

DESARROLLO DE BRIQUETAS DE BORRA DE CAFÉ Y UN AGLOMERANTE A  
DIFERENTES COMPOSICIONES PORCENTUALES PARA SER UTILIZADAS  
COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO ALTERNATIVO

DIEGO ANDRÉS MURCIA PALACIOS  
ANDRÉS FELIPE GONZÁLEZ VERA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FALCULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.  
2020

DESARROLLO DE BRIQUETAS DE BORRA DE CAFÉ Y UN AGLOMERANTE A  
DIFERENTES COMPOSICIONES PORCENTUALES PARA SER UTILIZADAS  
COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO ALTERNATIVO

DIEGO ANDRÉS MURCIA PALACIOS  
ANDRÉS FELIPE GONZÁLEZ VERA

Proyecto integral de Grado para optar por el título de:  
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.  
2020

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

Ing. Alexander Jiménez Rodríguez

---

Ing. William Javier Espitia Abril

Bogotá D.C., Febrero 2020

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Vicerrector de Desarrollo y Recurso Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrado (E)

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa Ingeniería Química

Ing. Leonardo De Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## DEDICATORIA

*Este trabajo de grado va dedicado a las personas que siempre estuvieron presentes en cada paso que di para poder llegar hasta aquí, esas personas son mi familia. Mis padres, mi hermana, mi abuela y mi tío, son ellos los que me han acompañado en todo este proceso y de los cuales siempre he recibido la fuerza y el apoyo suficiente para salir adelante en los momentos que quise “botar la toalla”, ellos siempre estuvieron ahí. Quiero hacer una mención especial a mi hermana Luisa María, esta tesis va dedicada en su mayoría a ella, gracias a esa mujer me levantaba todos los días con el ánimo suficiente para seguir sin importar los obstáculos. Siempre será un placer tener la satisfacción de que se dio todo hasta el final y que seguirá siendo así por cada cosa que se me presente en la vida.*

*Diego Andrés Murcia Palacios.*

*Este trabajo quiero dedicarlo primero a Dios, por haberme iluminado cada día, ayudándome a ser mejor persona y poder terminar esta importante etapa de mi vida. A mis padres por ser el pilar fundamental de mi vida, hermano, abuela y familiares, que sin ellos no hubiera podido finalizar este logro, siempre me dieron sus palabras de aliento en los momentos más difíciles, siempre recibí el apoyo y la fuerzas que necesitaba y fueron el motor que me impulso para estar donde estoy el día de hoy. Para así poder compensar todos sus esfuerzos dándoles la satisfacción de verme crecer profesionalmente.*

*Andrés Felipe González Vera.*

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero empezar agradeciendo a una de las personas que tuvo más influencia en esta tesis, literalmente sin su ayuda hubiera sido imposible poder realizar este trabajo, esa persona es Ricardo Murcia, mi padre. Gracias papá por prestar tu conocimiento y tu tiempo para poder desarrollar gran parte de este proyecto, gracias por guiarme en el proceso de ser una buena persona y un buen estudiante, sin ti esto no sería posible y espero algún día poder devolverte todo lo que me has dado, estaré agradecido infinitamente.*

*Seguiré agradeciéndole a Flor Palacios, mi mamá y mi motor, gracias madre por estar pendiente de mí en cada momento, por levantarme, por secarme las lágrimas cuando quise “botar la toalla” y sobre todo gracias por amarme tanto a pesar del comportamiento que a veces tengo, fuiste esa persona incondicional, quiero que te sientas orgullosa de mi, esto también es por ti y no tengo dudas de que llegare muy lejos gracias a las enseñanzas que me diste.*

*Quiero también agradecerles a mis amigos de la universidad por apoyarme siempre y hacerme fuerte también en momentos en los que estaba muy desesperado, mención especial para Samuel Ortiz, una de las mejores personas que he conocido en mi vida y el cual me ayudó incondicionalmente en muchas cosas a lo largo de mi carrera.*

*Finalmente, quiero agradecerle a mi compañero de tesis, Andrés González, el cual a pesar de mi genio y de mis correcciones siempre tuvo una actitud de disposición para hacer las cosas, es una gran persona y no tengo duda de que su nobleza lo llevara bastante lejos en la vida. Rey si estás leyendo esto, gracias por todo, empezamos este camino y estamos a punto de terminarlo, te deseo éxitos en tu vida y mucha fuerza, aquí tendrás un amigo siempre.*

