). Como se puede apreciar en la Tabla 3.2 los valores obtenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa están dentro del rango establecido según Álvarez et al. (2013) que son: hemicelulosa (10 – 34 %), celulosa (25 – 67 %) y lignina (32 – 55 %) (p. 1).

3.1.4 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA

3.1.4.1 Poder calórico

El poder calórico se realizó para determinar qué tan eficiente sería utilizar el aserrín de balsa como biocombustible, el valor obtenido fue 17,58 (MJ/kg), un valor menor a otras materias primas como son el sauce (18,40 MJ/kg) y la madera de lauan 20,41 (MJ/kg), esto se debe a la composición tanto física como química de ambas biomásas, ya que la madera de lauan posee menor contenido de cenizas (0,25 %), material volátil (75,08 %) y humedad (7,45 %) (Chen, Hsu, Lu, Lee y Lin, 2011, p. 3 013).

En cuanto a la composición química posee un mayor contenido de lignina pues tiene 43,77 %, siendo esta última la que aporta energía a la biomasa (Chen et al., 2011, p. 3 013). Sin embargo, el valor obtenido es mayor que el trigo que tiene 17,20 (MJ/kg) (Francescato et al., 2008, p. 22) por lo tanto, existe similitud en el valor de la composición tanto física como química del aserrín de balsa.

El valor del poder calórico inicial es el que permitirá evaluar la eficiencia del proceso de torrefacción al obtener biocarbón, ya que esta depende del rendimiento másico, poder calórico inicial y final.

3.1.4.2 Análisis termogravimétrico

En la Figura 3.2 se presenta el análisis termogravimétrico realizado al aserrín de balsa. Se puede observar la variación de la pérdida de masa conforme aumenta la temperatura, en la misma se aprecia que de 0 a 100 °C existe pérdida de masa, esto se debe a la eliminación del agua contenida en la muestra, a partir de 100 a 200°C la pérdida de masa es despreciable ya que se mantiene constante, de 200 a 300 °C aumenta el porcentaje de pérdida pues al aumentar la temperatura comienza a degradarse la materia, y sus componentes químicos como la lignina, celulosa y hemicelulosa; sin embargo de 300 a 400 °C es el rango de temperatura

en el que se produce la mayor pérdida de masa, en el cual se degrada completamente la biomasa, eliminando a su vez el material volátil como son los gases, hidrógeno y carbono, esto continúa hasta 600 °C, temperatura a la cual la masa se degrada hasta su mínimo valor que es alrededor del 5 % en donde queda como residuo del ensayo las cenizas contenidas en el aserrín de balsa.

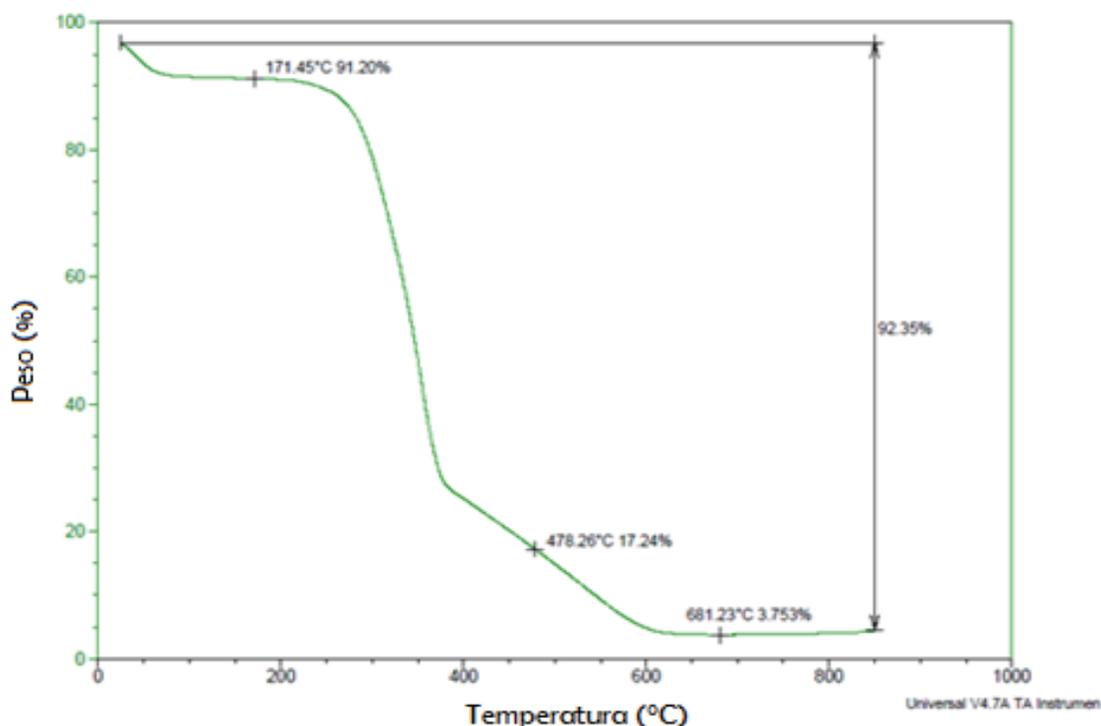


Figura 3.2. Análisis termogravimétrico del aserrín de balsa

En la Figura 3.3, se presenta la variación del peso del aserrín de balsa con respecto al tiempo. Se puede apreciar que el porcentaje de peso disminuye conforme aumenta el tiempo, durante el ensayo realizado a los 15 min el porcentaje de peso disminuyó en un 10 %, pero conforme aumentó el tiempo la pérdida de masa fue significativa ya que a los 18 min se obtuvo una pérdida del 73 % con una pendiente negativa en la curva. Como se puede observar se perdió alrededor del 97 % de masa en 30 min, tiempo en el cuál se dió la mayor degradación de masa, a partir de este punto la disminución de masa es despreciable. Esta pérdida fue debido a la liberación y combustión del material volátil contenido en la muestra (Arias, Pevida, Hermosa, Laza, Rubiera y Pis, 2008, p. 173).

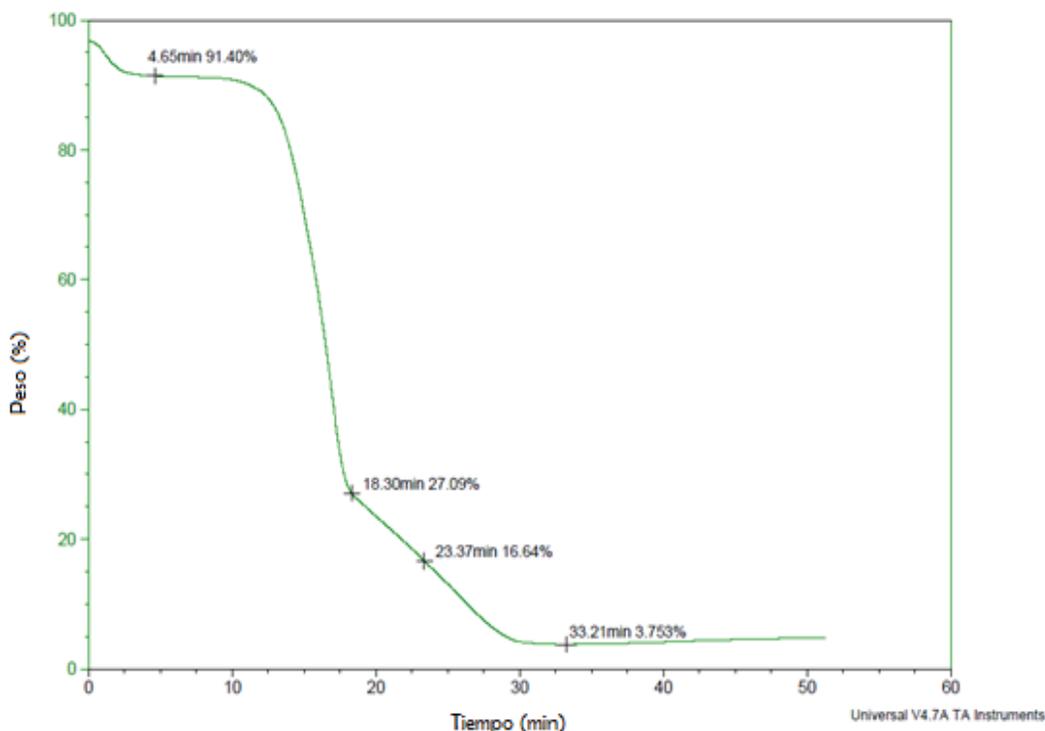


Figura 3.3. Análisis termogravimétrico del aserrín de balsa, variación % peso vs tiempo

El análisis termogravimétrico permitió posteriormente corroborar los tiempos y temperaturas de ensayo para el proceso de torrefacción.

3.2 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL BIOCARBÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la caracterización física realizada al biocarbón luego del proceso de torrefacción. Como contenido de humedad, cenizas, volátiles y carbón.

3.2.1 HUMEDAD

En la Figura 3.4 se indica el diagrama de cajas y bigotes en el cual se muestra el comportamiento del contenido de humedad del material torrefactado a distintas temperaturas y un tiempo de residencia de 15 min. Se puede observar que a partir

de 220 a 250 °C el contenido de humedad disminuye, conforme aumenta la temperatura, esta disminución se puede observar hasta los 280 °C, temperatura a la cual el valor de la humedad es constante hasta llegar a 300 °C, en donde la variación de humedad es mínima.

La pérdida de humedad se debe a que al aumentar la temperatura se rompen los enlaces intermoleculares y la biomasa pierde la capacidad de formar puentes de hidrógeno, a 280 °C se eliminó la mayoría del agua contenida en el aserrín, es por ello que su valor no cambia representativamente con respecto a 300 °C, ya que se podría decir, que éste es constante.

El valor de P obtenido fue 0,0011; y al ser este menor a 0,05 existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las temperaturas analizadas, con un nivel del 95 % de confianza, lo que indica que la temperatura al igual que el tiempo de retención influyen sobre el contenido de humedad.

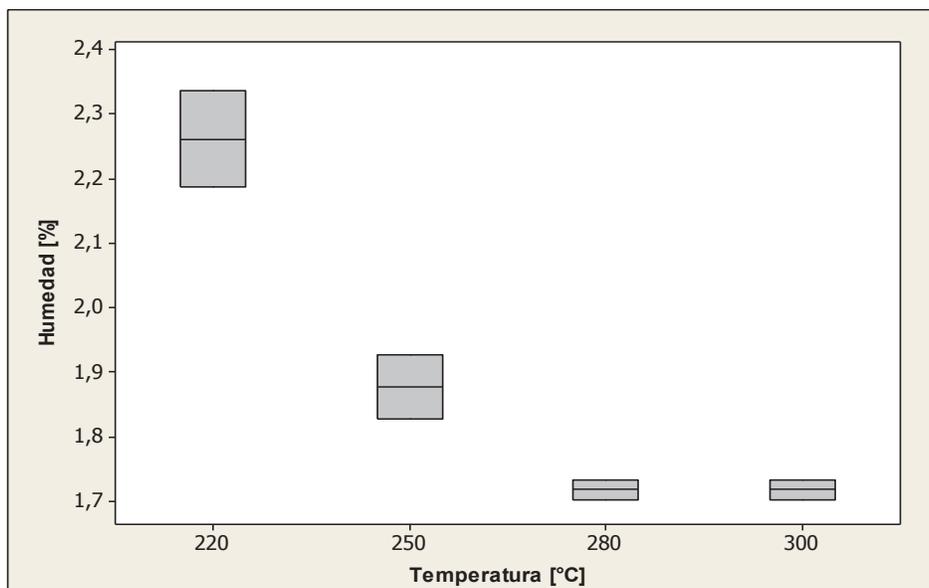


Figura 3.4. Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de humedad con la temperatura a 15 min de tiempo de residencia

En la Figura 3.5 se puede observar la variación del contenido de humedad del biocarbón obtenido, con respecto al aumento de temperatura a los 30 min. En la misma se aprecia que el contenido de humedad disminuye conforme aumenta la

temperatura, esto se debe a que al aumentar la temperatura se elimina la cantidad de agua existente en la muestra y se rompen los enlaces de los grupos –OH que conforman la celulosa, sin mencionar que, al permanecer a diferentes temperaturas por un mayor tiempo, aumenta la degradación de los componentes de la muestra inicial que fue el aserrín, para dar paso al biocarbón (Vínces y Poggi, 2014, p. 101).

El valor de P fue de 0,0064; lo que indica que existe una diferencia estadística significativa entre el valor del contenido de humedad a las diferentes temperaturas y estadísticamente existe una diferencia de más de 3 a 1 entre la desviación estándar más pequeña (0,0335) y la más grande (0,5328).

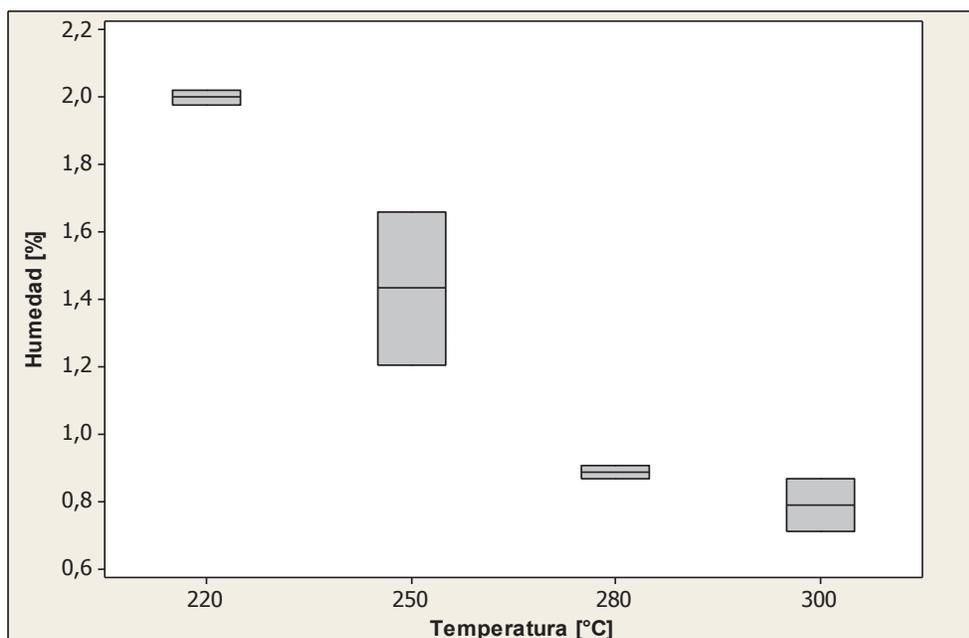


Figura 3.5. Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de humedad con la temperatura a 30 min de tiempo de residencia

En la Figura 3.6 se puede observar la interacción del tiempo y la temperatura durante el proceso en el contenido de humedad.

La interacción entre la temperatura y tiempo durante el proceso de torrefacción tiene un efecto significativo sobre el contenido de humedad del biocarbón ($P < 0,05$), por lo tanto, determinan su valor no sólo la temperatura o el tiempo de

residencia al actuar individualmente en el proceso, sino, la interacción conjunta de los mismos.

Al comparar los valores de humedad obtenidos a 15 y 30 min, se puede observar que el menor contenido de humedad se obtuvo a una mayor temperatura (300 °C) y tiempo (30 min), ya que a estas condiciones la degradación química de la biomasa, debido al aumento de la temperatura, es mayor. En este caso el contenido de humedad luego del proceso de torrefacción a 300 °C fue aproximadamente el doble a 15 min (1,6 %) que a 30 min (0,8 %).

Sin embargo, al comparar el contenido de humedad final, tanto a los 15 como a los 30 min y a cualquiera de las temperaturas ensayadas el valor obtenido está dentro del rango de humedad de biomasa torrefactada establecido por Bergman y Kiel (2005) que es de 1 a 6 % (p. 4).

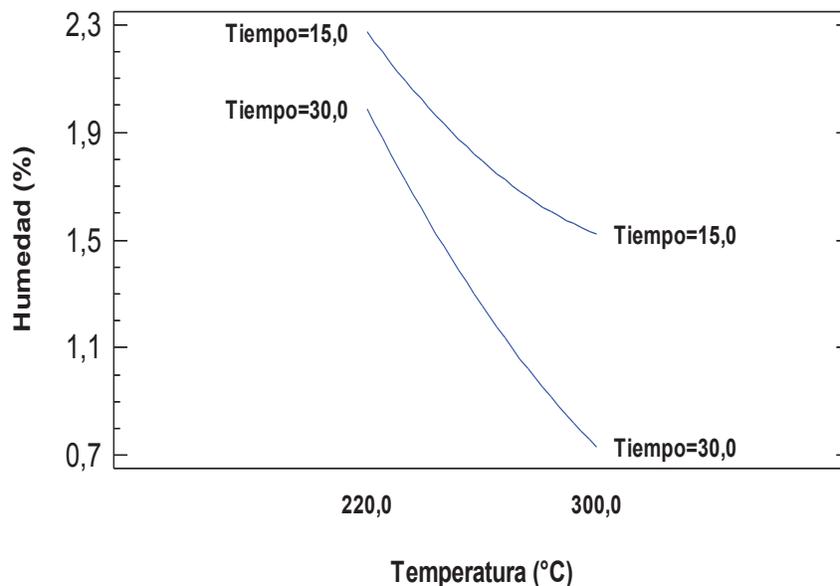


Figura 3.6. Interacción del tiempo y la temperatura en el contenido de humedad

3.2.2 CENIZAS

En la Figura 3.7 se presenta el comportamiento del contenido de cenizas del biocarbón a los 15 min de tiempo de residencia.

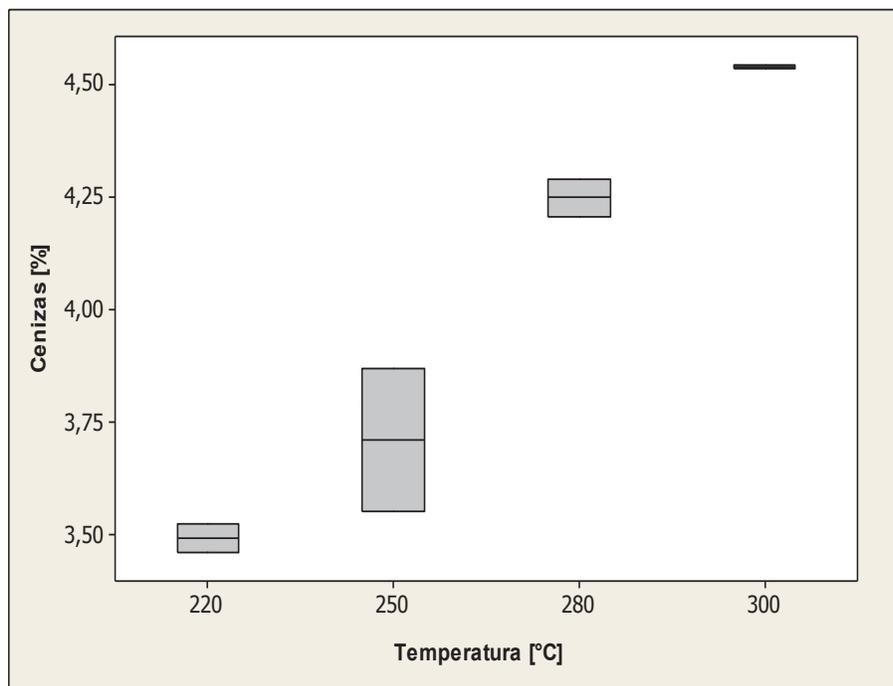


Figura 3.7. Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de cenizas con la temperatura a 15 min de tiempo de residencia

Al ser las cenizas compuestos como cationes de silicio principalmente y otros minerales, mientras aumenta la temperatura, la degradación de la materia que compone la biomasa es mayor, por lo tanto, durante el proceso de torrefacción se liberan los minerales contenidos en el aserrín, aumentando así la cantidad de cenizas que quedan tras aplicar una determinada temperatura en un determinado tiempo de retención.

Como se puede apreciar en la Figura 3.7 el contenido de cenizas luego del proceso de torrefacción está entre 3,52 a 4,53 %, con una variabilidad del 1,01 % por lo tanto la liberación del material inorgánico contenido en el aserrín con respecto al aumento de la temperatura no es representativa, sin embargo, un alto valor de cenizas puede perjudicar al aprovechamiento energético del biocarbón ya que mientras menor sea este valor es mejor, pues así no interferirá durante la combustión (Castells et al., 2005, p. 64).

Existe una diferencia estadística significativa entre los valores obtenidos obteniendo un valor de P menor a 0,05 e igual a 0,0028; por lo tanto, existe una

confianza estadística del 95 %, siendo la temperatura quien tiene un mayor efecto significativo sobre el contenido de cenizas en el biocarbón.

En la Figura 3.8 se presenta el comportamiento del contenido de cenizas conforme aumenta la temperatura de torrefacción a 30 min.