*Gracias Dios.*

*Diego Andrés Murcia Palacios.*

*Doy gracias a Dios por darme la oportunidad lograr mis sueños y siempre estar conmigo. A mis padres Fernando González y Ángela Vera por amarme y apoyarme de una manera incondicional, en mis buenos y malos momentos, gracias por mostrarme siempre el mejor camino para ser una mejor persona, por enseñarme todo lo que sé, y no tengo duda que todos mis logros serán por las enseñanzas y consejos de ustedes.*

*A mis compañeros de la universidad que me apoyaron durante el transcurso de este duro camino y que me ayudaron a ser mejor hasta en mis peores momentos.*

*Y, por último, quiero felicitar y agradecer a mi compañero de tesis, Diego Murcia y su padre porque sin él no hubiera sido posible este inmenso logro. Me enseñaste a ser mejor persona, que a pesar de mis malos ratos estuviste firme, tus enseñanzas son las que te van a llevar lejos en la vida. MI REY fue un placer poder acabar esto a tu lado, sabes que siempre podrás contar conmigo, buenos deseos en tu vida.*

*Andrés Felipe González Vera.*



## CONTENIDO

	pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>21</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>22</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>23</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>24</b>
1.1 <b>CAFÉ</b>	<b>24</b>
1.2 <b>RESIDUOS GENERADOS POR EL PROCESO DE CULTIVO E INDUSTRIALIZACIÓN DEL CAFÉ</b>	<b>25</b>
1.3 <b>BORRA DE CAFÉ</b>	<b>27</b>
1.3.1 Usos de la borra de café	28
1.4 <b>BRIQUETA</b>	<b>29</b>
1.4.1 <b>Características importantes de las briquetas</b>	<b>31</b>
1.4.1.1 <b>Forma de las briquetas</b>	<b>32</b>
1.4.1.2 <b>La combustión en una briqueta</b>	<b>32</b>
1.4.2 <b>Proceso de fabricación de la briqueta</b>	<b>32</b>
1.4.2.1 <b>Selección de los Materiales</b>	<b>32</b>
1.4.2.2 <b>Compactación de la Mezcla</b>	<b>33</b>
1.4.2.3 <b>Secado de los Bloques</b>	<b>33</b>
1.5 <b>COMBUSTIBLE</b>	<b>34</b>
1.5.1 <b>Tipos de combustibles naturales generadores de calor</b>	<b>35</b>
1.5.1.1 <b>Leña</b>	<b>36</b>
1.5.1.2 <b>Carbón vegetal</b>	<b>43</b>
1.5.1.3 <b>Pellets</b>	<b>40</b>
1.6 <b>AGLOMERANTES</b>	<b>41</b>
1.6.1 <b>Clasificación de los aglomerantes</b>	<b>41</b>
1.6.2 <b>Aglomerantes más comunes en la industria</b>	<b>42</b>
1.7 <b>DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA BRIQUETA</b>	<b>48</b>
1.7.1 <b>Resistencia mecánica o aplastamiento</b>	<b>48</b>
1.7.2 <b>Contenido de humedad</b>	<b>49</b>
1.7.3 <b>Poder Calorífico</b>	<b>49</b>
1.7.4 <b>Contenido de cenizas</b>	<b>50</b>
1.7.5 <b>Material Volátil</b>	<b>51</b>
1.7.6 <b>Carbono fijo</b>	<b>51</b>
1.7.7 <b>Cromatografía de gases</b>	<b>51</b>
<b>2. COMPOSICIÓN DE LAS BRIQUETAS DE BORRA DE CAFÉ</b>	<b>53</b>
2.1 <b>CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS</b>	<b>59</b>
2.1.1 <b>Humedad</b>	<b>59</b>
2.1.2 <b>Cenizas</b>	<b>61</b>

2.1.3	Material volátil	62
2.1.4	Poder calorífico	62
2.1.5	Carbono fijo	63
2.1.6	Densidad	64
2.2	<b>PROPIEDADES FÍSICAS: EXPERIMENTACIÓN CON LOS AGLOMERANTES</b>	65
2.2.1	Proceso de elaboración de las briquetas	66
2.2.1.1	Pesado de las materias primas	67
2.2.1.2	Mezclado de las materias primas	67
2.2.1.3	Compactación de la prensa	68
2.2.1.4	Secado de las briquetas de borra de café	69
2.2.2	Pre-experimentos briquetas de 100% borra de café	71
2.2.3	Briquetas elaboradas con papel: seco y mojado	72
2.2.4	Briquetas elaboradas con almidón de yuca	75
2.2.5	Briquetas elaboradas con aserrín de madera	77
2.3	<b>ELECCIÓN DEL AGLOMERANTE</b>	78
2.3.1	Criterio matriz de Pugh	79
2.3.2	Resultados de la matriz de Pugh	81
2.4	<b>DETERMINACIÓN DE LAS FORMULACIONES</b>	81
2.4.1	Diseño de experimentos	81
2.5	<b>ELABORACIÓN DE LAS BRIQUETAS DE BORRA DE CAFÉ Y UN AGLOMERANTE</b>	84
2.6	<b>BRIQUETAS ELABORADAS</b>	84
3.	<b>CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS BRIQUETAS DE BORRA DE CAFÉ ELABORADAS</b>	90
3.1	<b>HUMEDAD</b>	90
3.2	<b>CONTENIDO DE CENIZAS</b>	91
3.3	<b>MATERIAL VOLÁTIL</b>	92
3.4	<b>CARBONO FIJO</b>	93
3.5	<b>PODER CALORÍFICO</b>	95
3.6	<b>CROMATOGRAFÍA DE GASES</b>	98
3.6.1	Determinación de la cromatografía de gases	100
3.7	<b>GRADO DE REACTIVIDAD</b>	104
3.8	<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN</b>	104
3.9	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	105
4.	<b>COMPARACIÓN BIBLIOGRÁFICA CON OTROS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DE TIPO BIOMÁSICO</b>	107
4.1	<b>COMPARACIÓN DE LA BRIQUETA DE BORRA DE CAFÉ Y ALMIDÓN DE YUCA CON OTROS COMBUSTIBLES SÓLIDOS</b>	107
4.1.1	Comparación de la briqueta de borra de café con la leña y carbón vegetal	107
4.1.2	Comparación de la briqueta de borra de café con biocombustibles sólidos	108

<b>4.1.3 Emisión de gases como la leña y el carbón generan</b>	<b>110</b>
<b>4.1.4 Comparación con la norma técnica colombiana ntc 2060</b>	<b>111</b>
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>114</b>
<b>6. RECOMENDACIONES</b>	<b>115</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>116</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>122</b>

## LISTA DE TABLAS

	pág
<b>Tabla 1.</b> Análisis de borra de café utilizada como combustible.	28
<b>Tabla 2.</b> Propiedades caloríficas de la borra de café en distintos combustibles.	29
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de combustibles industriales.	35
<b>Tabla 4.</b> Clasificación de la biomasa según su producción y su consumo	37
<b>Tabla 5.</b> Normas de análisis y caracterización de maderas	38
<b>Tabla 6.</b> Matriz de selección tipo de aglomerante	53
<b>Tabla 7.</b> Cuatro briquetas.	55
<b>Tabla 8.</b> Resultado del análisis bromatológico de una briqueta de borra de café con almidón de yuca	58
<b>Tabla 9.</b> Contenido de humedad.	60
<b>Tabla 10.</b> Cenizas de cada materia prima.	61
<b>Tabla 11.</b> Determinación de materia volátil.	62
<b>Tabla 12.</b> Poder calorífico de cada materia prima.	63
<b>Tabla 13.</b> Carbono fijo de cada materia prima.	64
<b>Tabla 14.</b> Densidad de cada materia prima.	64
<b>Tabla 15.</b> Composiciones pre-experimentación.	65
<b>Tabla 16.</b> Experimento 1 papel húmedo.	73
<b>Tabla 17.</b> Experimento 2 papel húmedo.	73
<b>Tabla 18.</b> Experimento 3 papel húmedo.	73
<b>Tabla 19.</b> Experimento 4 papel seco.	74
<b>Tabla 20.</b> Experimento 5 papel seco.	74
<b>Tabla 21.</b> Experimento 1 almidón de yuca.	75
<b>Tabla 22.</b> Experimento 2, almidón de yuca.	76
<b>Tabla 23.</b> Experimento 1 aserrín de madera.	77
<b>Tabla 24.</b> Experimento 2 aserrín de madera.	77
<b>Tabla 25.</b> Matriz de Pugh para elección de aglomerante.	79
<b>Tabla 26.</b> Factores y variables de respuesta.	82
<b>Tabla 27.</b> Rango de composición para cada factor.	82
<b>Tabla 28.</b> Proporciones de cada uno de los experimentos a realizar.	84
<b>Tabla 29.</b> Porcentaje de humedad de las briquetas.	91
<b>Tabla 30.</b> Porcentaje de cenizas por briqueta.	92
<b>Tabla 31.</b> Material volátil de las briquetas	93
<b>Tabla 32.</b> Porcentaje de carbono fijo por briquetas.	95
<b>Tabla 33.</b> Poder calorífico de las briquetas.	96
<b>Tabla 34.</b> Análisis elemental para el café gastado (SPG) o borra de café.	99
<b>Tabla 35.</b> Análisis elemental para el almidón de yuca.	99
<b>Tabla 36.</b> Resultados cuantificación de compuestos de la muestra.	102
<b>Tabla 37.</b> Relación VM/FC grado de reactividad de las briquetas de borra de café.	104