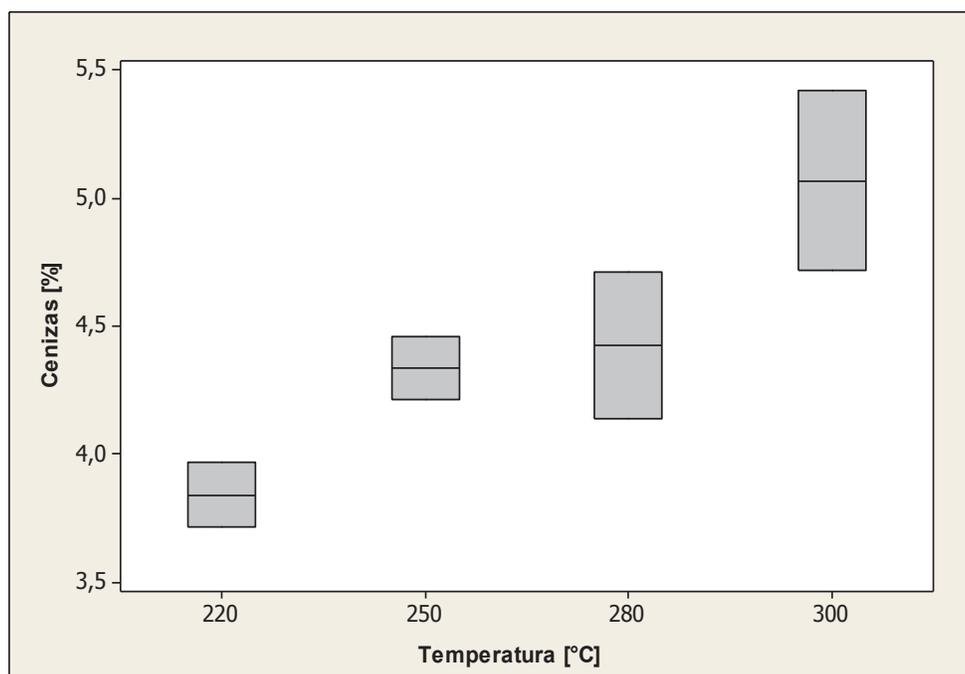


Figura 3.8. Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de cenizas con la temperatura a 30 min de tiempo de residencia

En la misma se puede observar que la diferencia entre el valor del contenido de cenizas entre 250 y 280 °C no es significativa, en cambio entre 220 y 250 °C, y de 280 a 300 °C, el aumento del contenido de cenizas es representativo, esto también se debe al tiempo de residencia, pues la materia prima fue sometida a las mismas temperaturas por un mayor tiempo, por lo que se obtuvo un mayor contenido de cenizas en cada una.

Como se puede observar en la Figura 3.8 el valor de cenizas obtenido varía de 3,97 a 5,42 % entre temperaturas de 220 - 300 °C, ya que al ser menor el tiempo de residencia. la liberación de minerales contenidos en el aserrín, también será menor. Existe una variación del 1,45 % entre el valor máximo y mínimo de cenizas, sin embargo, esta no es representativa ya que los valores obtenidos se

encuentran dentro del rango cenizas de varios combustibles de biomasa (0,3 - 6,2 %) (Francescato, et al., 2008, p. 20).

Al compararlo con otras biomasa torrefactadas como los residuos de pino (0,87-0,98 %) o la picea (0,12 – 0,14 %) este valor es mayor, por lo tanto, se podría decir que el aserrín de balsa contiene más material inorgánico (minerales, cationes) que los residuos de pino y la picea, pero contiene menos minerales que el tallo de algodón (12,69 – 14,74 %) y la paja de trigo (23,30 – 24,95 %) ya que el contenido de cenizas de estas biomasa es mayor. Esta gran diferencia se debe a que la balsa debido a sus características (bajo contenido de cenizas) se considera como una madera limpia en comparación con otras especies madereras como el tallo de algodón (Bustamante, Carrillo, Prieto, Corral y Hernández, 2016, p. 16).

En la Figura 3.9 se puede apreciar el comportamiento del contenido de cenizas, al interactuar el tiempo y la temperatura. Como se puede observar en la mencionada Figura, al comparar el comportamiento del contenido de cenizas entre 15 y 30 min se puede observar que el mayor contenido de cenizas se obtuvo a 30 min

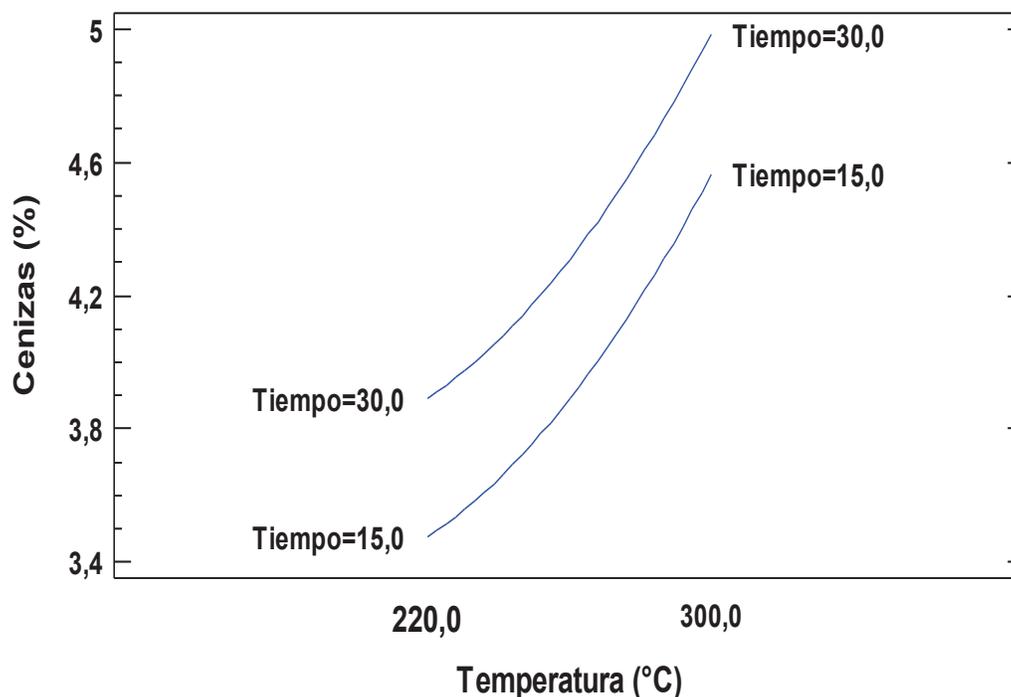


Figura 3.9. Interacción del tiempo y la temperatura en el contenido de cenizas

Los valores de cenizas obtenidos luego del proceso de torrefacción son mayores que la inicial (1,13 %), e incluso mayores que otras biomazas como el carbón bituminoso con la madera residual (2,9 %) (Atuesta y Sierra, 2015, p. 21), al compararlo con este último, el contenido de cenizas obtenido es mayor, ya que se trata de biocarbón obtenido tras un proceso y no de una mezcla de carbón con madera.

3.2.3 VOLÁTILES

En la Figura 3.10 se puede apreciar la variación del contenido de volátiles, con la temperatura a 15 min de tiempo de residencia.

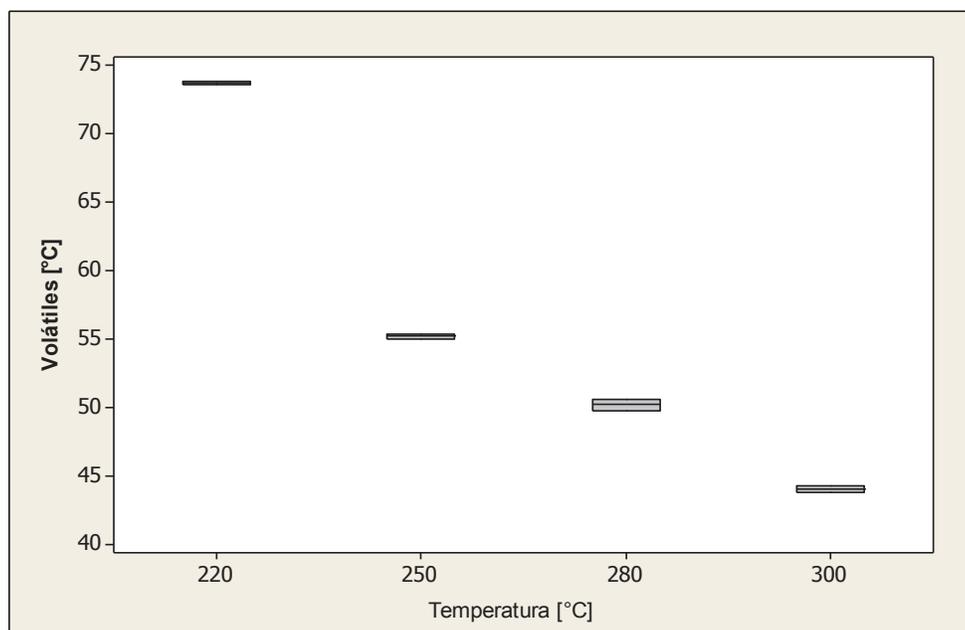


Figura 3.10. Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de volátiles con la temperatura a 15 min de tiempo de residencia

En la misma se observa la tendencia que dichos valores tienen y su comportamiento con respecto al aumento de la temperatura, ya que estos disminuyen debido a la degradación de sus componentes, pues a mayor temperatura, los enlaces que conforman la biomasa se rompen y liberan gases y otros compuestos, esto se produjo por las interacciones intramoleculares en los

enlaces de hidrógeno, C-C y C-O que se dieron durante el proceso (Uslu et al., 2008, p. 1 207).

En el caso de la variación del contenido de volátiles a 15 min, existe una diferencia estadística significativa entre los valores obtenidos ($P < 0,05$), siendo la temperatura y el tiempo los parámetros que tienen un efecto significativo sobre el contenido de volátiles del biocarbón a estas condiciones.

En la Figura 3.11 se puede apreciar la variación del contenido de volátiles con respecto a la temperatura a 30 min de tiempo de residencia.

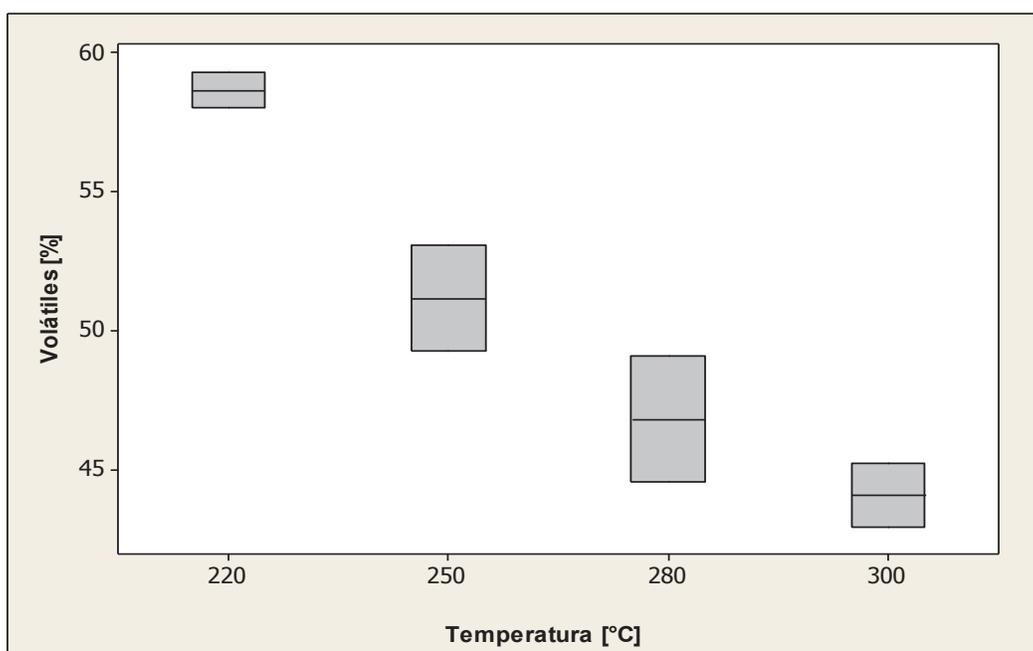


Figura 3.11. Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de volátiles con la temperatura a 30 min de tiempo de residencia

En la misma se observa que el valor del contenido de volátiles es menor a 30 min que a 15 min, por lo tanto, el tiempo de torrefacción si influyó en el contenido final del material volátil. Así mismo se puede apreciar que la variabilidad entre los valores de las pruebas realizadas durante el ensayo entre el máximo y mínimo valor es mayor que a los 15 min, pues está entre 1,27 y 4,50 %. Por lo tanto, no sólo la temperatura, sino el tiempo de torrefacción y la interacción de ambos inciden significativamente sobre el contenido de volátiles ($P < 0,05$).

En la Figura 3.12, se puede observar la comparación del comportamiento del contenido de volátiles con la temperatura tanto a los 15 como a los 30 min.

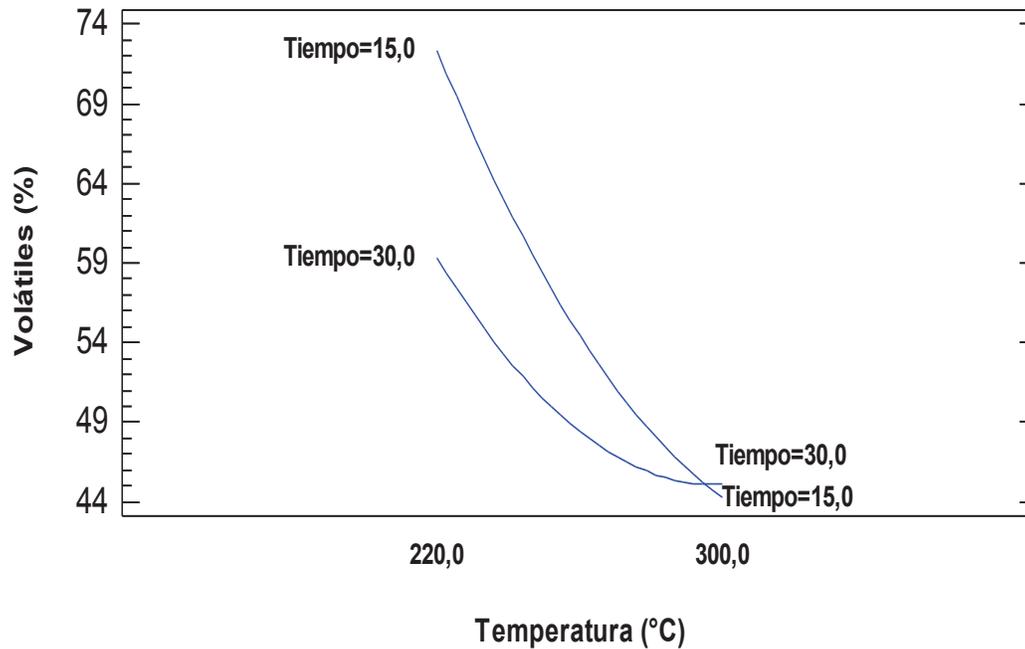


Figura 3.12. Interacción de la temperatura y el tiempo en el contenido de volátiles a 15 y 30 min

Como se puede apreciar en la Figura 3.12, se obtiene un menor contenido de volátiles a la temperatura de 300 °C, tanto para los 15 como para los 30 min de tiempo de residencia, según la curva presentada a los 30 min se llega a un equilibrio antes de llegar a la temperatura máxima (300 °C) y la disminución de volátiles no es relevante, sin embargo, a los 15 min la variación de éstos es representativa. Se puede apreciar también un punto de cruce entre las dos curvas a la misma temperatura (< 300 °C), por lo tanto, con el fin de no sólo obtener mejores resultados, sino también de ahorrar costos tanto en energía y tiempo, se puede decir, que para obtener un menor contenido de volátiles y un mayor aprovechamiento energético, las mejores condiciones de operación al tomar en cuenta el contenido de material volátil son a 300 °C y 15 min.

En la Figura 3.13 se presenta el diagrama de Pareto del efecto individual de la temperatura y el tiempo de residencia sobre el contenido de volátiles, y la interacción los mismos durante el proceso de torrefacción.

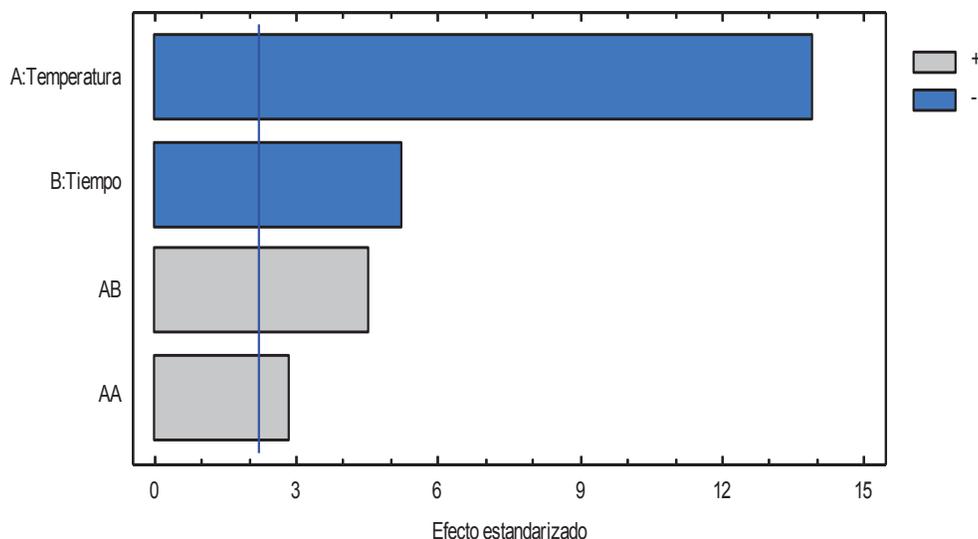


Figura 3.13. Diagrama de Pareto para evaluar el efecto de la temperatura y tiempo sobre el contenido de volátiles durante la torrefacción

En la Figura 3.13 las variables de entrada que tienen un efecto significativo en el contenido de volátiles fueron el efecto individual de temperatura, efecto individual del tiempo, la interacción temperatura - tiempo y el efecto cuadrático de la temperatura, pues superan la línea vertical. Con esto, se reiteró que la temperatura es la variable más influyente durante la torrefacción, seguida del tiempo de residencia sobre el contenido de volátiles, además, tiene una relación no directa.

Al comparar el contenido de volátiles del biocarbón con el de la materia prima que fue el aserrín de balsa (84,51 %) se puede apreciar que este valor disminuyó, ya que del material torrefactado a 15 min se obtuvo un biocarbón con una variación de 73,81 a 43,85 % de volátiles y a los 30 min de tiempo de residencia la variación fue de 59,28 a 45,24 % de 220 a 300 °C de temperatura.

Al comparar estos resultados con otras investigaciones se puede observar que es menor, ya que por ejemplo en la poda del árbol de olivo el contenido de volátiles luego de la torrefacción varían de 76,2 a 70 %, en cambio para el tallo de algodón ésta varía de 65,38 a 56,23 % (Lara, Ronda, Zamora y Calero, 2017, p. 11), por lo tanto el aserrín de balsa tiene menor contenido de material volátil que este tipo de

biomasas, sin embargo, posee más volátiles que el árbol de algodón ya que su valor está entre 31,16 - 36,13 % (Bustamante et al., 2016, p. 16).

3.2.4 CARBÓN

En la Figura 3.14 se presenta el diagrama de cajas y bigotes del comportamiento del contenido de carbón con respecto a la temperatura a 15 min de tiempo de residencia.

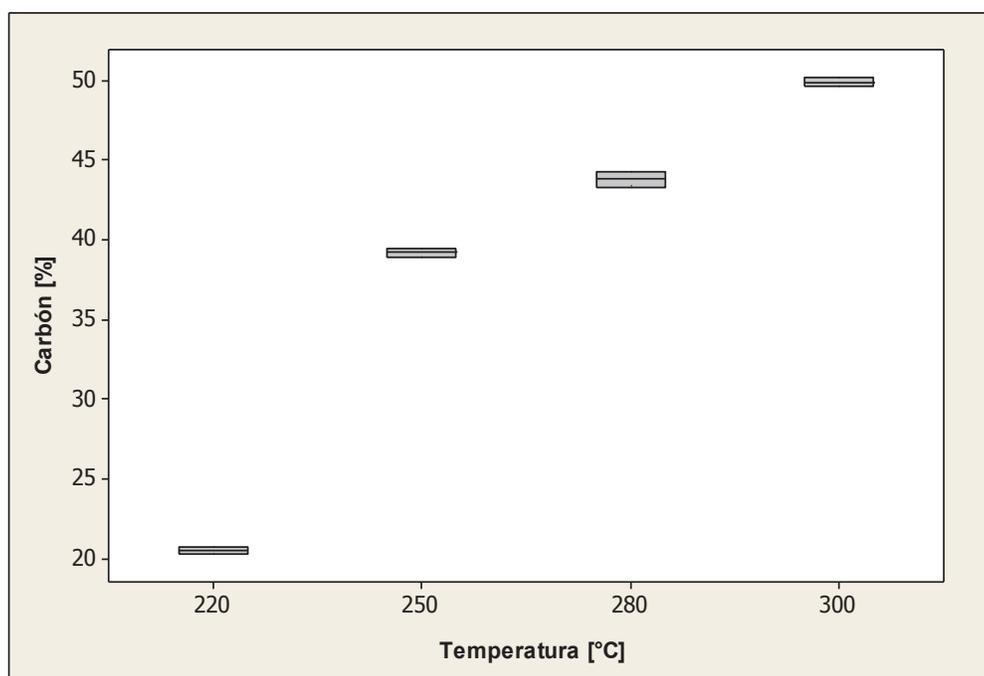


Figura 3.14. Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de carbón con la temperatura a 15 min de tiempo de residencia

Como se puede apreciar en la Figura 3.14 el contenido de carbón fue mayor, conforme aumentó la temperatura, esto se debe principalmente a que la temperatura de torrefacción influye directamente sobre el aumento o disminución de la composición de la biomasa, debido a que las pérdidas de hidrógeno y oxígeno se dan por la formación de agua, monóxido y dióxido de carbono durante la torrefacción, aumentando el contenido de carbono y disminuyendo el contenido de hidrógeno (H) y oxígeno (O) (Tito, et al., 2009, p.183), el material celulósico se

descompone en volátiles y la materia prima cambia a un color negro (Tumuluru, et al., 2011, p. 387).

En la Figura 3.15 se presenta el comportamiento del contenido de carbón fijo en el biocarbón a 30 min de tiempo de residencia.