<b>Tabla 38.</b> Resistencia a la compactación.	105
<b>Tabla 39.</b> Comparación de la briqueta de borra de café y almidón de yuca con la leña y el carbón vegetal.	108
<b>Tabla 40.</b> Características de combustión de algunos combustibles sólidos.	109
<b>Tabla 41.</b> Cuadro resumen de principales propiedades de los combustibles e biomasa.	110
<b>Tabla 42.</b> Comparación emisión de gases. BBG Y BBY	111
<b>Tabla 43.</b> Requisitos de las briquetas domesticas	112

## LISTA DE FIGURAS

	pág
<b>Figura 1.</b> Composición de la fruta de café	24
<b>Figura 2.</b> Proceso de la producción de café	27
<b>Figura 3.</b> Borra de café	27
<b>Figura 4.</b> Formas de briquetas	31
<b>Figura 5.</b> Croquis de una fábrica de briquetas	34
<b>Figura 6.</b> Tipos de aglutinantes	42
<b>Figura 7.</b> Yeso	43
<b>Figura 8.</b> Cal grasa	44
<b>Figura 9.</b> Cemento	45
<b>Figura 10.</b> Almidón de yuca	46
<b>Figura 11.</b> Aserrín de madera	48
<b>Figura 12.</b> PCI y PCS	50
<b>Figura 13.</b> Poder calorífico de las briquetas	56
<b>Figura 14.</b> Recopilación de resultados previos	57
<b>Figura 15.</b> Proceso de elaboración de las briquetas	66
<b>Figura 16.</b> Balanza analítica	67
<b>Figura 17.</b> Prensa hidráulica usada en la elaboración de las briquetas	68
<b>Figura 18.</b> Briqueta 100% borra de café	71
<b>Figura 19.</b> Briquetas: Experimentos 1, 2 y 3 Papel	74
<b>Figura 20.</b> Briqueta experimento 4 papel seco	75
<b>Figura 21.</b> Briqueta: Experimento 1 almidón de yuca	76
<b>Figura 22.</b> Briqueta elaborada con aserrín de madera como aglomerante	78
<b>Figura 23.</b> Briqueta 1	85
<b>Figura 24.</b> Briqueta 2	85
<b>Figura 25.</b> Briqueta 3	86
<b>Figura 26.</b> Briqueta 4	86
<b>Figura 27.</b> Briqueta 5	87
<b>Figura 28.</b> Briqueta 6	87
<b>Figura 29.</b> Briqueta 7	88
<b>Figura 30.</b> Briqueta 8	88
<b>Figura 31.</b> Briqueta 9	89
<b>Figura 32.</b> Briqueta 10	89
<b>Figura 33.</b> Espectro de masas para una inyección de gas de combustión analizado	101
<b>Figura 34.</b> Comportamiento poder calorífico y resistencia al aplastamiento	106
<b>Figura 36.</b> Diagrama de flujo para determinación del contenido de humedad	123
<b>Figura 37.</b> Diagrama de flujo para la determinación del contenido de cenizas	124
<b>Figura 38.</b> Determinación de la densidad por compactación	125
<b>Figura 39.</b> Determinación del contenido de materia volátil	126