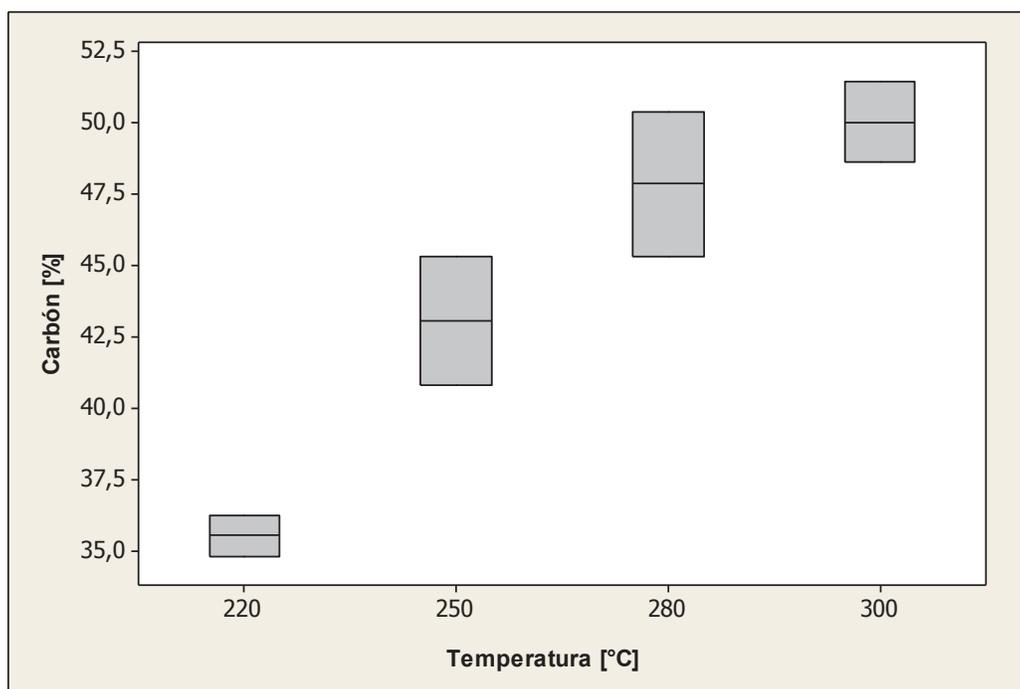


Figura 3.15. Diagrama de cajas y bigotes de la variación del contenido de carbón con la temperatura a 30 min de tiempo de residencia

De acuerdo a la Figura 3.15 el contenido de carbón aumenta ya que el tiempo de residencia en el equipo durante el proceso de torrefacción es mayor, al ser el doble de tiempo se da una mayor degradación y descomposición de los componentes de la materia prima, obteniendo así un mayor contenido de carbón a las mismas temperaturas que las realizadas en un menor tiempo (15 min).

Por lo tanto, la acción individual del tiempo y la temperatura junto con la interacción de los mismos tienen un efecto significativo sobre el contenido de volátiles del biocarbón ($P = 0,019$).

En la Figura 3.16 se puede observar la comparación del contenido de carbón al trabajar a diferentes tiempos 15 y 30 min, y a las mismas temperaturas.

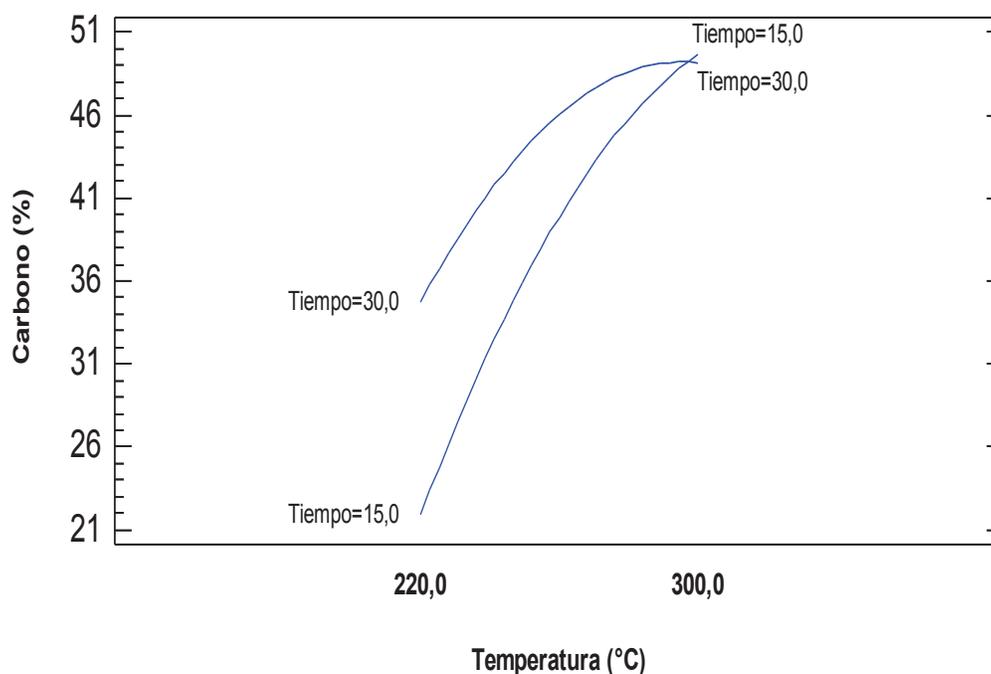


Figura 3.16. Comparación de la variación del contenido de carbón con la temperatura a los 15 y 30 min de tiempo de residencia.

Como se puede apreciar en la misma, el contenido de carbono del biocarbón obtenido a 15 y 30 min, aumenta conforme aumenta la temperatura, sin embargo, se puede observar que el mayor contenido de carbón se da a 300 °C en ambos tiempos de proceso, por lo cual tomando en cuenta la cantidad de carbón obtenida se puede decir, que no es necesario un mayor tiempo de torrefacción para obtener una cantidad representativa de carbón, ya que la variación del contenido de carbón entre 30 y 15 min es mínima, y menor tiempo implica menor consumo energético.

Lo mencionado anteriormente se comprueba en la Figura 3.17, en la cual se realizó un análisis de optimización entre el contenido de volátiles y de carbón, minimizando la cantidad de volátiles y maximizando la de carbón, que es el tema de interés, en este análisis se obtuvo que los mejores valores son 44,31 % de contenido de volátiles y 49,60 % de carbón, siendo las condiciones óptimas para lograrlo a 300 °C de temperatura y 15 min de tiempo de residencia, con una deseabilidad de 0,9402.

Al comparar el contenido de carbón óptimo obtenido en la investigación (49,60 %), con el valor obtenido en otros trabajos como el de Lara (2017) quién utilizó como materia prima la poda de árbol de olivo (20,9 a 27,6 %) (p. 111) o el de Bustamante (2016) quien utilizó trigo (43,66 %) y eucalipto (44,10 %) a 300 °C, se puede observar que es mayor, esto es debido a las características propias de la biomasa utilizada como materia prima, que en este caso fue el aserrín de balsa, ya que en otro tipo de biomasa como el trigo (55,43 %) el valor del contenido de carbón es menor (p. 16).

Los resultados de carbón fijo obtenidos a los 15 min de tiempo de torrefacción varían de 20,33 a 50,16 % en el rango de 200 a 300 °C, y se asemejan al valor del contenido de carbón de otras biomazas como el bambú cuyo contenido varía de 19 a 53 %, por lo tanto, se puede decir que, debido a la eliminación del material volátil y la humedad durante la torrefacción, estas dos materias primas tienen características similares en cuanto a su composición física (Bustamante et al., 2016, p. 16).

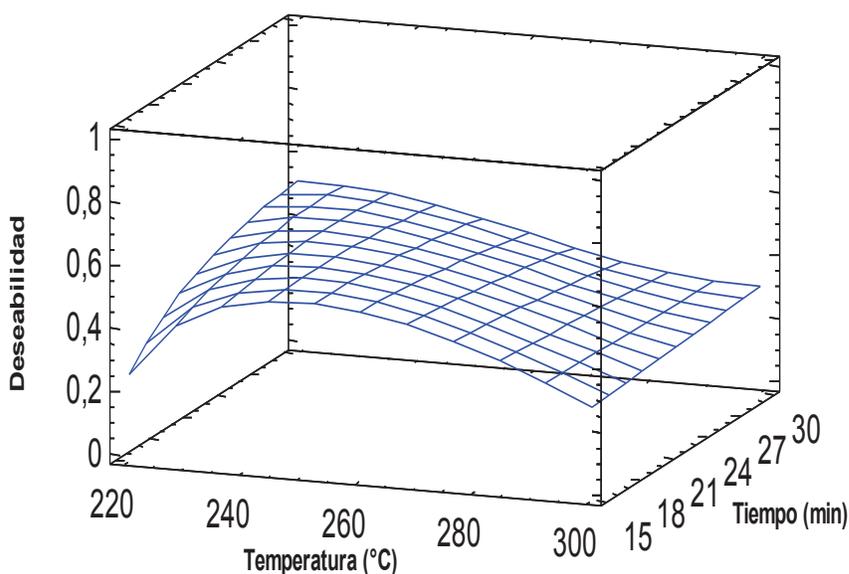


Figura 3.17. Superficie de respuesta para el contenido de volátiles y carbón con la temperatura a los 15 y 30 min de tiempo de residencia

El contenido de carbón se determinó por diferencia entre 100 y el contenido de humedad, volátiles y cenizas, es por ello que dependió fundamentalmente de la cantidad de cada uno de sus componentes.

3.3 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO DE RESIDENCIA EN EL PROCESO DE TORREFACCIÓN

3.3.1 RENDIMIENTO MÁSIKO

La temperatura del proceso de torrefacción es de gran importancia, ya que a medida que transcurre el proceso, la biomasa cambia su color y sus características, semejándose a las del carbón, el consumo de calor y la pérdida de masa se dan conforme aumenta la temperatura, los procesos más intensos ocurren en las primeras etapas del proceso, es decir, al calentarse la biomasa desde temperatura ambiente hasta aproximadamente 100 °C, pierde humedad y se encoge, pero la mayoría de constituyentes químicos permanecen intactos, luego a una temperatura mayor a 100 °C, se pierde completamente la humedad, y la lignina que es uno de los componentes químicos pierde sus propiedades estructurales, ya que debido al aumento de la temperatura se rompen sus enlaces (Arteaga, et al., 2016, p. 61).

Aproximadamente a 200 °C se rompen los enlaces de hidrógeno y carbono dando como resultado la emisión de extractos lipofílicos, y se da la deformidad, por lo tanto, la biomasa no puede recuperar su estructura original, al pasar los 280 °C se degradan completamente los componentes lignocelulósicos y se forman extractos hidrófilos, éteres y gases como el CO, CO₂ (Uslu et al., 2008, p. 1207). A 300 °C, se da la desvolatilización y carbonización de los polímeros, y cambia totalmente el color de la biomasa inicial (aserrín de balsa) (Tumuluru et al., 2011, p. 387).

En la Figura 3.18 se presenta el comportamiento del rendimiento másico con respecto al tiempo y a la temperatura, donde se puede observar de mejor manera lo descrito anteriormente.

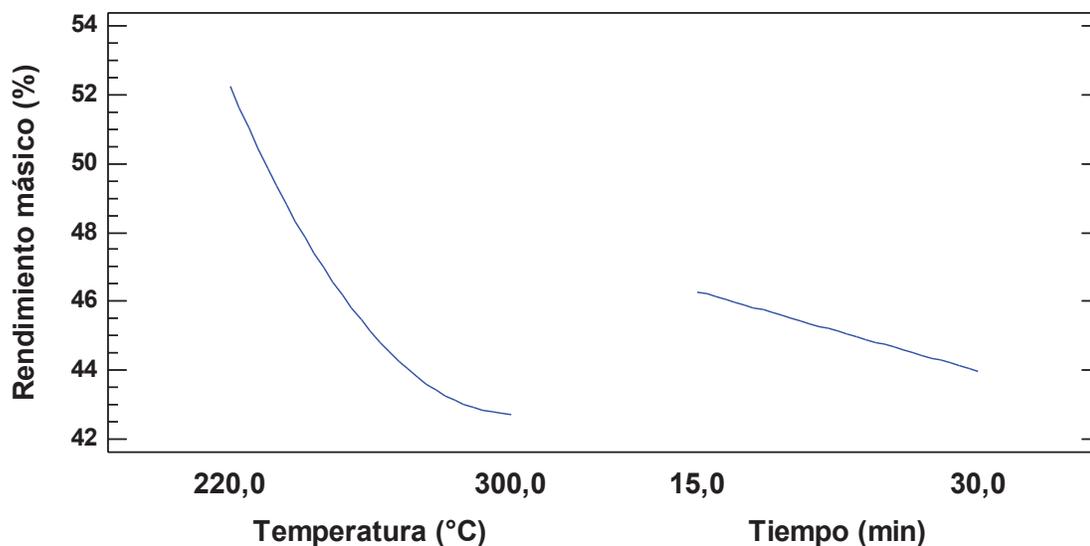


Figura 3.18. Variación del rendimiento másico con la temperatura y el tiempo durante el proceso de torrefacción

El tiempo de residencia, aunque en menor medida, también afecta a la descomposición térmica de la biomasa, como se puede observar en la Figura 3.18 a mayor tiempo de torrefacción, menor es el rendimiento másico, debido a la pérdida de la mayoría de los componentes de los residuos de balsa.

En la Figura 3.19, se puede apreciar la comparación de la variación del rendimiento másico durante el proceso de torrefacción a 15 y 30 min.

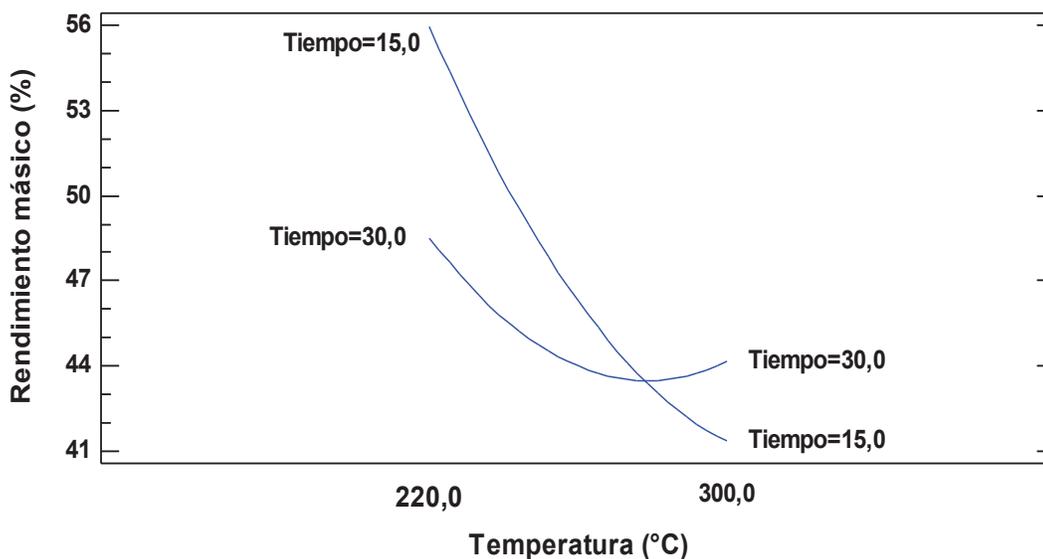


Figura 3.19. Interacción del tiempo y la temperatura sobre el rendimiento másico del aserrín de balsa, durante el proceso de torrefacción

Si se compara la variación del rendimiento másico, con respecto a la temperatura tanto a 15 como a 30 min en la Figura 3.19, se puede apreciar que el mayor rendimiento es a 15 min ya que el tiempo es menor y en éste no se degradan completamente los componentes de la biomasa, a diferencia de los 30 min en los cuales el rendimiento es menor pues a mayor tiempo, y aún, estando a la misma temperatura los procesos de deshidratación, despolimerización, y carbonización se dan en mayor medida. La degradación comienza por la hemicelulosa a bajas temperaturas, luego la celulosa a temperaturas altas, y finalmente la lignina, por lo cual, se reduce el contenido en fibra (Chew y Doshi, 2011, p. 3), cabe resaltar que no siempre el aumentar el tiempo de operación aporta beneficios considerables sobre las propiedades del sólido producido (Arteaga, et al., 2015, p. 10).

En la Figura 3.20 se puede observar mediante el diagrama de Pareto la influencia del tiempo y la temperatura durante el proceso de torrefacción.

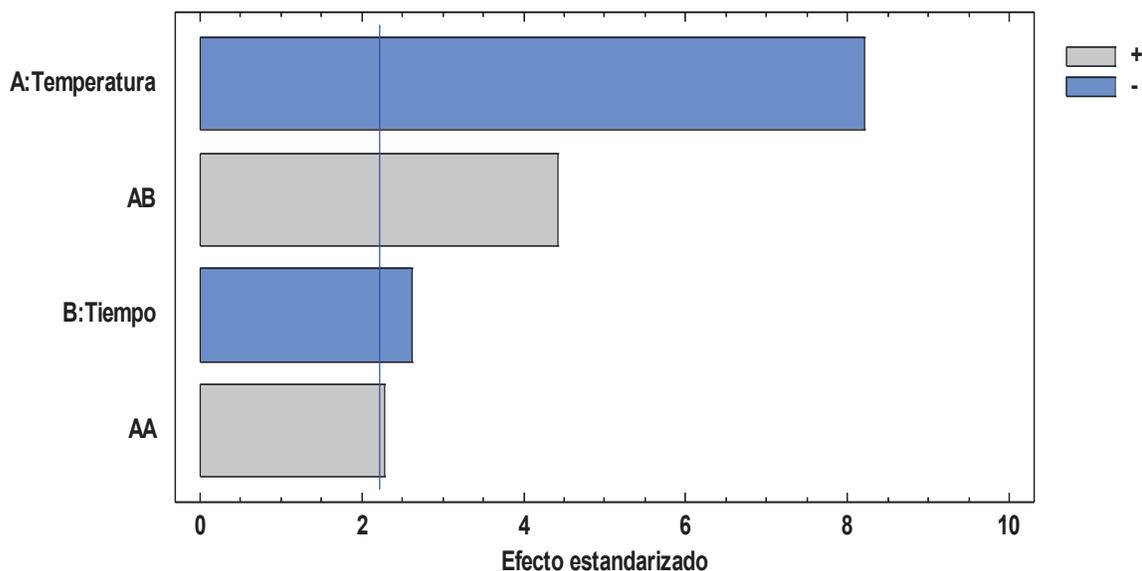


Figura 3.20. Diagrama de Pareto para evaluar el efecto de la temperatura y tiempo sobre el rendimiento másico durante la torrefacción.

En la Figura 3.20 se puede observar el efecto individual de la temperatura, la interacción entre el tiempo y la temperatura, y el efecto individual del tiempo sobre el rendimiento másico. La línea vertical que cruza por cada bloque de las variables mencionadas anteriormente en la gráfica, indica que éstas tienen un efecto significativo sobre el rendimiento másico, ya que si la línea vertical no

cruzara por cualquier bloque como es el caso del bloque AA que es el efecto cuadrático de la temperatura, significa que este no influye sobre el valor del rendimiento másico. De acuerdo con las longitudes de las barras, la temperatura es la que mayor efecto tiene sobre el rendimiento másico, aunque no tiene una relación directa. La interacción de la temperatura y el tiempo tienen un efecto significativo sobre el rendimiento másico, y al observar su comportamiento se puede observar en la Figura 3.18 una curva cuya pendiente es negativa tanto a los 15 como a los 30 min.

Luego del proceso de torrefacción, a 15 min de tiempo de residencia se obtuvo un rendimiento másico que cuyo valor está entre 56,47 y 39,25 %, y a 30 min el rendimiento varía entre 47,12 a 40,73 %, de 220 a 300 °C de temperatura, sin embargo, según Bergman y Kiel (2005), el rendimiento másico para sólidos luego del proceso de torrefacción es de 87,5 %; por lo tanto, al comparar los resultados obtenidos con los de los autores mencionados se puede apreciar que el valor es bajo, esto se debe a que depende de la composición física y química del aserrín de balsa, en este caso se obtuvo una mayor cantidad de material volátil por lo cual, al aumentar la temperatura se eliminó gran cantidad de estos componentes lo que disminuyó a la vez su masa por lo tanto su rendimiento (p.4).

En cambio, al compararlo con el trigo cuyo rendimiento másico varía de 47,56 a 31,61 % a las mismas condiciones de temperatura (200 a 300 °C) luego de la torrefacción, se puede apreciar que el rendimiento es mayor, lo que significa que en la balsa existe menos material volátil que en el trigo (Bustamante et al., 2016, p.11).

3.3.2 PODER CALÓRICO DEL BIOCARBÓN OBTENIDO

En la Figura 3.21 se presenta el diagrama de barras de la variación del poder calórico obtenido con respecto al tiempo y la temperatura de torrefacción ensayadas.

Como se puede apreciar en el diagrama de barras, el poder calórico a 15 min de tiempo de residencia y 220 °C de temperatura fue de 27,09 (MJ/kg), al aumentar la temperatura a 250 °C se obtuvo un poder calórico de 31,46 (MJ/kg), a partir de los 280 °C se puede observar que la variación del poder calórico es mínima (0,09 MJ/kg) ya que el poder calórico fue 31,20 (MJ/kg) y a 300 °C fue 31,29 (MJ/kg), por lo tanto, el aumento de la temperatura no representó cambio significativo en el valor del poder calórico.

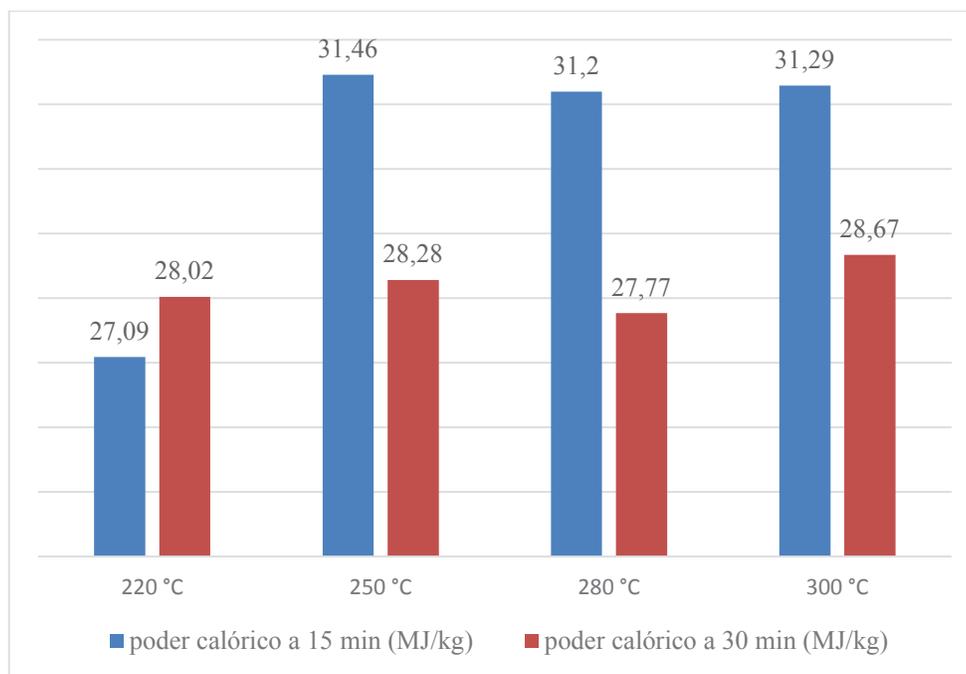


Figura 3.21. Diagrama de barras del poder calórico obtenido a 15 y 30 min de tiempo de residencia

En cambio, a los 30 min y 220 °C se puede apreciar que el poder calórico es 28,02 (MJ/kg) y conforme aumentó la temperatura el cambio no es representativo, ya que la variación del poder calórico entre el valor máximo y mínimo a los 30 min entre 220 y 300 °C fue de 0,9 (MJ/kg), ya que el poder calórico obtenido fue 27,77 MJ/kg y 28,67 MJ/kg respectivamente.

Con esto se puede apreciar que el aumento de la temperatura no incide en gran medida sobre el valor del poder calórico, y que a pesar de que a partir de 250 °C el valor del poder calórico disminuye y luego aumenta tanto para 15 como para 30 min, esta variación en su valor no es representativa.

En la Figura 3.22 se presenta la interacción del tiempo y la temperatura sobre el poder calórico.

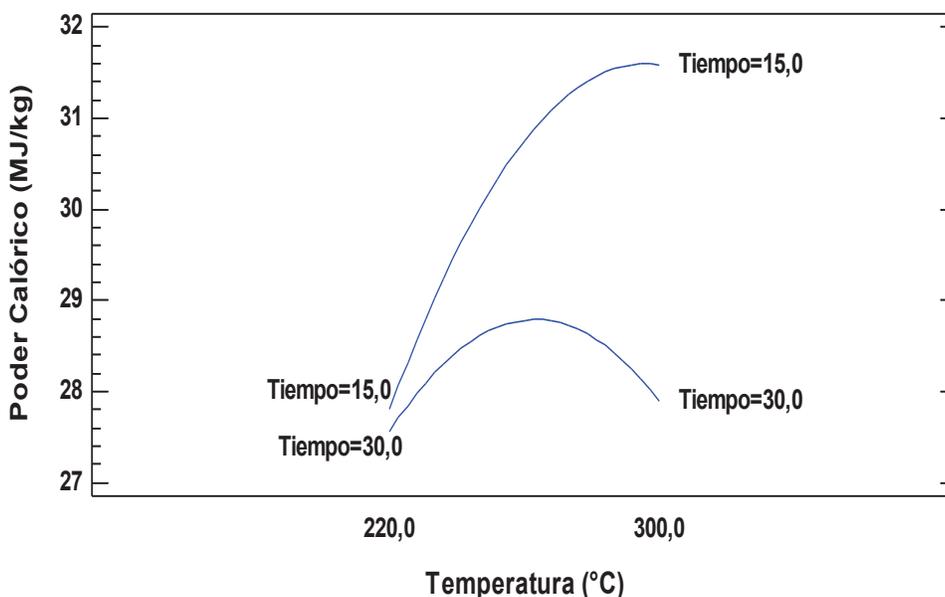


Figura 3.22. Diagrama de interacción de la temperatura y el tiempo sobre el poder calórico

Las curvas representadas en la Figura 3.22, confirman lo señalado anteriormente, pues a 220 °C la variación del poder calórico obtenido a 15 y 30 min no es significativa en comparación de la variación que existe a 300 °C temperatura a la cual la diferencia del poder calórico entre los dos tiempos de residencia es de 2,62 (MJ/kg). Al no influir en gran medida el aumento de temperatura sobre el valor del poder calórico obtenido, es el tiempo de torrefacción quien tiene mayor influencia sobre el poder calórico del biocarbón obtenido a partir del aserrín de balsa, esto se justifica debido a que al ser la lignina el componente lignocelulósico que tiene incidencia sobre el contenido final de energía, a mayor tiempo de residencia de la materia prima en el reactor, mayor será su degradación, pues durante el proceso de torrefacción se eliminó la humedad y los volátiles, por lo tanto a 15 min de tiempo de reacción se liberaron los volátiles más livianos.

En cambio, a 30 min se liberó un mayor contenido de volátiles con valor energético y se degradó en mayor medida la lignina por lo tanto menor será su valor energético (Lara et al., 2017, p.111; Urien, 2013, p.16),

Como se mencionó en la Sección 3.2.4, a menor contenido de volátiles, mayor contenido de carbón se obtendrá, consecuentemente la mezcla del carbón fijo obtenido con los volátiles de la muestra luego del proceso, es quien permitirá aumentar la temperatura de ignición y como consecuencia el poder calórico (Bustamante et al., 2016, p. 17).

En la Figura 3.23 se presenta el contorno de superficie de respuesta estimada obtenido mediante el programa estadístico STATGRAPHICS.

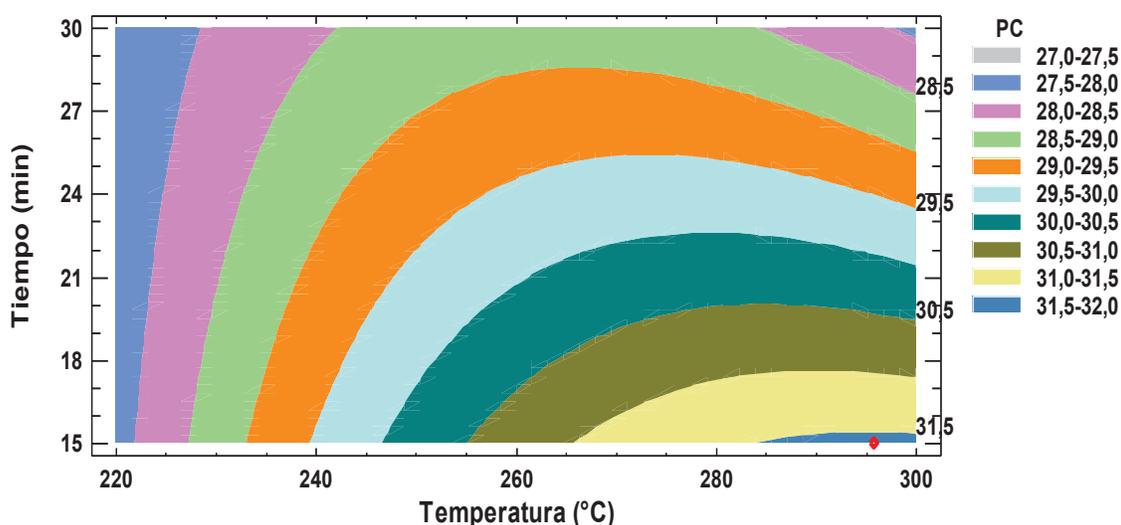


Figura 3.23. Diagrama de contorno de superficie de respuesta estimada del poder calórico

Como se observa en la Figura 3.23, el punto rojo que se encuentra en el área celeste ubicada en la esquina inferior derecha de la gráfica, indica el valor óptimo de poder calórico para el aserrín, este valor es de 31,59 (MJ/kg), y según el análisis estadístico se obtiene a 296 °C de temperatura y 15 min de tiempo de retención.

El mejor poder calórico se obtuvo a la temperatura de 250 °C y 15 min de tiempo de residencia, con un valor de 31,46 (MJ/kg), este valor es mayor al obtenido a partir de otras biomásas torrefactadas como son los chips de madera 20,4 (MJ/kg), madera de lauan 26,92 (MJ/kg), bambú 26,46 (MJ/kg), banyan 28,52 (MJ/kg) y willow 24,33 (MJ/kg) (Chen, et al., 2011, p. 3639), por lo tanto para la obtención de un mayor poder calórico el proceso utilizado (torrefacción) para el

aserrín de balsa es apropiado, ya que se obtuvo un poder calórico mayor que el obtenido con otras biomásas torrefactadas a condiciones de temperatura similares, debido a las características propias de la materia prima utilizada (aserrín de balsa).

Según Bergman y Kiel (2005) la biomasa puede incrementar su poder calórico en un 21 % (p.4), y al comparar estos valores con el poder calórico inicial obtenido del aserrín de balsa (17,58 MJ/kg), se puede apreciar que el incremento a 250 °C y 15 min de tiempo de reacción (31,46 MJ/kg) fue de 78,95 % y a 300 °C y 30 min (28,67 MJ/kg) fue 63,08 %, lo que significa que superó el incremento mencionado por el autor, esto se debe principalmente al tipo de materia de prima utilizada en la investigación, a sus características físicas, químicas y térmicas, y a los procesos de deshidratación, desvolatilización y depolimerización que se realizaron durante la torrefacción, ya que estos procesos favorecieron a la biomasa al disminuir su masa inicial y aumentar a su vez la energía contenida en el aserrín de balsa (Vinces y Poggi, 2014, p. 98).

3.3.3 EFICIENCIA ENERGÉTICA

3.3.3.1 Efecto del proceso de torrefacción sobre el poder calórico y la eficiencia energética

En la Tabla 3.3 se presenta el valor del rendimiento másico, poder calórico final y la eficiencia energética obtenida tras el proceso de torrefacción.

En la Tabla 3.3 se puede apreciar la disminución del rendimiento másico conforme aumenta la temperatura, en cada tiempo ensayado (15 y 30 min), de igual manera se puede observar la eficiencia energética obtenida en función del rendimiento másico, y el poder calórico final e inicial (17,58 MJ/kg). Como se puede observar el mayor rendimiento energético se obtuvo a 220 °C y 15 min de tiempo de reacción y el menor a 280 °C y 30 min ya que su poder calórico fue menor.

Tabla 3.3. Rendimiento másico, poder calórico final y eficiencia energética del proceso de torrefacción

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Rendimiento másico (%)	Poder calórico final (MJ/kg)	Eficiencia energética (%)
220	15	56,58	27,09	87,18
250	15	47,49	31,46	84,98
280	15	45,54	31,20	80,82
300	15	42,06	31,29	74,86
220	30	47,89	28,02	76,33
250	30	45,46	28,28	73,13
280	30	44,05	27,77	69,58
300	30	43,41	28,67	70,79

En la Figura 3.24 se presenta el efecto de la temperatura y el tiempo sobre la eficiencia energética.

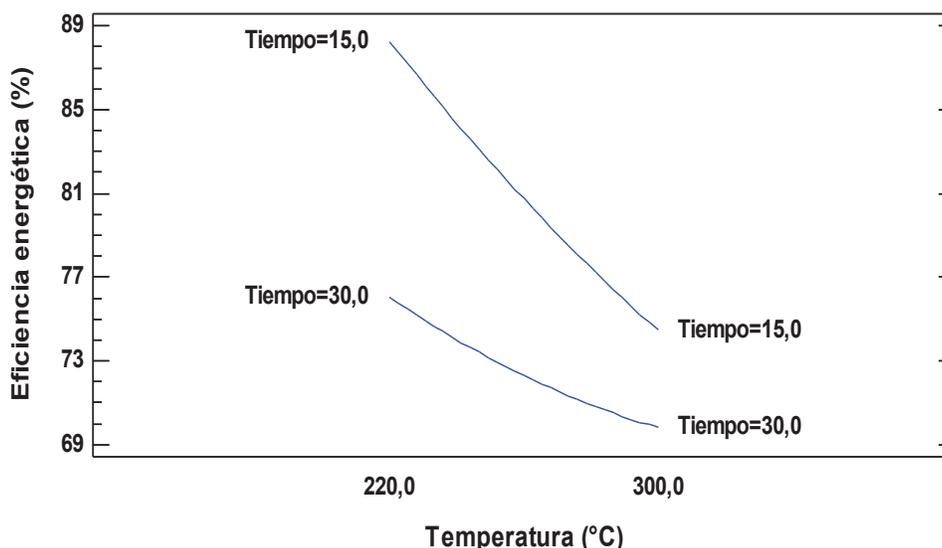


Figura 3.24. Efecto de la temperatura y el tiempo sobre la eficiencia energética

En la misma Figura se indica que la mayor eficiencia energética fue a 220 °C de temperatura y 15 min de tiempo de residencia, esto se debe a que la eficiencia energética está en función del rendimiento másico y del poder calórico inicial y final. También se puede observar que existe una mayor variación en el valor del rendimiento másico a 15 y 30 min a 220 °C que, a 300 °C esto se debe a que a mayor tiempo se da una mayor degradación de la biomasa.

En la Figura 3.25 se presenta el diagrama de Pareto en el cual se puede apreciar el efecto estandarizado de la temperatura y el tiempo sobre la eficiencia energética luego de la torrefacción.

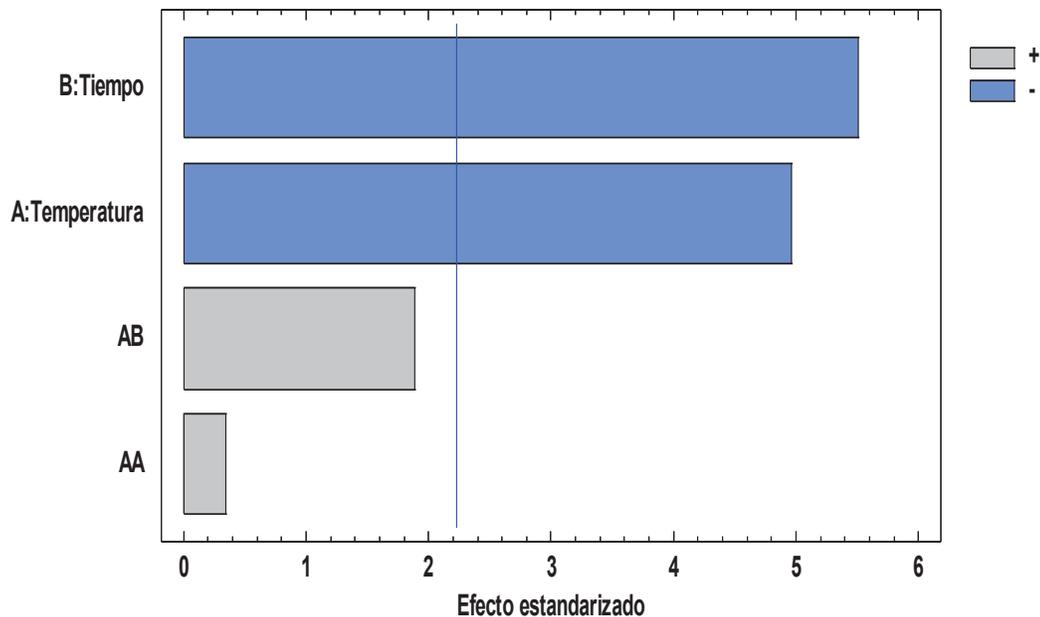


Figura 3.25. Diagrama de Pareto evaluar el efecto de la temperatura y tiempo sobre el rendimiento másico durante la torrefacción

Como se puede apreciar en la Figura 3.25 al tener una relación directamente proporcional con el rendimiento másico, éste tiene mayor influencia en su valor, y como se puede apreciar en la Sección 3.3.1, el mayor rendimiento se obtuvo a 220 °C de temperatura debido a que a estas condiciones la degradación física y química del aserrín de balsa durante la torrefacción fue menor, por lo tanto, la eficiencia energética será mayor que a otras temperaturas y tiempos ensayados.

La eficiencia energética de 220 a 300 °C a 15 min tuvo una variación entre 87,18 y 74,86 %, y a 30 min de 76,33 a 70,79 %. La mejor eficiencia energética fue de 87,18 % a 15 min, y la menor fue de 69,58 % a 30 min, ya que, a mayor tiempo de torrefacción, mayor fue la descomposición de la materia, al comparar este valor con otras biomásas torrefactadas como el sauce (94,90 %) o el huaje (94,10 %), la eficiencia energética es menor, esto se debe a que, no sólo el rendimiento másico sino también el poder calórico de estas especies es mayor que el aserrín de balsa, pero con respecto a las astillas de pino (71,00 %) o la

leucena (76,20 %), es mayor, por lo tanto su valor depende tanto de las características físicas como químicas y térmicas de cada tipo de biomasa (Bustamante, et al., 2016, p.15).

El rendimiento energético refleja la magnitud de la conversión de energía de la biomasa durante el proceso de torrefacción (Lara, et al., 2017, p.112) y con los valores obtenidos se puede apreciar que la conversión obtenida fue favorable.

En la Figura 3.26 se presenta el diagrama de contorno de superficie de respuesta de la eficiencia energética.

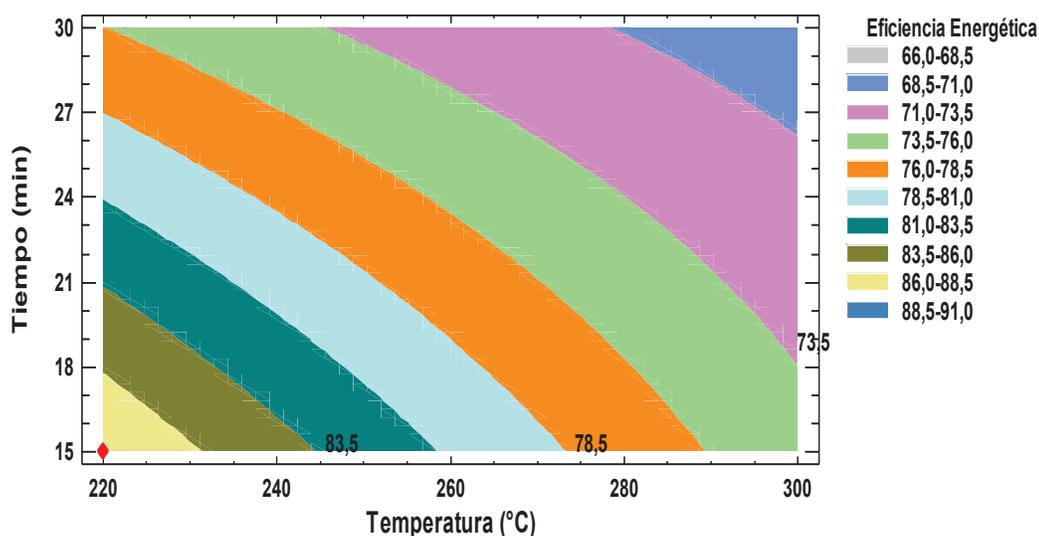


Figura 3.26. Diagrama de superficie de contorno de la eficiencia energética

Como se puede apreciar en la Figura 3.26, el punto rojo en la esquina inferior izquierda indica el valor óptimo de la eficiencia energética y las condiciones de presión y temperatura para obtenerlo.

Las condiciones óptimas para obtener el máximo valor de eficiencia energética son a 220 °C y 15 min de tiempo de reacción, con una eficiencia energética de 88,27 %.

Según Bergman y Kiel (2005) la eficiencia energética de los sólidos a 280 °C es 94,9 % (p. 4), valor mayor al obtenido en esta investigación (80,82 %), sin

embargo, esto es relativo ya que depende de la naturaleza de la biomasa torrefactada, y de la pérdida de carbono, hidrógeno y oxígeno que se dio en el proceso, ya que, al ser la eficiencia energética una relación entre el contenido de energía en biomasa bruta y la biomasa torrefactada, depende fundamentalmente del rendimiento másico (Chen, Chen, Lin, Chang, y Ong, 2017, pp. 110-111).

Al comparar el valor obtenido con la eficiencia energética de otras investigaciones como la leucaena (76,20 %), las astillas de pino (71,00 %), se puede observar que es mayor, por lo tanto, la pérdida de los elementos mencionados del aserrín de balsa fue menor que de estas biomásas (Bustamante, et al., 2016, p.15).

3.4 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LOS PELLETS DE BIOCARBÓN

Los resultados de la caracterización mecánica de los pellets realizados con el biocarbón obtenido luego del proceso de torrefacción son los presentados en esta Sección.

3.4.1 DUREZA

En la Tabla 3.4, se puede observar los valores de dureza de los pellets de biocarbón.

Tabla 3.4. Valor de dureza Shore A de los pellets a diferente temperatura y presión

Presión [kgf/cm ²]	Temperatura (°C)		
	160	80	17
640	76	64	30
150	53	53	23
50	35	28	8

Como se puede observar en la Tabla 3.4, la mayor dureza se obtuvo a las condiciones extremas de presión y temperatura, que fueron 640 kgf/cm² y 160 °C respectivamente.

La variación entre los valores de dureza obtenidos a las diferentes condiciones es representativa, por lo tanto, a mayor presión y temperatura de peletización la dureza obtenida fue mayor, por lo tanto, ambas variables influyen en el proceso. Según el análisis estadístico se obtuvo que tanto la acción de la presión como de la temperatura tienen efecto significativo sobre el valor de la dureza ($P < 0,05$); lo que indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los datos obtenidos con un nivel de confianza del 95,0 %.

En la Figura 3.27 se puede observar el comportamiento de la dureza del pellet con respecto a la presión y temperatura aplicada.