## LISTA DE ECUACIONES

	pág
<b>Ecuación 1.</b> Determinación del contenido de humedad	60
<b>Ecuación 2.</b> Determinación del contenido de cenizas	61
<b>Ecuación 3.</b> Determinación del contenido de materia volátil	62
<b>Ecuación 4.</b> Carbono fijo	63
<b>Ecuación 5.</b> Determinación de la densidad.	64
<b>Ecuación 6.</b> Determinación del contenido de humedad.	91
<b>Ecuación 7.</b> Porcentaje de cenizas Totales.	92
<b>Ecuación 8.</b> Porcentaje de Materia Volátil	93
<b>Ecuación 9.</b> Determinación del contenido de Materia Volátil	94
<b>Ecuación 10.</b> Poder calorífico superior.	96

## LISTA DE ANEXOS

	pág
ANEXO A. Diagrama de flujo para determinacion del contenido de humedad de las materias primas.	123
ANEXO B. Norma Técnica Colombiana 2060	127



## ABREVIATURAS

- BBG** Briqueta borra de café y glicerol.
- BBY** Briqueta borra de café y almidón de yuca.
- C** Contenido de cenizas.
- CF** Carbono fijo.
- H** Contenido de humedad.
- HHV** Poder calorífico superior.
- HuR** Contenido de humedad relativa.
- LHV** Poder calorífico inferior.
- MTEP** Tonelada equivalente del petróleo.
- MV** Contenido de materia volátil.
- PCS** Poder calorífico superior.
- RB** Revisión bibliográfica.
- RSO** Residuo sólido orgánico.
- SPG** café gastado o borra de café.

## SÍMBOLOS

<b>%</b>	Porcentaje.
<b>%v/v</b>	Relación porcentual volumen-volumen.
<b>°C</b>	Grados Celsius.
<b>cm</b>	Centímetros.
<b>cm</b>	Centímetros.
<b>g</b>	Gramos.
<b>hPa</b>	Hectopascales.
<b>in</b>	Pulgada.
<b>kCal</b>	Kilocaloría.
<b>kg</b>	Kilogramo.
<b>kJ</b>	Kilo joule.
<b>kWh</b>	Kilovatio hora.
<b>m/z</b>	Relación masa carga.
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado.
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico.
<b>MJ</b>	Mega joule.
<b>ml</b>	Militros.
<b>Mpa</b>	Mega pascales.
<b>N</b>	Newton.
<b>t</b>	Tonelada.

## GLOSARIO

**AGLOMERANTES:** son aquellos materiales que tienen la capacidad de permitir la unión de dos o más materiales gracias a sus capacidades de aglomeración.<sup>1</sup>

**BORRA DE CAFÉ:** la borra de café es el residuo que queda, después de la torrefacción del grano de café y también de la preparación de la bebida.<sup>2</sup>

**BRIQUETA:** son cilindros de biomasa densificada de tamaño superior al del pellet, provenientes normalmente de aserrines y virutas de aserraderos, de hecho pueden ser formados de cualquier tipo de residuo natural, la denominación de briqueta se le da a la forma que obtienen las materias primas al compactarlas.<sup>3</sup>

**CAFÉ:** el café es una bebida de carácter universal que se consume en todos los países del mundo. Sin embargo, el café como grano, es una semilla que procede del árbol o arbusto del cafeto, una rubiácea que crece en climas cálidos y cuyo cultivo se extiende a tiempos relativamente próximos.<sup>4</sup>

**COMBUSTIBLE:** es toda sustancia que emite o desprende energía por combustión controlada (energía química) o escisión nuclear (energía nuclear) capaz de plasmar su contenido energético en trabajo. Es también cualquier sustancia capaz de arder en determinadas condiciones (necesitará un comburente y una energía de activación).<sup>5</sup>