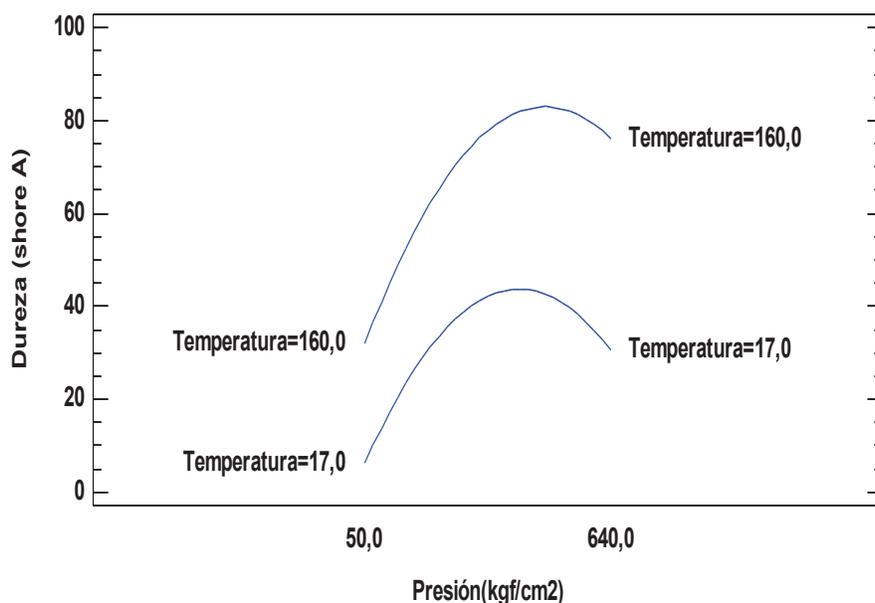


Figura 3.27. Diagrama de interacción de la temperatura y la presión para dureza

Como se puede observar en la Figura 3.27 el valor de la dureza del pellet aumenta conforme aumenta la presión y la temperatura aplicada al pellet. Al aplicar una mayor presión sobre el biocarbón obtenido existirá una mayor compactación entre las partículas. Las curvas tanto de la presión como de la temperatura indican que las mismas tienen un efecto significativo sobre el valor de

la dureza, como se puede observar al aplicar una menor o mayor temperatura a una determinada presión, el valor de la dureza no cambia significativamente, en cambio, si se aumenta la temperatura y la presión, el cambio en su valor es significativo ya que la distancia entre las dos curvas es mayor, por lo tanto la interacción de ambas variables influye en los resultados de la dureza.

Se puede apreciar también que para obtener un mayor valor de dureza en el pellet no es necesario llegar a las condiciones extremas propuestas de presión y temperatura que fueron 640 kgf/cm^2 y $160 \text{ }^\circ\text{C}$, ya que el punto más alto de la curva se encuentra a una menor presión y menor temperatura, por lo tanto, no es necesario aplicar una mayor presión y temperatura para obtener un alto valor de dureza, pues, para que sea reproducible la peletización se puede trabajar a valores menores a las condiciones extremas antes señaladas y disminuir así el costo en su producción ya que al aplicar una menor temperatura se requiere menor energía.

En la Figura 3.28 se presenta el diagrama de superficie de respuesta estimada del valor de la dureza con la presión y la temperatura. En la misma se observan los valores de dureza con su respectivo indicador de color, y se puede apreciar que el mayor valor de dureza está en el rango de 75 a 85 (Shore A).

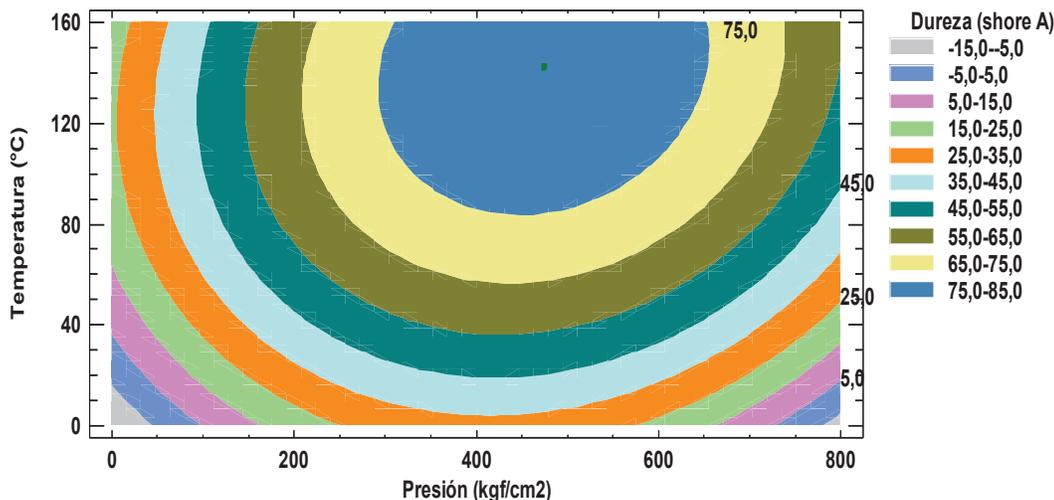


Figura 3.28. Diagrama superficie de respuesta estimada de la dureza a diferente presión y temperatura

Este rango se encuentra en la franja azul, ubicada cerca de la parte superior central de la Figura 3.28, en la misma se puede observar que el rango de presión y temperatura óptimo para obtener el mayor valor de dureza, se encuentra entre 400 y 600 kgf/cm² de presión y entre 90 - 150 °C de temperatura.

El punto óptimo para lograr una mayor dureza se encuentra en el centro de la franja azul, y según el análisis de optimización de respuesta del programa STATGRAPHICS, para maximizar la dureza con un valor igual a 83,86 (Shore A) el valor óptimo de presión y temperatura son 474,56 kgf/cm² y 142 °C respectivamente.

En la Figura 3.29 se presentan los pellets obtenidos a 160 (°C) y diferente presión

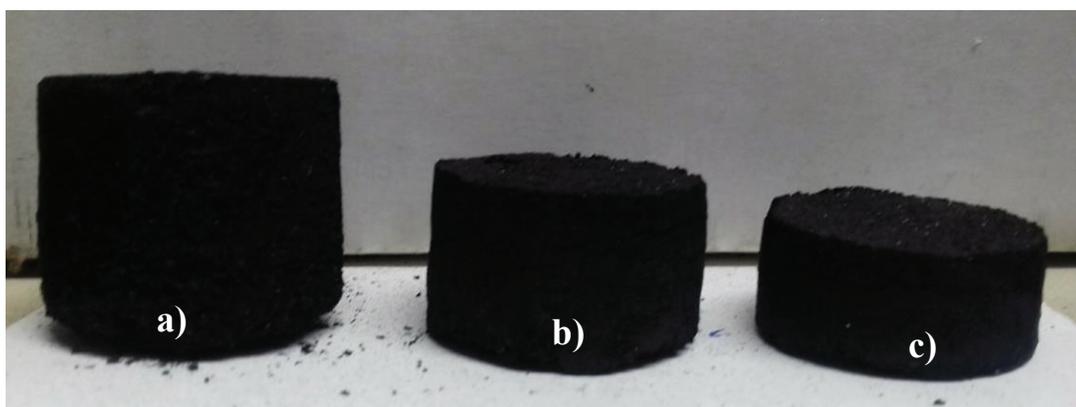


Figura 3.29. Pellets obtenidos a presiones de a) 50, b) 150 y c) 640 kgf/cm²

Como se puede observar en la Figura 3.29 los pellets obtenidos difieren en su tamaño, ya que, a mayor presión aplicada, la longitud del pellet fue menor disminuyendo de 21 mm a 17 mm a la presión de 50 y 150 kgf/cm² respectivamente, para finalmente llegar a 11 mm a la presión máxima aplicada que fue 640 kgf/cm², esto se debe a que las partículas del biocarbón con la ayuda del aglutinante colocado (que en este caso fue el almidón de trigo), formó una masa debido a la humedad residual que posee, esto ayudó a que las partículas del material se adhieran entre sí al comprimirlos, y mejore su compactación durante el prensado y disminuyendo a su vez la altura del pellet comprimido (Flores, 2010, p. 2). El almidón al mezclarse con el agua, el cual actúa como ligante, cambia su estructura al aplicar calor pues la energía térmica permite que

pase algo de agua a través de su red molecular y rompa los enlaces de hidrógeno, lo que provoca su hinchamiento y a la vez que aumenta su viscosidad, por ello, debido a la temperatura y presión aplicada al momento de densificar se formaron nuevos enlaces entre ellos logrando así una mejor compactación entre las partículas y mejorando su dureza (Flores, 2010, pp. 2-17).

Su color característico fue el del carbón (negro) y su poder calórico a las condiciones de 160 °C y 640 kgf/cm² fue 24,83 MJ/kg, es decir, disminuyó su valor con respecto al poder calórico de la materia prima (27,09 MJ/kg), esto pudo darse debido al aglutinante colocado, ya que al añadirlo a la mezcla aumenta el contenido de humedad en la misma, y disminuye su poder calórico a pesar de que se dé una compactación. Por lo tanto, el aglutinante colocado ayudó al proceso de densificación del biocarbón torrefactado pero disminuyó el valor en su poder calórico. Sin embargo, a pesar del poder calórico obtenido se puede apreciar que la disminución entre ambos valores no fue significativa (2,26 MJ/kg) ya que el poder calórico obtenido es mayor que el de los pellets de madera (15 – 17 MJ/kg), de los pellets de madera torrefactada (17 – 24 MJ/kg) y está en el rango del carbón (23 – 28 MJ/kg) (Thrän, et al., 2016, p.194).

3.4.2 DURABILIDAD MECÁNICA

Las características mecánicas como la durabilidad, resistencia al impacto y propiedades del pellet como la densidad se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Características mecánicas de los pellets

Parámetro	Valor
Durabilidad [%]	76,25
Densidad [kg/m ³]	574,69
Resistencia al impacto [%]	100,00

La durabilidad se define como la capacidad de los pellets para soportar las fuerzas destructivas y la presión durante el transporte. Según Tenorio, Moya,

Tomazello y Valaert (2015) este parámetro se considera aceptable cuando su valor es mayor al 80 %, un valor promedio cuando está entre 70 y 80 %, y se considera bajo cuando es menor al 70 % (p. 72).

Como se puede observar en la Tabla 3.5 el valor de la durabilidad obtenida fue 76,25 %, por lo tanto, se considera una durabilidad promedio, adicional a esto al tener una mayor durabilidad existe una disminución de los riesgos asociados a las explosiones de fuego durante el transporte o almacenamiento de pellets, así como con las emisiones de polvo.

Si el valor de durabilidad obtenido en este trabajo (76,25 %), es comparado con lo establecido por la norma UNE-EN ISO 17831-1:2016, que dice que este parámetro debe estar entre 97,5 y 98,0 %, y se tiene que para alcanzar el mínimo requerido por la norma el valor obtenido debe aumentar en un 21,25 %.

Este comportamiento puede deberse a factores como la descomposición de lignina y hemicelulosa durante la torrefacción principalmente por el tiempo de exposición del material durante el proceso (Tenorio et al., 2015, p. 62), o por la disminución de la humedad, la cual tiene un papel importante para la atracción y cohesión de las partículas adyacentes (Arteaga, et al., 2017, p. 19).

El tamaño de partícula del material torrefactado también es importante ya que es propenso a la granulación, así como el uso de aglutinantes que ayudan a optimizar la durabilidad, ya que la concentración del aglutinante utilizado en esta investigación también puede influir en su durabilidad, por lo tanto, se tiene que determinar las condiciones de dosificación óptimas del aglutinante para la producción de pellets de alta calidad (p. 22).

En la Figura 3.30 se presenta el pellet antes del ensayo y luego del ensayo de durabilidad.

En la Figura 3.30 se puede observar que hubo pérdida del biocarbón del pellet por el ensayo realizado, sin embargo, esta fue mínima por lo que se puede decir que

la compactación del biocarbón a las condiciones de presión, temperatura y concentración del aglutinante utilizados fueron favorables.

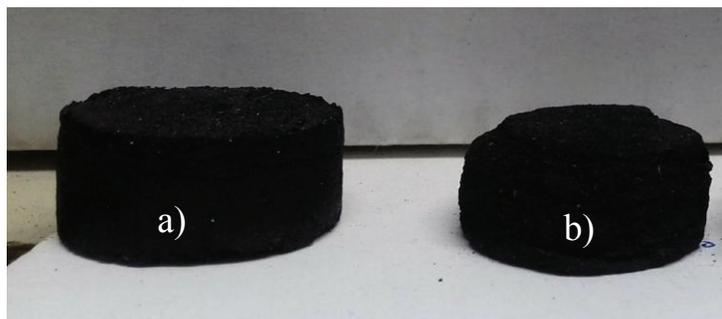


Figura 3.30. Fotografía del pellet obtenido antes (a) y después (b) del ensayo de durabilidad

Con respecto a la resistencia al impacto se obtuvo un valor de 100 %, ya que ninguno de los pellets ensayados tuvo una ruptura de volumen (completa), y la ruptura que se presentó al caer los pellets sólo fue superficial, ya que sólo partículas (polvo) del material fueron las que se desprendieron del pellet. Esto pudo deberse a que las condiciones de densificación con las que se realizó el estudio, afectó a los pellets mecánicamente, ya que las fuerzas químicas (intermoleculares, Van der Waals) disminuyen en su intensidad principalmente debido a la temperatura y presión aplicadas en el proceso (Forero, et al., 2014, p. 198).

En cuanto a la densidad obtenida su valor fue $574,69 \text{ kg/m}^3$, este valor no se encuentra dentro del rango mencionado por Arteaga (2016) que es entre $750 - 850 \text{ kg/m}^3$, ni por Gaitán y Moya (2016) en cuyo trabajo la densidad varía entre 650 y 780 kg/m^3 , esto se debe a que el material torrefactado generalmente es más difícil de densificar y que durante la misma se produjo pérdida de masa del biocarbón debido a la adherencia del material en el molde utilizado y a la pérdida de humedad del material durante el secado de los pellets (p. 330).

Sin embargo, al comparar el valor de densidad obtenido en esta investigación con el valor obtenido en el trabajo de Thrän et al. (2016), se puede apreciar que su densidad es mayor a la de pellets de madera ($550 - 650 \text{ kg/m}^3$), está dentro de

rango de los pellets de madera torrefactada (550 – 800 kg/m³) y menor al del carbón (800 – 850 kg/m³) (p. 194).

3.4.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En la Tabla 3.6 se observan los valores de resistencia a la compresión obtenidos luego del ensayo, al igual que las dimensiones del pellet.

Tabla 3.6. Resistencia a la compresión obtenida en el pellet

Diámetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga última a compresión (N)	Resistencia última a compresión (MPa)	Módulo secante de elasticidad a compresión (MPa)	Deformación a la rotura desde la posición (%)
29,53	12,33	684,88	4 876,67	7,12	11,24	43,45

En la Tabla 3.6. se observa que la fuerza de compresión máxima fue 4 876,67 N, un valor alto con respecto a los ensayos realizados por Tenorio et al. (2015) donde sus resultados con madera como la *Penniselum purpureum* tuvo una resistencia de 875 N (p.70), o Stelte et al. (2011) donde la máxima resistencia a la compresión utilizando como materia prima “hayas” fue de 1 530 N, la variabilidad en los resultados obtenidos es debido a que los mismos dependen de las características de la materia prima como la dureza e incluso el coeficiente de transferencia de calor mismo que pudo producir la variación de temperatura y presión en el proceso de fabricación de pellets (p. 915).

La humedad es otro factor que también puede influir en los valores de resistencia a la compresión, ya que la resistencia a la compresión aumenta a medida que disminuye el contenido de humedad, sin embargo, el valor obtenido es cercano con el obtenido con otros pellets como el formado con la mezcla de carbón bituminoso y residuos de madera ya que éstos tienen una resistencia de 4 896 N (Atuesta y Sierra, 2015, p. 22). Otros estudios han determinado que existe relación lineal entre la variable densidad de los pellets y resistencia de ruptura a la

compresión (Gaitán y Moya, 2016, p. 336), razón por la cual toma gran importancia la porosidad del material torrefactado y la presión de peletización.

Las muestras luego del ensayo presentaron fallas y grietas, debido a que los pellets prensados a temperaturas altas generalmente muestran áreas de falla de compactación, causadas por la disminución de lignina, pues esta disminuye la resistencia del material debido a la pérdida del aporte de las fuerzas intermoleculares del material ligno-celulósico (Stelte, et al, 2011, p. 917), además, al tener una alta concentración de compuestos hidrofóbicos, tienen una baja resistencia a la compresión (González, et al., 2014, p. 85).

En la Figura 3.31 se presenta la curva del comportamiento de la probeta de biocarbón al ser comprimida hasta llegar a su ruptura.

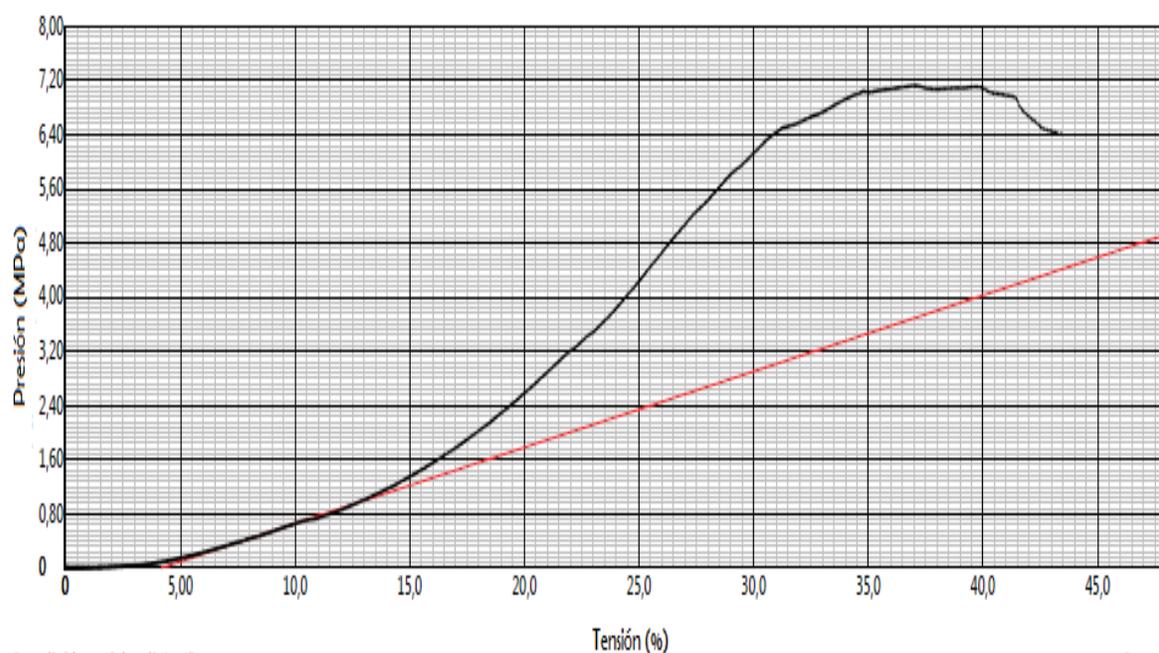


Figura 3.31. Curva de resistencia de la probeta a la compresión

En la Figura 3.31 se observa la curva del comportamiento del ensayo de resistencia a la compresión del pellet, este ensayo simuló la tensión de compresión a la que estarán sometidos los pellets durante el almacenamiento y/o transporte, en este sentido en la gráfica se diferencia dos zonas básicas: primero

una zona que tiende a ser lineal, llamada zona elástica que va hasta 1,2 MPa y la segunda zona denominada plástica.

El punto de transición entre las dos zonas es el límite elástico, en este caso el punto fue cuando se deformó el 15 % del pellet tal como se puede observar en la Figura, adicional a esto, en la misma se puede observar el punto más alto, que es el punto de resistencia máxima a la compresión alcanzada y esta fue 7,12 MPa.

Al comparar el valor obtenido con el rango que indica el trabajo realizado por Tenorio et al. (2015) el cual es de 1,70 a 4,80 MPa, se puede apreciar que la resistencia a la compresión en los pellets a partir de residuos de balsa torrefactada es mayor, eso pudo ser debido a las condiciones de presión y temperatura a las que se peletizó el biocarbón (p. 71).

Cabe indicar que la zona elástica es una zona de deformación reversible, es decir, una vez que cesa la acción de la fuerza, el material recupera su longitud inicial. Según Tenorio et al. (2015), cuanto mayor sea la fuerza de rotura y la carga de compresión que soportan los pellets, mejor será su rendimiento final (p. 71).

Como se presentada en la Tabla 3.6 la deformación a la ruptura es menor al 15 % lo cual indica que el proceso de prensado del pellet se realizó de manera adecuada, ya que la deformación no es significativa a pesar de la fuerza máxima aplicada al pellet durante el ensayo.

Una resistencia de esta magnitud indica que el material obtenido cumple con las características de resistencia a la compresión necesarias para soportar su apilamiento en contenedores de almacenamiento, sin que se fracture por su propio peso.

En la Tabla 3.7, se indican los valores obtenidos en las pruebas realizadas al material ensayado en este proyecto, los mismos se comparan con los parámetros de normas internacionales como la norma austriaca ÖNORM M7135 y la norma ENPlus que consiste en un programa de certificación que especifica las

propiedades que deben cumplir los pellets a base de madera para un mejor manejo, almacenamiento, mantenimiento y utilización, lo que ayuda a definir la calidad de los mismos (Atuesta y Sierra, 2015, p. 22; AVEBION, 2015, p. 5).

Tabla 3.7. Comparación de parámetros de normas internacionales contra resultados de las pruebas del material ensayado

Material	Propiedad	Parámetros	Unidades	Resultados	ENPlus B	Ö-Norma M7135
Aserrín de balsa	Físicas	Granulometría d80	um	1 440	-	-
		Humedad	%	9,25	< 10	-
		Cenizas	%	1,13	< 2,0	-
		Volátiles	%	84,51	-	-
		Carbono fijo	%	5,11	-	-
	Químicas	Hemicelulosa	%	34,32	-	-
		Celulosa	%	52,83	-	-
		Lignina	%	12,85	-	-
	Térmicas	Poder calórico	MJ/kg	17,58	> 16,56	-
Biocarbón	Físicas	Humedad	%	2,26	< 10	<10
		Cenizas	%	3,49	< 2,0	<0,5
		Volátiles	%	73,71	-	-
		Carbono fijo	%	20,53	-	-
	Térmicas	Poder calórico	MJ/kg	27,09	> 16,56	18
		Rendimiento másico	%	56,58	-	-
		Eficiencia energética	%	87,18	-	-
Pellets	Físicas	Diámetro	mm	29,53	6	4-10
		Longitud	mm	12,33	3,15<L<40	<5*d
		Densidad	kg/m ³	574, 69	600<D<750	>600
	Mecánica	Dureza	Shore A		-	-
		Durabilidad mecánica	%	76,25	-	-
		Resistencia al impacto	%	100	-	-
		Resistencia a la compresión	N	4 876,67	-	-
	Térmicas	Poder Calórico	MJ/kg	24,83	> 16,56	>18

Como se puede apreciar en la Tabla 3.7 en cuanto a las características físicas del aserrín de balsa cumple con la norma ENPlus B para elaborar pellets, ya que el contenido de humedad (9,25 %) es menor a lo establecido (10 %), al igual que el contenido de cenizas pues éste es 1,13 % y la norma establece que debe ser menor al 2 %, El valor del poder calórico también cumple con lo requerido, pues establece que debe ser mayor a 16,56 MJ/kg y el obtenido fue 17,58 MJ/kg.

Al comparar el contenido de humedad del material torrefactado (2,26 %) se observa que el valor obtenido cumple con el establecido por las dos normas, en cambio, el contenido de cenizas no cumple con ninguna debido a que al realizar el proceso de torrefacción se liberaron los minerales contenidos en el aserrín, sin embargo, su valor no difiere en gran medida del establecido ya que su variación con la norma ENplus (1,49 %) es mínima.

En cuanto al poder calórico obtenido, se puede apreciar que cumple con la norma austriaca y la ENplus, pues su valor (27,09 MJ/kg) es mayor que 18 y 16,56 MJ/kg.

Al observar las dimensiones del pellet obtenido, tanto el diámetro como la altura del mismo no cumplen con las normas establecidas, debido a que la peletización del biocarbón obtenido se realizó con un molde diferente a los utilizados por la norma. La densidad del pellet tampoco cumplió con ninguna de las normas, ya que el valor obtenido fue menor al establecido, debido a la pérdida de material al adherirse en el molde durante el prensado, sin embargo, esta diferencia es pequeña ya que difiere en 25,31 kg/m³ del solicitado tanto por la norma austriaca como por ENPlus (600 kg/m³).

Como se puede observar el valor del poder calórico del pellet fue 24,83 (MJ/kg), por lo tanto, es mayor al solicitado por ambas normas (> 18 MJ/kg) y cumple con las mismas.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. Se caracterizó física, química y térmicamente los residuos de balsa, obteniendo 9,25 % de humedad, 1,13 % de cenizas, 84,51 % de volátiles y 5,09 % de carbón, con respecto a sus propiedades químicas se determinó que el mayor componente lignocelulósico fue la celulosa con un 52,83 %, seguido de la lignina con un 34,32 % y hemicelulosa con un 12,84 %, finalmente el poder calórico fue 17,58 MJ/kg.
2. El biocarbón con mejor valor de eficiencia energética obtenido a escala laboratorio fue a la temperatura de 220 °C y 15 min de tiempo de residencia, siendo el tiempo la variable de mayor influencia durante el proceso, con una eficiencia energética de 87,18 %, contenido de humedad, volátiles, cenizas y carbón de 2,26; 73,71; 3,49 y 20,53 % respectivamente.
3. Las condiciones de presión y temperatura con las que se obtuvo un mayor valor de dureza (76 (Shore A)) fueron 640 kgf/cm² y 160 °C.
4. Los pellets obtenidos presentaron una durabilidad mecánica de 76,25 %, densidad de 574,69 kg/m³; resistencia al impacto del 100 %, resistencia a la compresión de 7,12 MPa y soportó una carga máxima de 4 876,67 N.
5. El poder calórico final del pellet fue 24,83 MJ/kg considerándose una alternativa viable para reemplazar a los combustibles tradicionales, ya que su valor fue mayor al límite establecido por la norma de calidad para pellets ENplus y Ö-Norma M7135.
6. Los residuos de aserrín de balsa pueden ser utilizados como materia prima para la obtención de biocarbón, ya que mediante el método de torrefacción

seca se logró aumentar su eficiencia energética y mediante la densificación del biocarbón se obtuvieron pellets con propiedades mecánicas aptas para su manipulación y almacenamiento.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Estudiar si las condiciones de este trabajo son aptas para obtener pellets de biocarbón a escala industrial.
2. Realizar la densificación de los pellets con diferentes tamaños de partícula con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del pellet.
3. Utilizar otro tipo y concentración de aglutinante durante la peletización para mejorar las propiedades mecánicas de los pellets.
4. Realizar la peletización en un menor rango de presión y temperatura que el realizado en este trabajo.
5. Reproducir el método utilizado en este trabajo con otro tipo de biomasa residuales para la determinación de sus características físico-químicas y térmicas y su posible utilización como biocombustible.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abad, J., y García, F. (2010). Diagnóstico sobre el uso energético de la biomasa en la Comunidad Autónoma de Castilla y León (España). *Observatorio Medioambiental*, pp. 223-244. Recuperado de <http://revistas.ucm.es/index.php/OBMD/article/view/OBMD1010110223A> (Mayo, 2017).
2. Acharya, B., Sule, I. y Dutta, A. (2012). A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. *Biomass conversion and biorefinery*, 349-369. doi: 10.1007/s13399-012-0058-y
3. Ahn, B., Chang, H., Lee, S., Choi, D., Cho, S., Han, G. y Yang, I. (2014) Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaemferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Renewable Energy* 62.
4. Álvarez, A., Pizarro, C. y Folgueras, M. (2013). Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico. Oviedo: Universidad de Oviedo. Recuperado de http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/17777/6/TFM_Ana_AlvarezProteg.pdf (Mayo, 2017).
5. Andrade, H., Bonet, X. y Coello, J. (2014). "Balsa, earth, sun and water". Melianta, España: Balseurop Ecuato Española, SL. Recuperado de <http://www.balsaflex.com/images/documents/balsaflex/Balsa-Book.pdf> (Mayo, 2017).
6. Arauzo, J., Bimbela, F., Ábrego, J., Sánchez, J. y Gonzalo A. (2014). Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa. *Bol. Grupo Español Carbón*. Recuperado de <http://digital.csic.es/bitstream>

m/10261/108763/1/BoletinGEC_033-A01.pdf (Mayo, 2017).

7. Arias, B; Pevida, C; Ferosa, J; Plaza, M.; Rubiera, F. y Pis, J. (2008). Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of Woody biomass. *Fuel Processing Technology*, 169-175. doi: 10.1016/j.fuproc.2007.09.002.
8. Arroyo, F. (2010). Propiedades físicas de los biocombustibles, Importancia y métodos de determinación, *Phydades*, pp 1-5. Recuperado de <https://www.google.com.ec/#q=arroyo+f%C3%A1tima+propiedades+f%C3%ADsicas+de+los+biocombustibles> (Mayo, 2017)
9. Arteaga, Y., Carballo , R., García , Y., López, M. y Geada, G. (2012). Caracterización del aserrín de *Acacia mangium* Willd para la obtención de biocarbón. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 90-95. Recuperado de <http://www.itson.mx/publicaciones/rlrn/Documents/v8-n2-5-caracterizacion-del-aserrin-de-acacia-mangium-willd-para-la-obtencion-de-biocarbon.pdf> (Mayo, 2017).
10. Arteaga, L., Flores, M., Escobar , M., Segura, C. y Gordon, A. (2015). Analisis comparativo de la torrefacción húmeda y seca de *Pinus Radiata*. *energética*. Recuperado de <http://www.redalyc.org/comocitar/oa?id=147043932001> (Mayo, 2017)
11. Arteaga, L., Segura, C. y Diéguez, K. (2016). Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica. *AFINIDAD LXXIII*. Recuperado de <://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/viewFile/308445/398460> (Mayo, 2017).
12. Arteaga, L., Grandón, H., Flores, M., Segura, C. y Kelley, S. (2017). Steam

torrefaction of *Eucalyptus globulus* for producing black pellets: A Pilotscale experience. *Bioresource technology*, 1-37. doi: 10.1016/j.biortech.2017.04.037.

13. ASTM D2240. (2000). Standard Test Method for Rubber property- Durometer Hardness. Recuperado de <http://www.abqindustrial.net/store/images/products/dmt/RX-DD/d2240.pdf> (Marzo, 2017).
14. ASTM D440-86. (2002). Standard Test Method of Drop Shatter Test for Coal. Recuperado de <http://file.yizimg.com/175706/2011090909394804.pdf> (Marzo, 2017).
15. ASTM 39/C 39M. (2005). Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Recuperado de <http://www.c-s-h.ir/wp-content/uploads/2015/01/C-39.pdf> (Junio, 2017).
16. ASTM-E1131-08. (2008). Análisis Termogavimétrico. Recuperado de https://kupdf.com/queue/astm-e1131-08-tga_5912d131dc0d60b36f959eda_pdf?queue_id=-1 (Noviembre, 2016).
17. ASTM 872-82. (2013). Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. Recuperado de <https://compass.astm.org/download/E872.842.pdf>, (Noviembre, 2016).
18. ASTM D 1102-84. (2013). Standard Test Method for Ash in Wood. Recuperado de <https://compass.astm.org/download/D1102.10013.pdf> (Noviembre 2016)
19. ASTM D1107-96. (2013). Standard Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood. Recuperado de <https://compass.astm.org/download/D1107.27865.pdf> (Diciembre, 2016).

20. ASTM D1106-96. (2013). Standard Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood. Recuperado de <https://compass.astm.org/download/D1106.7632.pdf> (Diciembre, 2016).
21. ASTM D 3173 -17 (2013). Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. Recuperado de <https://compass.astm.org/download/D3173-03.5904.pdf> (Marzo, 2017).
22. ASTM D 3174-12 (2013). Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. Recuperado de <https://compass.astm.org/download/D3174.21914.pdf> (Marzo, 2017).
23. ASTM D 3175-17 (2013). Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. Recuperado de <https://compass.astm.org/download/D3175.27349.pdf> (Marzo, 2017).
24. ASTM D-5865. (2013). Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. Recuperado de <https://compass.astm.org/download/D5865.1204.pdf> (Mayo, 2017).
25. ASTM E 871-82. (2013). Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. Recuperado de <https://compass.astm.org/download/E871.21698.pdf> (Marzo, 2017).
26. ASTM C136/C136M-14, (2014). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Recuperado de <https://compass.astm.org/download/C136C136M.38878.pdf> (Noviembre, 2016).
27. Atuesta, L., y Sierra, F. (2015). Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual. *Informador Técnico (Colombia)*, pp. 18-25. Recuperado de

http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/title/caracterizacion-fisico-quimica-pellets-producidos-partir-mezclas-50-50-carbon/id/64831172.html (Mayo, 2017).

28. AVEBIOM, (2015). Directrices del EPC para el almacenamiento de pellets de madera. *ENplus*. Recuperado de http://www.enplus-pellets.eu/wp-content/uploads/2015/07/PelletStorageGuideline_Aug2015_ES.pdf (Mayo, 2017)
29. Bergman, P. y Kiel, J. (2005), Torrefaction for biomass upgrading. ECN-RX-05-180. Recuperado de: <https://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/rx05180.pdf> (Julio, 2017).
30. Boissonnet, G., Dupont, C., Haarlemmer, G., Peduzzi, E. y Maréchal, F. (2014). Torrefaction modelling for lignocellulosic biomass conversion processes. *ENERGY*, 1-10. doi: 10.1016/j.energy.2014.03.086.
31. Bustamante, V; Carrillo, A; Prieto, J ; Corral, J. y Hernández, J. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 7, núm. 38, pp. 5-24. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63450027007> (Septiembre, 2017)
32. Cajas, S. (2009). Efecto de la utilización de aserrín en combinación con estiércol bobino como sustrato en la producción de humus de lombríz. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de ingeniero zootecnista no publicado), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.
33. Camps, M. (2008). *Los Biocombustibles*: colección energías renovables, 2da Ed. Madrid: Ediciones mundi-prensa.

34. Cancho F. (2015). Estudio de los parámetros de pelletizado de residuos biomásicos en pelletizadora semi-Industrial. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero mecánico no publicado) Badajoz, España.
35. Carrillo, L. (2004). Fotosíntesis. Biomasa. Conversión por microorganismos. Biogas. Etanol. Biodiesel.. Madrid. Recuperado de <http://www.bionica.info/biblioteca/Carillo2004.pdf> (Mayo, 2017)
36. Castells, X., Cadavid, C., Campos, P., Flotats, R., García, M., Gaya, F. y Velo, G. (2005). Tratamiento y valorización energética de residuos. España: Díaz de Santos .
37. CENER. (2016). *Energía de la Biomasa*. ADItech Centro Nacional de Energías Renovables, 1.
38. Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. Univesidad Complutense de madrid. Recuperado de http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE_83_117-140__78E2E154C2BB213409D09C083013930C.pdf (Mayo 2017).
39. Chavez, M., y Domine, M. (2013). Lignina estructura y aplicaciones:métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interes industrial. *Avances en ciencia e ingeniería*, Recuperado de http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/2013/Vol4/Nro4/3-ACI1184-13-full.pdf (Mayo, 2017).
40. Chen, W., Hsu, H., Lu, K., Lee, W. y Lin, T., (2011), Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. *ENERGY*, 3012-3021. Doi: 10.1016/j.energy.2011.02.045.

41. Chen, Y., Chen W., Lin, B., Chang, J. y Ong, H., (2017), Fuel property variation of biomass undergoing torrefaction, *Energy PROCEDIA*, Doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.287.
42. Chew, J., y Doshi, V. (2011). Recent advances in biomass pretreatment-Torrefaction fundamentals and technology . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 15, 4212-4222. doi: 10.1016/j.rser.2011.09.017
43. CONELEC. (2013). Aspectos de sustentabilidad y sostenibilidad social y ambiental, Plan Maestro de Electrificación 2013-2022. (1ra. ed.) Cuenca:Advantlogic Ecuador S.A.
44. Durán, D., y Agresott, J. (2016). *Evaluación del Proceso de Torrefacción para el mejoramiento de las propiedades energéticas de los residuos forestales*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado). *Fundación Universidad de América, Facultad de Ingenierías*, Bogota, Colombia.
45. ENplus. (2015). Esquema de certificación de calidad para pellets de madera. Recuperado de http://www.enpluspellets.eu/wpcontent/uploads/2015/07/ENplusHandbook_part_V3.0_PelletQuality_ES.pdf (Junio, 2017).
46. Flores, E., (2010). Evaluación del efecto de la temperatura y el tiempo de calentamiento en la capacidad aglutinante de dos tipos de almidones para la formulación de comprimidos orales. (Informe de tesis).Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
47. Forero, C., Guerrero, C. y Sierra, F. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación . *Revista de la división de*

ingenierias y arquitectura Universidad Santo Tomas. doi: 10.15332/iteckne.v9i1.57.

48. Forero, C., Camargo, G. y Sierra, F. (2014). Modelos de compresión aplicados al proceso de densificación de combustibles sólidos binarios carbón- madera. *Revista de la división de ingenierias y arquitectura Universidad Santo Tomas*, 196-203. doi: <http://dx.doi.org/10.15332/iteckne.v11i2.733>.
49. Francescato, V., Antonini, E. y Zuccoli, L. (2008). Manual de combustibles de Madera. Valladolid: AVEBIOM.
50. Gaitán, J. y Moya , R. (2016). Characteristics and properties of torrefied biomass pellets from *Gmelina arborea* and *Dipterix panamensis* at different times . *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 325-337. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.09.044
51. García, L. (2016). Densificación y torrefacción de biomasa de Chumbera (*Opuntia SPP.*) y Jara (*Cistus SPP.*). (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado) Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
52. Gil, J. (2012). La Torrefacción: una tecnología innovadora en el pretratamiento y la densificación energética de la biomasa. *Biomasa*, pp. 63-65. Recuperado de http://www.energylab.es/fotos/090930123817_O8qk.pdf (Junio, 2017)
53. Giraldo, G. (2009). Biomasa residuos, buenas prácticas y oportunidades de desarrollo. Burgos, España. Recuperado de http://www.euro-biomass.com/SP/Burgos/Documents/CEEI-Burgos_CARTIF.pdf (Junio, 2017)

54. González, Y., Rincón, S., Camargo, G., Dévora, G y Sierra, F. (2014). Caracterización de Materiales lignocelulósicos residuales de palma de aceite y palma de coco para la fabricación de pellets, *AVANCES Investigación en Ingeniería Vol. 11*. Recuperado de <http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances-11/art9.pdf>
55. Guarnizo, A., Martínez, P., y Valencia, H. (2009). Pretratamientos de la celulosa y biomasa para la sacarificación. *Scientia et Technica*, 284-289. doi: 10.22517/23447214.2655.
56. Herguedas, A., Taranco, C., Rodríguez , E., y Prieto, P. (2012). Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. Madrid: ITAGRAC.T.Recuperado de <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2CBiocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf> (Julio, 2017).
57. IDAE. (2007). Energía de la Biomasa. Madrid-España. Recuperado de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10374_Energia_de_la_biomasa_07_28e17c9c.pdf (Junio, 2017).
58. Instituto Nacional de Preinversión. (2014). Atlas bioenergético de la república del ecuador. Quito: MINTUR-IGM. Recuperado de <http://inversion.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2016/04/Atlas-Bioenergeticodel-Ecuador.pdf> (Julio, 2017).
59. IPCC. (2011). Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Bioenergy. Recuperdo de https://www.ipcc.ch/pdf/presentations/Rio20/Rio20_puc_aivanova.pdf (Junio 2017)
60. Jara, H. (2009). Biomasa y sus propiedades como combustible. *Revista celulosa y papel*. Recuperado de http://www.atcp.cl/privado/docs/revistas/17/rev_154100243301.pdf (Julio 2017).

61. Jindo, K., Mizumoto, H., Sawada, Y., Sanchez, M. y Sonoki, T. (2014). Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. *Biogeosciences*, 6613-6621. doi:10.5194/bg-11-6613-2014
62. Kaliyan, N. y Morey, V. (2009). Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass. *biosystems engineering*, 47-63. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.05.006.
63. Lara, M., Ronda, A., Zamora, M. y Calero, M. (2017). Torrefaction of olive tree pruning: Effect of operating conditions on solid product properties. *FUEL*, 109-117. doi: 10.1016/j.fuel.2017.04.007.
64. Major, J. (2008). El biocarbón: Una herramienta para el manejo sostenible de suelos y la producción de energía. *Técnicaña*. Recuperado de http://www.tecnicana.org/pdf/2006/tec_v10_no_18_2006_p20-24.pdf (Mayo 2017).
65. Martín, F. (2005). "Pélets y briquetas". *Ecología*, pp. 54-62. Recuperado de http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf (Junio 2017).
66. Melissari, B. (2011). Evaluación de tecnologías de quema de biomasa en el Uruguay. *Tecnologías combustión biomasa*, pp. 55-66. Recuperado de http://www.um.edu.uy/_upload/_web_descarga_235_Evaluacion_tecnologas_quemado_biomasa_en_Uruguay.-Melissari.pdf (Julio 2017).
67. Mich, M. (2003). El uso de biomasa como fuente de energía en los hogares, efectos en el ambiente y la salud, y posibles soluciones. México: Gira. Recuperado de http://www.inecc.gob.mx/descargas/calair/Inf_gira_estufas.pdf (Junio 2017).

68. Míguez , J. (2012). Procesos termoquímicos para la obtención de energía a partir de la fitomasa residual. Cap. 9. Recuperado de http://www.inecc.gob.mx/descargas/calaire/inf_gira_estufas.pdf (Junio 2017).
69. Molina, J. (2014). Creación de una empresa dedicada a la Industrialización, Procesamiento y exportación de madera de balsa como bloques encolados, al mercado de los Estados Unidos de America ubicada en el cantón de santo domingo de los tsáchilas (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero comercial no publicado). Universidad politécnica salesiana sede quito, Quito, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6468/1/UPS-QT05050.pdf> (Junio 2017).
70. Monroy, C. (2008). Otras energías renovables. *Tecnología industrial* , pp.1-6. Recuperado de <https://tecnologiafuentenueva.wikispaces.com/file/view/Solar.pdf> (Julio 2017).
71. Palacios, E., (2011). “Obtención de Etanol a partir de Papel Bond de Desecho”. Proyecto previo a la Obtención del Título de Ingeniero Químico. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador.
72. Panduro , C. (2012). Utilización industrial y mercado de diez especies maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales. Lima: *AIDER*. Recuperado de <http://www.cnf.org.pe/Publicaciones/Transformacion%20quimica.pdf> (Junio 2017).
73. Parra, P. (2016). La Balsa, la apuesta del sector maderero. *Gestión*. Recuperado de <http://studylib.es/doc/7796268/consultar-art%C3%ADculo> (Mayo 2017).

74. Patiño, P.(2014). Biomasa Residual vegetal:Técnicas de transformación y estado actual. *Innovaciencia*. Recuperado de http://revistas.udes.edu.co/site/index.php/innovaciencia/article/view/255/pdf_16 (Mayo 2017)
75. Pérez, V. (2012). “Fabricación de briquetas de cáscara de almendra”, Universidad de Alicante. Recuperado de: <https://sgittotri.ua.es/es/empresa/documentos/briquetas.pdf> (Abril, 2017).
76. Prinsen, P. (2010). Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de máster en estudios avanzados en química no publicado), Instituto de recursos naturales y agrobiológicos de Sevilla. Sevilla, España.
77. Proskurina, S., Heinimó, J., Shipfer, F., y Vakkilainen, E. (2017). Biomass for industrial applications; the role of torrefaction. *Renewable Energy*, 1-25. doi: 10.1016/j.renene.2017.04.015
78. Robolledo, A. E., Gonzalez, G. P., Moreno , C. H., Collado, J. L., Alvez, J. C., Pacheco, E. V. y Barra, J. E. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/573/57346617009.pdf> (Junio, 2017).
79. Romero, M., Velasteguí, D., y Robles, M. (2011). *Descripción de las cadenas productivas de madera en Ecuador*. Quito: Andinagraph.
80. Stelte, W., Holm, J., Sanadi, A., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J. y Henriksen, U. (2011). A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *biomass and bioenergy*, 910-918. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.11.003.