**COMBUSTIÓN:** la combustión es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor, que se producen entre dos elementos: el combustible, que puede ser un sólido (Carbón, Madera, etc.), un líquido (Gasóleo, Fuel-Oil, etc.) o un gas (Natural, Propano, etc.) y el comburente, oxígeno.<sup>6</sup>

---

<sup>1</sup> Anónimo; Materiales aglomerantes; Escuela técnica superior de ingenieros en topografía, geodesia y cartografía, universidad politécnica de Madrid; consultado en 11 de marzo de 2019; p 32, [Consultado: 20 de marzo 2019], Disponible en: <https://www.topografia.upm.es/>

<sup>2</sup> ANGARITA FERNANDO Y AGUDELO RAFAEL. BORRA DE CAFÉ COMO MATERIAL ADSORBENTE PARA LA REMOCIÓN DE CROMO (III). [En línea] Proyecto de trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Ambiental. Universidad Libre Sede Bogotá. Bogotá: 2013. [Consultado: 20 de marzo 2019] Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11292/BORRA%20DE%20CAF%C3%89%20COMO%20MATERIA%20ADSORBENTE%20PARA%20LA%20REMOCI%C3%93N%20DE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

<sup>3</sup> Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Modulo opciones de uso final de la energía. Sub modulo productos intermedios o finales. Sección 1: Briquetas [en línea] 2014 pp.1-28 [Consulta: 14 de marzo 2019] Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-bp845s.pdf>

<sup>4</sup> PREEDY, Victor R. *The Coffee Plant and Beans: An Introduction*. [en línea] En: FARAH, A. and FERREIRA DOS SANTOS, Thiago eds. *Coffee in Health and Disease Prevention*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier Acad. Press, 2010. pp.7 [Consulta: 14 de febrero 2019] ISBN 0123744202 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780124095175/coffee-in-health-and-disease-prevention>

<sup>5</sup> ESPARZA, F. Combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. [en línea] 2012 [Consulta: 14 de febrero 2019] Disponible en: [http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros\\_documentos/combustibles.pdf](http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/combustibles.pdf)

<sup>6</sup> GARCIA, R. COMBUSTION Y COMBUSTIBLES. [en línea] 2001 [Consulta: 14 de febrero 2019] Disponible en: <https://www.coursehero.com/file/29730408/Combustion-y-combustiblespdf/>

**ENERGÍA RENOVABLE:** se obtiene de fuentes que son capaces de regenerarse por medios naturales y, por lo tanto, se consideran inagotables.<sup>7</sup>

**RESIDUOS AGRÍCOLAS:** son residuos lignocelulósicos que se pueden utilizar directamente como combustible o transformarse en bioetanol o biogás, mediante procesos de fermentación o en biodiesel, y son considerados energías renovables, dado que no se agotarán mientras puedan cultivarse los vegetales que los producen.<sup>8</sup>

---

<sup>7</sup> Federación nacional de cafeteros de Colombia; Avances técnicos cenicafe 393; Los subproductos del café: Fuente de energía renovable; Nelson Rodríguez valencia, diego Antonio Zambrano franco; Marzo de 2010; Fecha de consulta 10 de marzo de 2019; ISSN-0120-0178; disponible en: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/351/1/avt0393.pdf>

<sup>8</sup> HARGASSNER Especialista en biomasa. [Sitio Web] Astillas, un recurso para producir energía de biomasa. [Consulta: 14 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://www.hargassner.es/2015/11/20/astillas-un-recurso-para-producir-energia-de-biomasa/>

## RESUMEN

Se utilizó un residuo accesible en la producción de café como lo es la borra de café, esta fue implementada como materia prima en la elaboración de briquetas que son quemadas en una mufla para generar energía calorífica, siendo una alternativa de reemplazo a otros combustibles sólidos tradicionales (leña y carbón vegetal). Además se usó un aglomerante para la realización de la briqueta, debido a que no se contaba con una prensa capaz de generar la presión suficiente para aglomerar la borra de café por sí sola, gracias a una caracterización inicial de las materias primas, se pudo seleccionar el aglomerante adecuado para este caso, el aglomerante escogido fue el almidón de yuca, debido a las propiedades fisicoquímicas que se vieron evidenciadas a lo largo del proyecto. Se formularon las diferentes composiciones de las briquetas mediante un diseño de experimentos de mezclas, este determinó que se debían realizar diez briquetas de borra de café y almidón de yuca a diferentes composiciones porcentuales. Se elaboraron las diez briquetas y posteriormente se determinaron sus propiedades fisicoquímicas, en donde se evidenció que la briqueta número 2 y 1 generaron poderes caloríficos de 18.01 y 18.04 MJ/Kg, respectivamente siendo estas las briquetas con el mayor poder calorífico del estudio, sin embargo, se considera que la briqueta número dos es la mejor del estudio, debido a que cuenta con una estructura más sólida, que le permite ser considerada como la mejor alternativa para ser un biocombustible sólido originario de la borra de café.

**Palabras clave:** briquetas, biocombustible, borra de café, poder calorífico.

## INTRODUCCIÓN

Los seres vivos están siendo expuestos al humo que emiten los combustibles biomásicos como madera, ramas secas, pasto, estiércol y carbón<sup>9</sup>; los humos generados a partir del proceso de combustión se componen de dióxido de carbono, azufre, material particulado y obtención de cenizas<sup>10</sup>. Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP) en Colombia este problema ha tenido un enorme impacto en los últimos años, ocasionando 2,286 muertes y 1,2 millones de enfermedades en el 2015, en un informe presentado en el año 2017 se evidenció que el 17% de las muertes asociadas a la degradación ambiental se deben a la contaminación del aire<sup>11</sup>. Por otra parte, la principal fuente de energía de comunidades rurales son los bosques naturales, para esto es necesario realizar la tala de árboles y esto produce una alta presión sobre los ecosistemas forestales, para el año 2018 según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) las cifras de deforestación en Colombia aumentaron en un 23%<sup>12</sup>.

Las problemáticas mencionadas anteriormente, hacen referencia a que tan importante es buscar una solución, ya que de lo contrario se seguirá fomentando el impacto ambiental, primero el efecto invernadero por los gases que se están generando por la combustión de estos combustibles biomásicos, la calidad del aire y la deforestación; en el año 2019 se declaró alerta amarilla por contaminación en el aire en la ciudad de Bogotá D.C, por diferentes causas, como lo son los distintos contaminantes emitidos por transportes y/o empresas, por razones como la anterior, es importante tomar medidas en cuanto a contaminación del aire.

Existen distintas alternativas que puedan reemplazar al uso de la leña tradicional y al carbón mineral, una de estas es la que se está estudiando y evaluando la briqueta de borra de café. Por otro lado también se les han hecho estudios a briquetas a partir de otro tipo de residuos como la cascarilla de arroz, otras opciones que compiten con estos combustibles sólidos alternativos son las estufas de gas y eléctricas. Estas estufas son utilizadas en mayor proporción en las zonas urbanas, se han venido implementando por su gran aporte a nivel ambiental, ya que no emiten gases de efecto invernadero, o afectan a la salud de las personas y no es necesario la tala de árboles para su funcionamiento. La opción de la briqueta de borra de café se destaca gracias a la facilidad de obtención del residuo.

---

<sup>9</sup> Lopez, M., Mongligardi, N., & Checkley, N. (2014). Chronic obstructive pulmonary disease by biomass smoke exposure. Obtenido de national Library of Medicine: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24718533>

<sup>10</sup> S. Jiménez Científico Titular del CSIC. Laboratorio de investigación en tecnologías de la combustión and LITEC (CSIC-UZ). [yago@litec.csic.es](mailto:yago@litec.csic.es). Combustión de biomasa. [1]:

<sup>11</sup> ORTIZ, M. Cocinar con leña o carbón causa el 17% de muertes por calidad del aire. [Sitio web] En: EL TIEMPO. Bofota 26 de junio de 2017. [Consulta: 20 Febrero de 2019]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/cocinar-en-leña-o-carbon-causa-muertes-por-calidad-del-aire-103026>

<sup>12</sup> PAZ, A. La deforestación en Colombia aumento un 23%. [Sitio web] En: MONGABAY LATAM 15 de junio de 2018. [Consulta: 20 febrero de 2019]. Disponible en: <https://es.mongabay.com/2018/06/aumenta-la-deforestacion-en-colombia/>