81. Tenorio, C., Moya, R., Tomazello, M. y Valaert, J. (2015), Application of the X-ray densitometry in the evaluation of the quality and mechanical properties of biomass pellets, *Fuel Processing Technology* 132, 62-73. doi: 10.1016/j.fuproc.2014.12.040.
82. Thrän, D., Witt, J., Schaubach, K., Kiel, J., Carbo, M., Maier, J., Ndibe, C., Koppejan, J., Alakangas, E., Majer, S. y Schipfer, F., (2016), Moving torrefaction towards market introduction- Technical improvements and economic-environmental assessment along the overall torrefaction supply chain through the SECTOR project. *BIOMASS & BIOENERGY*, 184-200. doi: 10.1016/j.biombioe.2016.03.004
83. Tito, D., Beatón, P. y Zanzi, R. (2009). Torrefacción de biomasa densificada. *Tecnología Química*, pp. 180-186. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/4455/445543761022.pdf> (Junio 2017)
84. Tumuluru, J., Sokhansanj, S., Hess, R., Wright, C. y Boardman, R. (2011). A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industria biotechnology*, 384-401. doi:10.1089/IND.2011.0014.
85. UNE-EN ISO 17828. (2015). Determination of bulk density. Recuperado de <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0057270#.We-8RFvWzIU> (Marzo, 2017)
86. UNE-EN ISO 17831-1. (2016). Determinación de la durabilidad mecánica de pélets y briquetas. Parte 1: Pélets. Recuperado de <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0057456#.We-5LlvWzIU> (Marzo, 2017).
87. UNE-CEN/TS 14778. (2013). Biocombustibles sólidos. Muestreo.

Recuperado de http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0051314#.We-_hFvWzIU (Octubre, 2016).

88. Urien, A. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Máster Universitario en Ciencia y Tecnología Química Módulo: Química Analítica no publicado) Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado de http://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf (Junio 2017)
89. Uslu, A., Faaij, A. y Bergman, P. (2008). Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*, 1206-1223. doi: 10.1016/j.energy.2008.03.007
90. Vinces, G. y Poggi, J. (2014). Aprovechamiento sostenible de los residuos forestales para la producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada. *Revista de Ingeniería de la USIL* , Vol. 1, pp. 88-123. Recuperado de <http://revistas.usil.edu.pe/index.php/syh/article/view/12> (Septiembre, 2017).
91. Yan, W., Pérez, S. y Sheng, K. (2017). Upgrading fuel quality of moso bamboo via low temperature thermochemical treatments: Dry torrefaction and hydrothermal carbonization. *Fuel*, 473-480. doi: 10.1016/j.fuel.2017.02.015.

ANEXOS

ANEXO I

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASERRÍN DE Balsa

- **DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DEL ASERRÍN DE Balsa, NORMA ASTM C136/C136M-14**

Para determinar el tamaño de partícula, se colocó 50 g el aserrín de balsa en un tamiz vibratorio con un juego de mallas # 16, 20, 30, 50 y 60, estas se colocaron en orden decreciente. Luego se encendió el tamiz durante 10 min, y pesó el contenido de aserrín en contenido en cada malla.

En la Figura AI.1 se puede apreciar la balanza analítica utilizada para pesar la materia prima (a) y el juego de mallas utilizado para la determinación del tamaño de partícula del aserrín de balsa (b).



Figura AI.1. a) Balanza analítica con la muestra de aserrín de balsa; b) tamiz vibratorio con la muestra de aserrín de balsa.

En la Figura AI.2 se observa las partículas retenidas en la malla 16 y en el fondo.



Figura AI.2. a) Partículas de aserrín retenidas en la malla 16; b) partículas de aserrín que pasaron al fondo del tamiz vibratorio

En la Tabla AI.1, se puede observar los pesos que se retuvo en cada malla del tamiz vibratorio, para hacer el análisis de granulometría del aserrín de balsa.

Tabla AI.1. Valor del peso de la muestra retenido en cada malla, para la evaluación del tamaño de partícula del aserrín de balsa

Malla #	Size (um)	Masa retenida 1 (g)	Masa retenida 2 (g)
Sobrante	Fondo	14,4355	14,7355
50	300	10,6382	12,597
30	600	6,7239	4,5611
20	850	5,9135	5,7541
16	1 180	4,7418	4,4961
12	1 700	7,5977	7,6265

- **DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DEL ASERRÍN DE Balsa, ASTM E 871-82**

Para determinar el contenido de humedad se pesó 1 g de muestra y se colocó en un crisol previamente tarado, luego se registró su peso y se puso en una estufa a

la temperatura de 103 °C durante 16 h, posteriormente se colocó el crisol en el desecador, se esperó hasta que se enfríe y se pesó nuevamente.

La humedad se determinó con la Ecuación Al.1.

$$h = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \times 100 \quad [\text{Al.1}]$$

Donde:

h : Humedad, (%)

m : Peso del crisol, (g)

m_1 : Peso del crisol con la muestra antes del ensayo, (g)

m_2 : Peso del crisol con la muestra después del ensayo, (g)

Ejemplo de cálculo de la humedad

$$h = \frac{10,0004 \text{ g} - 9,1087 \text{ g}}{10,0004 \text{ g} - 0,5874 \text{ g}} \times 100$$

$$h = 9,47\%$$

- **DETERMINACIÓN DE LAS CENIZAS DEL ASERRÍN DE BALSA, NORMA ASTM D 1102-84**

Se pesó y se colocó en un crisol previamente tarado 2 g de muestra. Se tomó su peso y se colocó en un horno a 580 °C, se realizó repeticiones del calentamiento durante períodos de 30 min hasta que el peso final después del enfriamiento fue constante, posteriormente se colocó en un desecador y se pesó. El contenido de cenizas se determinó con la Ecuación Al.2.

$$cz = \frac{m_2 - m}{m_o} \times 100 \quad [\text{Al.2}]$$

Donde:

cz = Contenido de cenizas, (%)

m_2 = Peso del crisol con la muestra después del calentamiento, (g)

m = Peso del crisol, (g)

m_o = Peso de la muestra, (g)

Ejemplo de cálculo de las cenizas.

$$cz = \frac{27,6207 \text{ g} - 27,6088 \text{ g}}{1,0014 \text{ g}} \times 100$$

$$cz = 1,19 \%$$

- **DETERMINACIÓN DE LOS VOLATILES DEL ASERRÍN DE BALSA, NORMA ASTM E 872-82**

Para la determinación del contenido de volátiles del aserrín de balsa se pesó y se colocó 1 g de muestra en un crisol previamente tarado y luego se lo introdujo en una mufla a 950 °C durante 7 min y finalmente se pesó nuevamente. El porcentaje de masa perdida se determinó con la Ecuación Al.3.

$$m_p = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \times 100 \quad [\text{Al.3}]$$

Donde:

m_1 = Peso del crisol con la muestra antes del ensayo, (g)

m_2 = Peso del crisol con la muestra después del ensayo, (g)

m = Peso del crisol, (g)

v = Contenido de volátiles, (%)

El contenido de volátiles se determinó con la Ecuación AI.4

$$v = m_p - h \quad \text{[AI.4]}$$

m_p = Masa perdida, (%)

h = Contenido de humedad, (%)

• DETERMINACIÓN DEL CARBÓN DEL ASERRÍN DE Balsa

El contenido de carbono se determinó al restar 100 de la suma de los contenidos de humedad, volátiles y cenizas con la Ecuación AI.5.

$$c = 100 - h - v - cz \quad \text{[AI.5]}$$

Donde:

c = Contenido de carbón, (%)

h = Contenido de humedad, (%)

v = Contenido de volátiles, (%)

cz = Contenido de cenizas, (%)

Ejemplo de cálculo del contenido de carbón.

$$c = 100 - 9,25 - 84,51 - 1,13$$

$$c = 5,11 \%$$

ANEXO II

DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL ASERRÍN DE Balsa

- **EXTRACCIÓN DE LA CERA O GRASA, NORMA ASTM D1107-96**

Para remover la cera o grasa del aserrín de balsa se pesó 2 g de la muestra seca retenida en malla 60 y se colocó 200 mL de una mezcla etanol-benceno en relación másica 1:2 en el equipo de extracción soxhlet durante 6 a 8 h aproximadamente.

En la Figura AII.1, se observa el equipo soxhlet utilizado con las muestras para la remoción de la cera o grasa.



Figura AII.1. Equipo de extracción soxhlet

- **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CELULOSA, NORMA TAPPI T17 M-55, 2016**

Una vez removido el contenido de grasa, se lavó 2 g de la muestra tratada con metanol y se la secó durante 3 h a 105 °C. Luego se colocó la muestra en un balón con 50 mL de hipoclorito de sodio 10 % (m/m) y se agitó durante 8 h. Después se filtró y se lavó la muestra con 50 mL de agua destilada, 50 mL de dióxido de azúfre al 3 % (m/m), 50 mL de agua y 115 mL de sulfito de sodio al 2 % (m/v).

Se lavó el material filtrado con sulfito de sodio en proporciones de 15 mL, hasta completar 105 mL, posteriormente se dejó reposar durante 30 min en un baño de agua en su punto de ebullición. El material nuevamente se filtró, se lavó con 250 mL de agua caliente y se secó la muestra por 3 h a 105 °C.

El contenido de celulosa se determinó utilizando la Ecuación AII.1

$$\%Celulosa = \frac{\text{masa final crisol [g]} - \text{masa crisol vacío [g]}}{\text{masa inicial muestra [g]} * (1 - \text{humedad})} * 100 \quad [\text{AII.1}]$$

En la Figura AII.2, se observa el proceso de agitación para la extracción de la celulosa y la filtración de la misma.



Figura AII.2 a) Agitación del aserrín en hipoclorito de sodio, b) celulosa extraída del aserrín de balsa

- **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE LIGNINA, ASTM D1109-96, 2013**

Luego de remover la cera o grasa de la muestra se lavó 1 g de muestra con metanol para remover los residuos y se secó a 80 °C durante 3 h. Luego se colocó 15 mL de ácido sulfúrico 72 % (m/m) y se agitó por 2 h a temperatura ambiente, después se colocó en reflujo durante 4 h, y se añadió 560 mL de agua destilada. Se dejó enfriar, se filtró y se lavó el residuo con agua caliente. Finalmente se secó la muestra por 3 h a 105 °C y se la pesó (ASTM D1109-96, 2013).

Se utilizó la Ecuación AII.2 para calcular el contenido de lignina, la humedad debe estar expresada en base 1 para el cálculo.

$$\%lignina = \frac{\text{masa final crisol [Kg]} - \text{masa crisol vacío [Kg]}}{\text{masa inicial muestra [Kg]} * (1 - \text{humedad})} * 100 \quad [\text{AII.2}]$$

En la Figura AII.3, se presenta el esquema del equipo utilizado para el ensayo y la lignina luego de su extracción.

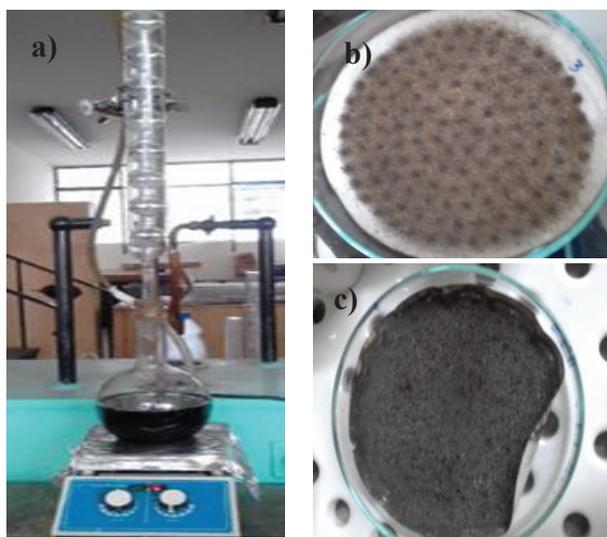


Figura AII.3. a) Equipo utilizado para la extracción de la lignina, b) lavado y filtrado de la lignina y c) lignina extraída

ANEXO III

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL ASERRÍN DE BALSA

• ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA), NORMA ASTM E1131-08

En la Figura AIII.1 se puede observar la variación de la temperatura con el tiempo, y en ésta se puede observar que, al pasar 41,36 min la temperatura a la cual se realizó el ensayo permanece constante y antes de éste, aumenta linealmente en función del tiempo.

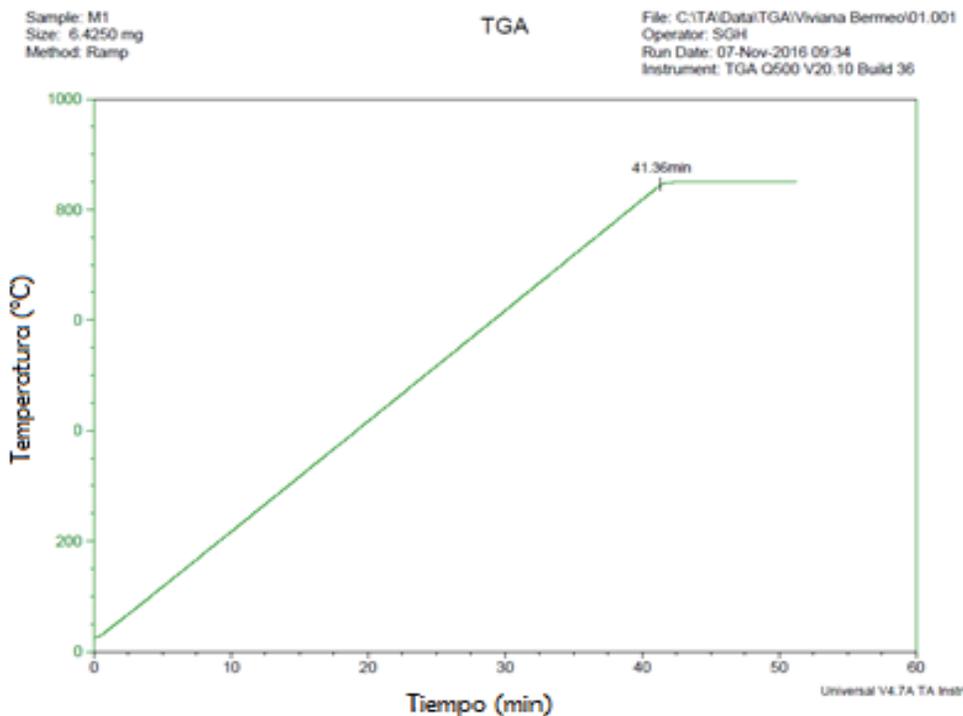


Figura AIII.1. Resultado del análisis termogravimétrico en el cual varía la temperatura con el tiempo

En la Figura AIII.2, se puede apreciar la variación del porcentaje de pérdida de peso del duplicado de la muestra de aserrín de balsa con respecto al tiempo y en la Figura AIII.3, se observa la variación del porcentaje de peso con respecto a la temperatura.

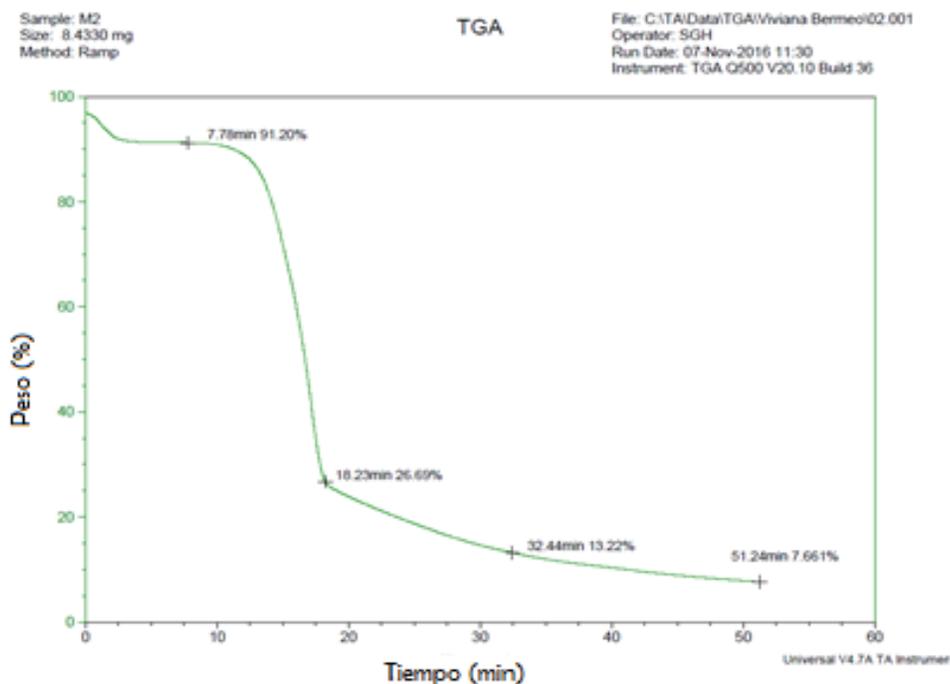


Figura AIII.2. Análisis termo gravimétrico del aserrín de balsa, en el cual varía el porcentaje de peso con respecto al tiempo.

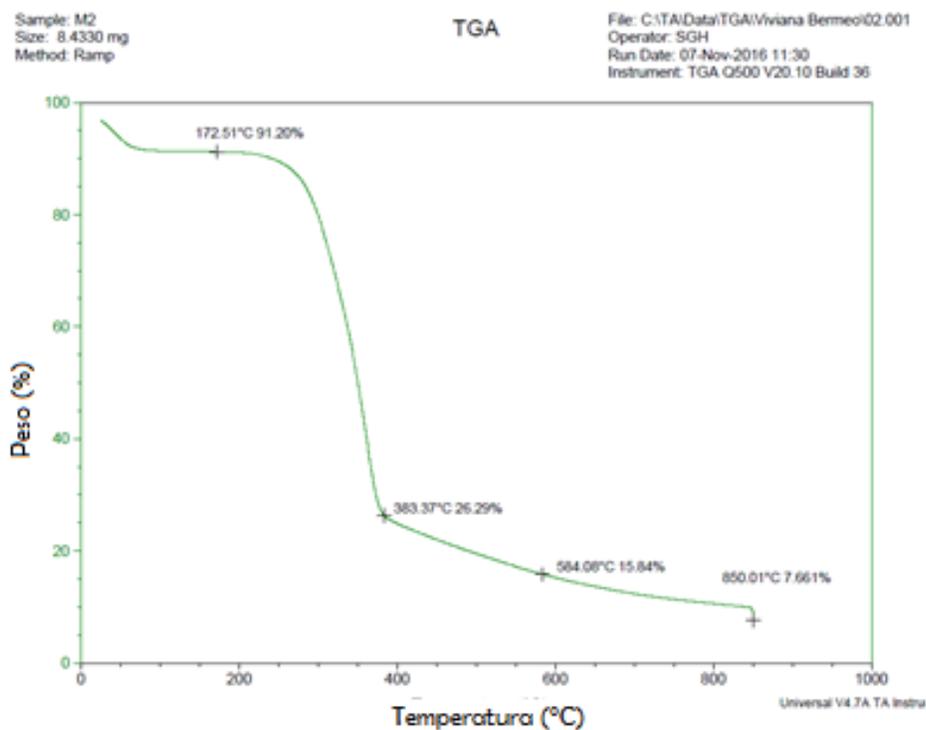


Figura AIII.3. Ensayo termogravimétrico del aserrín de balsa, en el que varía el porcentaje de su peso con la temperatura

- **DETERMINACIÓN DE PODER CALÓRICO, NORMA ASTM D-5865**

Para ello se pesó aproximadamente 1 g de aserrín de balsa en forma de pastilla y se la colocó mediante un cable de ignición dentro de una bomba con 5 mL de agua destilada.

Luego se la cerró la bomba e ingresó oxígeno durante 5 min, para posteriormente colocarla en recipiente con agua hasta lo sobrepase formando una camisa adiabática.

La camisa adiabática que contenía a la bomba, se equilibró hasta que alcanzó la temperatura de 20 °C, luego se identificó el aumento de temperatura luego de la ignición hasta que ésta permaneció constante (ASTM D-5865, 2013).

En la Figura AIII.4, se presenta la formación de la muestra de aserrín de balsa en pastilla, previa a la determinación del poder calórico.



Figura AIII.4. Formación de la pastilla de aserrín de balsa

En la Figura AIII.5, se presenta el ingreso de oxígeno a la bomba de combustión.



Figura AIII.5. Ingreso del oxígeno en la bomba calorimétrica

En la Figura AIII.6, se presenta el acondicionamiento de la camisa adiabática con agua.

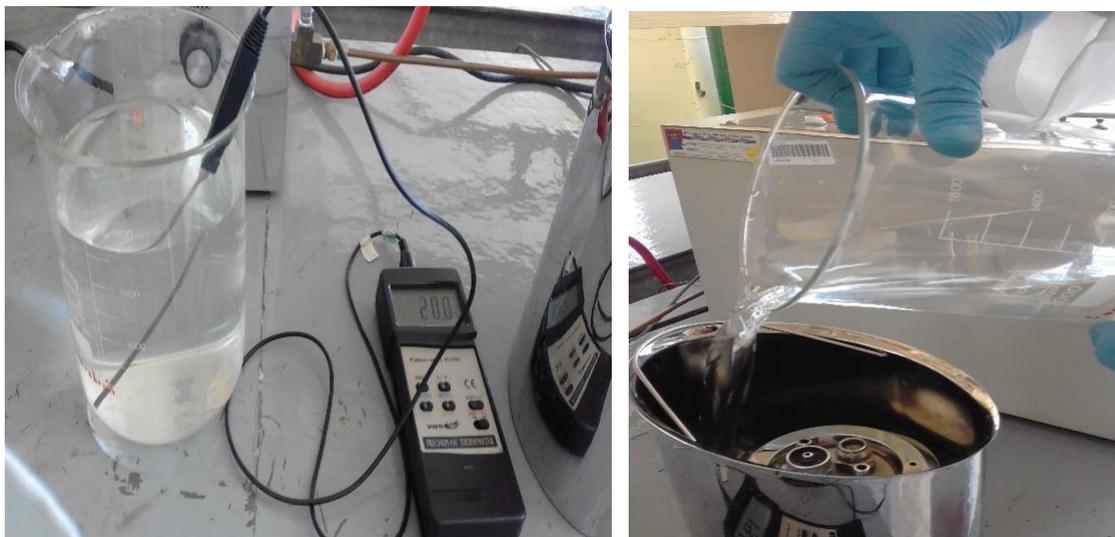


Figura AIII.6. Acondicionamiento de la camisa adiabática con agua a 20 °C

ANEXO IV

**DATOS EXPERIMENTALES DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL
BIOCARBÓN**

- **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD SEGÚN LA NORMA ASTM D3173 -17**

En la Tabla AIV.1 se indican los datos y resultados del contenido de humedad del biocarbón torrefactado a cuatro diferentes temperaturas y dos tiempos de residencia con su respectiva repetición.

Tabla AIV.1. Datos y resultados de la evaluación del contenido de humedad del biocarbón torrefactado

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso del crisol (g)	Peso de muestra (g)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Contenido de humedad (%)
220	15	20,1717	1,0012	21,1729	21,1495	2,34
220	15	25,3722	1,0012	26,3734	26,3515	2,19
250	15	31,455	1,0060	32,461	32,4426	1,83
250	15	20,1726	1,0269	21,1995	21,1797	1,93
280	15	23,4748	1,0004	24,4752	24,45816	1,70
280	15	31,573	0,5825	32,1555	32,1454	1,73
300	15	16,8307	1,0023	17,833	17,8182	1,48
300	15	16,8064	1,001	17,8074	17,7929	1,45
220	30	18,9604	1,0022	19,9626	19,9428	1,98
220	30	19,6925	1,0034	20,6959	20,6756	2,02
250	30	23,4315	1,0029	24,4344	24,4223	1,21
250	30	22,9401	1,0005	23,9406	23,924	1,66
280	30	23,4298	1,0008	24,4306	24,4219	0,87
280	30	20,2919	1,0027	21,2946	21,2855	0,91
300	30	18,5702	1,0012	19,5714	19,5627	0,87
300	30	19,7028	1,0008	20,7036	20,6965	0,71

La humedad se obtuvo con la Ecuación AIV.1

$$H = \frac{W_t - C_f}{M} \times 100 \quad [\text{AIV.1}]$$

Donde:

H = Contenido de humedad, (%)

W_t = Peso del crisol con la muestra antes del ensayo, (g)

C_f = Peso del crisol con la muestra después del ensayo, (g)

M = Peso de la muestra, (g)

Ejemplo de cálculo para determinar el contenido de humedad en la muestra.

$$H = \frac{21,1729 \text{ g} - 21,1495 \text{ g}}{1,0012 \text{ g}} \times 100 = 2,34 \%$$

- **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE VOLÁTILES SEGÚN LA NORMA ASTM D 3175-17**

En la Tabla AIV.2, se indican los datos y resultados del contenido de volátiles del biocarbón torrefactado a cuatro diferentes temperaturas y dos tiempos.

Tabla AIV.2. Datos y resultados de la evaluación del contenido de volátiles del biocarbón torrefactado

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso del crisol (g)	Peso de muestra (g)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Volátiles+ humedad (%)	Húmedad (%)	Volátiles (%)
220	15	18,5566	1,0049	19,5615	18,7963	76,15	2,34	73,81
220	15	23,4306	1,0015	24,4321	23,6729	75,81	2,19	73,62
250	15	16,808	1,0006	17,8086	17,2364	57,19	1,83	55,36

Tabla AIV.2. Datos y resultados de la evaluación del contenido de volátiles del biocarbón torrefactado (continuación...)

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso del crisol (g)	Peso de muestra (g)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Volátiles+ humedad (%)	Húmedad (%)	Volátiles (%)
250	15	16,8325	1,0001	17,8326	17,263	56,95	1,93	55,03
280	15	18,5585	1,003	19,5615	19,0364	52,35	1,70	50,65
280	15	31,8632	0,5728	32,436	32,1408	51,54	1,73	49,80
300	15	19,6807	1,0015	20,6822	20,2236	45,79	1,48	44,31
300	15	32,8111	1,0033	33,8144	33,3599	45,30	1,45	43,85
220	30	16,8226	1,0012	17,8238	17,2105	61,26	1,98	59,28
220	30	16,7916	1,0013	17,7929	17,19177	60,03	2,02	58,01
250	30	31,4551	1,0048	32,4599	31,9528	50,47	1,21	49,26
250	30	33,0437	1,0018	34,0455	33,4969	54,76	1,66	53,10
280	30	31,8823	1,0096	32,8919	32,4331	45,44	0,87	44,57
280	30	32,8103	1,0230	33,8333	33,322	49,98	0,91	49,07
300	30	24,9883	1,0014	25,9897	25,5508	43,83	0,87	42,96
300	30	22,9583	1,0082	23,9665	23,5032	45,95	0,71	45,24

Los resultados del porcentaje de masa pérdida se obtuvieron con la Ecuación AIV.2

$$V = \frac{W_t - C_f}{W_t - W_c} \times 100 - H \quad [\text{AIV.2}]$$

Donde:

V = Contenido de volátiles, (%)

H = Contenido de humedad, (%)

W_t = Peso del crisol con la muestra antes del ensayo, (g)

C_f = Peso del crisol con la muestra después del ensayo, (g)

W_c = Peso del crisol, (g)

Ejemplo de cálculo para la obtención del contenido de volátiles en el biocarbón.

$$V = \frac{19,5615 \text{ g} - 18,7963 \text{ g}}{19,5615 \text{ g} - 18,5566 \text{ g}} \times 100 - 2,34 \% = 73,81 \%$$

- **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZAS, SEGÚN LA NORMA ASTM D3174-12**

En la Tabla AIV.3. se indica los datos y resultados del contenido de cenizas del biocarbón torrefactado a cuatro diferentes temperaturas y dos tiempos de residencia con su respectiva repetición.

Tabla AIV.3. Datos y resultados de la evaluación del contenido de cenizas del biocarbón torrefactado

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso del crisol (g)	Peso de muestra (g)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso de cenizas (g)	Contenido de cenizas (%)
220	15	19,6948	1,0047	20,6995	19,7302	0,9693	3,52
220	15	20,1539	1,0020	21,1559	20,1886	0,9673	3,46
250	15	37,6289	1,0130	38,6419	37,6681	0,9738	3,87
250	15	23,638	1,0162	24,6542	23,6741	0,9801	3,55
280	15	19,6936	1,0041	20,6977	19,7367	0,9610	4,29
280	15	19,7005	1,0029	20,7034	19,7427	0,9607	4,21
300	15	27,5962	1,0103	28,6065	27,6421	0,9644	4,54
300	15	16,7961	1,0122	17,8083	16,842	0,9663	4,53
220	30	23,1327	1,011	24,1437	23,1728	0,9709	3,97
220	30	23,4267	1,0012	24,4279	23,4639	0,964	3,72
250	30	16,7686	1,0044	17,7730	16,8109	0,9621	4,21
250	30	32,365	1,0255	33,3905	32,4107	0,9798	4,46
280	30	17,6476	1,0042	18,6518	17,6892	0,9626	4,14
280	30	22,9536	1,04882	24,00242	23,003	0,99942	4,71

Tabla AIV.3. Datos y resultados de la evaluación del contenido de cenizas del biocarbón torrefactado (continuación...)

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso del crisol (g)	Peso de muestra (g)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso de cenizas (g)	Contenido de cenizas (%)
300	30	21,0451	1,0052	22,0503	21,0925	0,9578	4,72
300	30	21,0508	1,0188	22,0696	21,106	0,9636	5,42

Los resultados se obtuvieron mediante la Ecuación AIV.3.

$$CZ = \frac{C_f - W_c}{M} \times 100 \quad [AIV.3]$$

Donde:

CZ = Contenido de cenizas, (%)

C_f = Peso del crisol con la muestra después del calentamiento, (g)

W_c = Peso del crisol, (g)

M = Peso de la muestra, (g)

Ejemplo de cálculo del contenido de cenizas en el biocarbón.

$$CZ = \frac{19,7302 \text{ g} - 19,6948 \text{ g}}{1,0047 \text{ g}} \times 100 = 3,52 \%$$

• DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBÓN

En la Tabla AIV.4, se indica los datos y resultados del contenido de carbón del biocarbón torrefactado a cuatro diferentes temperaturas y dos tiempos de residencia con su respectiva réplica.

Tabla AIV.4. Datos y resultados de la evaluación del contenido de carbón del biocarbón torrefactado

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Humedad (%)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	SUMA (humedad+ volátiles+ cenizas) (%)	Carbón (%)	TOTAL (%)
220	15	2,34	73,81	3,52	79,67	20,33	100,00
220	15	2,19	73,62	3,46	79,27	20,73	100,00
250	15	1,83	55,36	3,87	61,06	38,94	100,00
250	15	1,93	55,03	3,55	60,51	39,49	100,00
280	15	1,70	50,65	4,29	56,65	43,35	100,00
280	15	1,73	49,80	4,21	55,74	44,26	100,00
300	15	1,48	44,31	4,54	50,33	49,67	100,00
300	15	1,45	43,85	4,53	49,84	50,16	100,00
220	30	1,98	59,28	3,97	65,22	34,78	100,00
220	30	2,02	58,01	3,72	63,75	36,25	100,00
250	30	1,21	49,26	4,21	54,68	45,32	100,00
250	30	1,66	53,10	4,46	59,22	40,78	100,00
280	30	0,87	44,57	4,14	49,59	50,41	100,00
280	30	0,91	49,07	4,71	54,69	45,31	100,00
300	30	0,87	42,96	4,72	48,54	51,46	100,00
300	30	0,71	45,24	5,42	51,37	48,63	100,00

Los resultados se obtuvieron con la Ecuación AIV.4

$$C = 100 - H - V - CZ$$

[AIV.4]

Donde:

C = Contenido de carbón, (%)

H = Contenido de humedad, (%)

V = Contenido de volátiles, (%)

CZ = Contenido de cenizas, (%)

El ejemplo de cálculo del contenido de carbón:

$$C = 100 - 2,34 - 73,81 - 3,52 = 20,33 \%$$

- **DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO MÁSSICO**

En la Tabla AIV.5, se indica los datos y resultados del contenido de carbón del biocarbón torrefactado.

Tabla AIV.5. Datos y resultados de la evaluación del rendimiento mássico del biocarbón torrefactado

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Rendimiento mássico (%)
220	15	56,0282	32,5967	58,18
220	15	56,0338	30,8038	54,97
250	15	56,0492	27,3037	48,71
250	15	56,0395	25,9251	46,26
280	15	56,056	25,446	45,39
280	15	56,0185	22,3283	39,86
300	15	56,0288	24,6089	43,92
300	15	56,0154	22,5173	40,20
220	30	56,0755	27,0749	48,28
220	30	56,1074	26,6492	47,50
250	30	59,1054	27,4686	46,47
250	30	56,0176	24,8964	44,44
280	30	56,298	23,8751	42,41
280	30	56,0184	25,5944	45,69
300	30	56,0038	24,9885	44,62
300	30	56,2115	23,7191	42,20

Los resultados se obtuvieron con la Ecuación AIV.5.

$$R = \frac{w_o}{W_f} \times 100 \quad \text{[AIV.5]}$$

Donde:

R = Rendimiento másico (%)

w_o = Peso de la muestra sin torrefactar (g)

W_f = Peso de la muestra torrefactada (g)

El ejemplo de cálculo del rendimiento másico en el biocarbón.

$$R = \frac{32,5967 \text{ g}}{56,0282 \text{ g}} \times 100 = 58,18 \%$$

ANEXO V

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS PELLETS

- **DETERMINACIÓN DE ENSAYO DE DUREZA, NORMA ASTM 2240**

En la Tabla AV.1 se presentan los valores de dureza obtenidos al realizar el ensayo.

Tabla AV.1. Valor de dureza en obtenido en escala shore A

160 °C						80 °C						17 °C					
640		150		50		640		150		50		640		150		50	
kgf/cm ²		kgf/cm ²		kgf/cm ²		kgf/cm ²		kgf/cm ²		kgf/cm ²		kgf/cm ²		kgf/cm ²		kgf/cm ²	
71	79	51	47	32	32	64	64	54	53	24	32	36	24	28	22	6	8
73	81	51	56	33	36	64	63	48	55	23	27	31	34	25	20	6	7
75	73	54	47	34	33	66	64	52	52	21	26	31	30	25	27	5	4
76	74	53	57	38	38	66	59	53	46	26	19	34	34	23	25	4	8
80	70	55	61	42	31	66	70	47	50	26	36	32	31	18	23	12	12
77	71	53	51	23	31	65	55	54	48	32	39	23	27	24	21	13	10
83	78	55	52	37	39	61	56	54	55	30	31	28	31	18	25	--	--
72	76	54	55	37	35	62	69	53	55	39	19	27	28	24	19	--	--
72	82	54	51	33	36	65	59	48	58	26	18	26	34	--	--	--	--
78	74	52	57	42	38	64	70	57	55	33	32	31	27	--	--	--	--
76	76	53	53	35	34	64	63	52	53	28	28	30	30	23	23	8	8

- **DETERMINACIÓN DE LA DURABILIDAD MECÁNICA DE LOS PELLETS, NORMA UNE-EN ISO 17831-1**

La durabilidad mecánica de los pellets se determinó con la EcuaciónAV.1

$$\%Du = \frac{M_f}{M_i} * 100 \quad [AV.1]$$

Donde:

Du : Índice de durabilidad, [%]

M_f : Peso final de los pellets después del ensayo, [g]

M_i : Peso inicial de los pellets antes del ensayo, [g]

Ejemplo de cálculo de la dureza mecánica

$$\%Du = \frac{49,8728}{38,3065} * 100$$

$$\%Du = 76,81 \%$$

- **DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, NORMA ASTM 39-96**

En la Figura AV.1 se puede observar la posición de la probeta de pellet de biocarbón en el equipo de compresión al realizar el ensayo.



Figura AV.1. Ensayo de compresión realizado en una probeta de biocarbón

En la Figura AV.2 se puede observar la probeta durante el ensayo de compresión.



Figura AV.2. Compresión de la probeta de biocarbón durante el ensayo

En la Figura AV.3 se puede observar la probeta de biocarbón luego del ensayo de resistencia a la compresión.



Figura AV.3. Probeta de pellet de biocarbón luego del ensayo de compresión

En la Tabla AV.2 se presentan los valores de la resistencia a la compresión obtenidos luego del ensayo.

Tabla AV.2. Valores de resistencia a la compresión

ENSAYO DE COMPRESIÓN ASTM C39/C39M-17b							
Muestra No.	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga última a compresión (N)	Resistencia última a compresión (MPa)	Módulo secante de elasticidad a compresión (MPa)	Deformación a la rotura desde la posición (%)
A1	29,53	12,33	684,88	4 876,67	7,12	11,24	43,45
A2	29,27	13,76	672,88	1 754,12	2,61	7,40	30,60
B1	29,93	14,92	703,56	410,83	0,58	1,76	27,02
B2	29,98	14,92	705,92	710,83	1,01	3,07	28,00
C1	29,95	13,78	704,50	1 705,40	2,42	5,99	34,47
C2	29,60	13,24	688,13	2 455,00	3,57	9,32	33,58
D1	29,68	17,40	691,86	755,83	1,09	3,10	39,41
D2	29,34	17,74	676,10	1 704,14	2,52	6,21	54,13

ANEXO VI

ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA REALIZADA

En la Figura AVI.1 se representa el diagrama de bloques de la metodología realizada en esta investigación

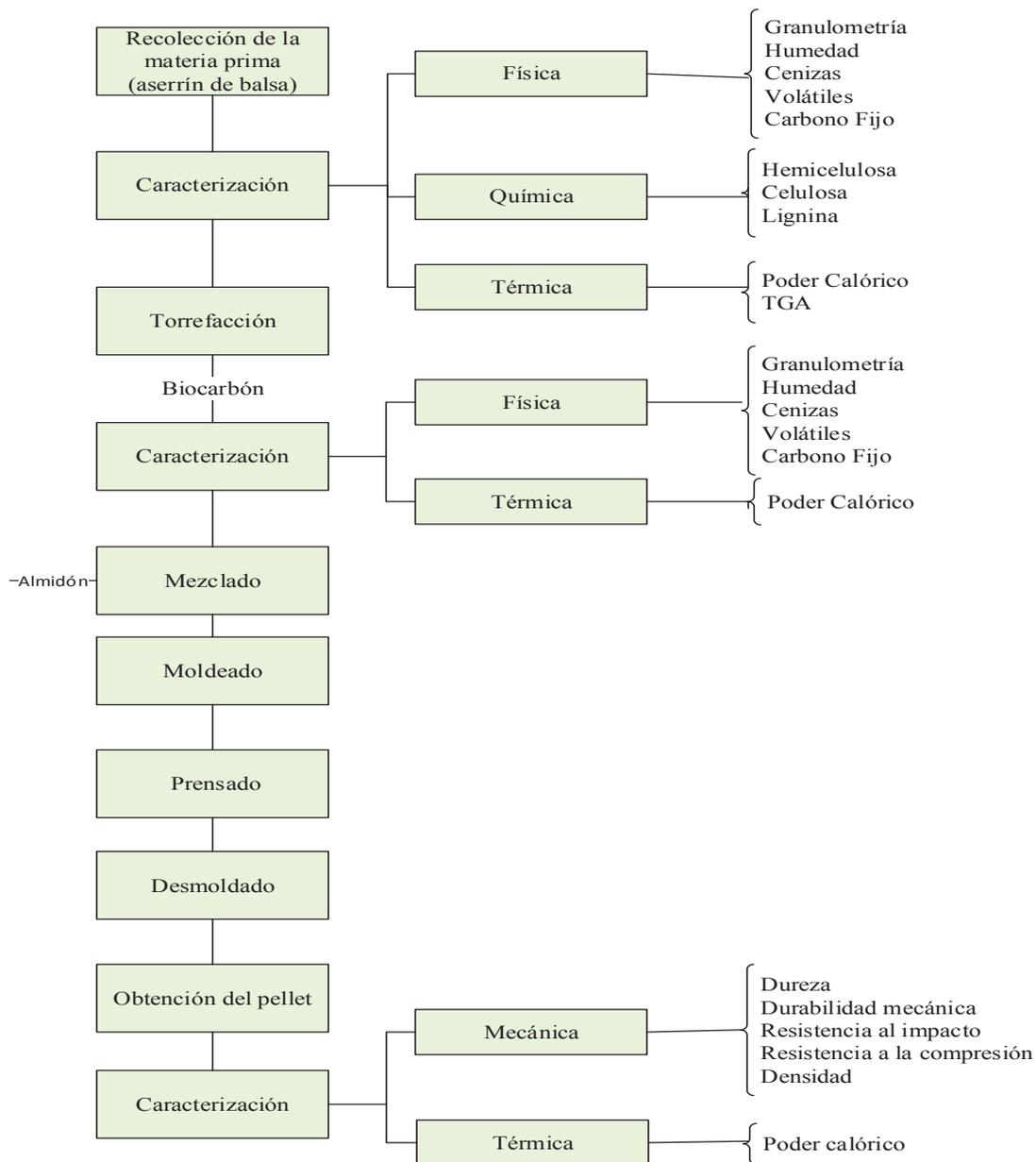


Figura AVI.1 Esquema de la metodología realizada

ANEXO VII

RESULTADOS DEL PODER CALÓRICO OBTENIDO

En la Figura AVII.1 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de poder calórico del biocarbón.



INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES
LABORATORIO DE BIOMASA
 Av. Giovanni Calles s/n y Av. Padre Luis Vaccari

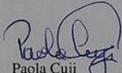
INFORME DE ENSAYOS N° LB-10-2017

SOLICITANTE	Omar Bonilla, Viviana Bermeo	FECHA DE RECEPCIÓN	2017-08-23
		FECHA DE INFORME	2017-10-13
MUESTRA	Biocarbón de aserrín de balsa	ENVASE	Funda aprox. 100 g
NÚMERO	LB-466-2017 a LB-473-2017	MUESTREO	Solicitante
ENSAYO REQUERIDO	Poder calórico		
DOCUMENTO	Oficio-No. DIQ-0123-2017		
TÉCNICO ASIGNADO	P. Medina		

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
MA (LB-466-2017)	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	27,09
MB (LB-467-2017)	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	28,02
MC (LB-468-2017)	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	31,46
MD (LB-469-2017)	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	28,28
ME (LB-470-2017)	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	31,20
MF (LB-471-2017)	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	27,77
MG (LB-472-2017)	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	31,29
MH (LB-473-2017)	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	28,67
Aserrín (LB-509-2017)	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	17,58

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.
 a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos


 Paola Cuji
 Responsable de Calidad



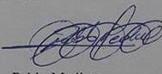

 Pablo Medina
 Analista Técnico

Figura AVII.1 Informe del ensayo de calórico obtenido del biocarbón luego de la torrefacción

En la Figura AVII.2 se presenta el resultado del poder calórico del pellet de biocarbón.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES
LABORATORIO DE BIOMASA
 Av. Giovanni Calles s/n y Av. Padre Luis Vaccari

INFORME DE ENSAYOS N° LB-11-2017

SOLICITANTE	Omar Bonilla, Viviana Bermeo	FECHA DE RECEPCIÓN	2017-10-18
		FECHA DE INFORME	2017-10-23
MUESTRA	Pellet de biocarbón	ENVASE	Funda aprox. 100 g
NÚMERO	LB-517	MUESTREO	Solicitante
ENSAYO REQUERIDO	Poder calórico		
DOCUMENTO	Oficio-No. DIQ-0123-2017		
TÉCNICO ASIGNADO	P. Medina		

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Pellet de biocarbón (LB-517-2017)	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	24,83

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receiptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.
 a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

Paola Cuji
Responsable de Calidad

Pablo Medina
Analista Técnico

Figura AVII.2. Informe del poder calórico del pellet de biocarbón