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar briquetas de borra de café y un aglomerante a diferentes composiciones porcentuales para ser utilizadas como combustible sólido alternativo.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

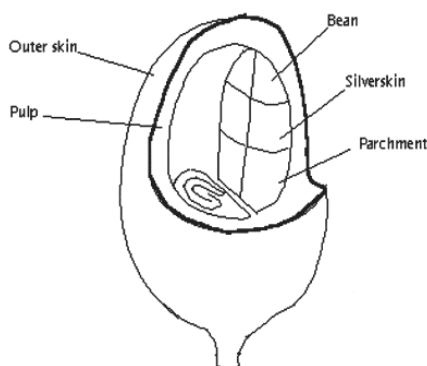
- Formular las diferentes composiciones porcentuales para las briquetas de borra de café – aglomerante mediante pruebas a nivel laboratorio.
- Elaborar las diferentes briquetas de la borra de café teniendo en cuenta las proporciones porcentuales de aglomerantes respectivas.
- Determinar propiedades fisicoquímicas de la briqueeta de borra de café a nivel laboratorio.
- Comparar las propiedades obtenidas de la briqueeta de borra de café con otros combustibles de tipo biomásico como leña y carbón vegetal.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 CAFÉ

El café es una bebida de carácter universal que se consume en todos los países del mundo. Sin embargo, el café como grano, es una semilla que procede del árbol o arbusto del cafeto (Figura 1), una rubiácea que crece en climas cálidos y cuyo cultivo se extiende a tiempos relativamente próximos<sup>13</sup>.

**Figura 1.** Composición de la fruta de café.



**Fuente:** SAENGER, M ., et al. Combustion of coffee husks. En: RENEWABLE ENERGY. vol. 23, no. 1, p. 103-121 [Consulta: 14 de febrero 2019] ISBN 0960-1481 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148100001063>

La composición como tal de la fruta del café se divide en ciertas capas: la piel, la pulpa, pergamino y la piel plateada (figura 1.), cuando se retiran esas capas se llega en realidad al grano como tal de café, el cual es distribuido a las diferentes comercializadoras para su posterior disposición.<sup>14</sup>

El café es uno de los productos básicos más comerciables en el mundo, las ventas están en alrededor de 70.000 millones de dólares al año y como producto comercial

<sup>13</sup> PREEDY, Victor R. *The Coffee Plant and Beans: An Introduction*. [en línea] En: FARAH, A. and FERREIRA DOS SANTOS, Thiago eds. *Coffee in Health and Disease Prevention*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier Acad. Press, 2010. pp.7 [Consulta: 14 de febrero 2019] ISBN 0123744202 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780124095175/coffee-in-health-and-disease-prevention>

<sup>14</sup> SAENGER, M ., et al. Combustion of coffee husks. En: RENEWABLE ENERGY. vol. 23, no. 1, p. 103-121 [Consulta: 14 de febrero 2019] ISBN 0960-1481. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148100001063>



supera al carbón, al trigo y al azúcar; siendo así el segundo producto comercial más importante del mundo, solo detrás del petróleo<sup>15</sup>. Es el principal producto agrícola de Colombia, y de él depende un porcentaje significativo de la economía y el sustento de gran parte de la población. Se produce en más de 50 países y proporciona un medio de vida a más de 25 millones de familias caficultoras en el mundo entero.<sup>16</sup>

## **1.2 RESIDUOS GENERADOS POR EL PROCESO DE CULTIVO E INDUSTRIALIZACIÓN DEL CAFÉ**

En el proceso de cultivo e industrialización del café, solamente se aprovecha el 5% del peso del fruto fresco en la preparación de la bebida, el 95% restante está representado por residuos orgánicos que presentan diferentes composiciones químicas. Los principales subproductos que se generan en el proceso de beneficio e industrialización del fruto de café y en los procesos de renovación del cultivo son: la pulpa, el mucílago, el cisco, las pasillas, la borra y los tallos de café.<sup>17</sup>

La pulpa de café se genera durante la etapa del despulpado del fruto y representa, en base húmeda, alrededor del 43,58% del peso del fruto fresco. Su producción media es de 2,25 toneladas frescas/ha-año y se constituye en el principal subproducto del proceso de beneficio. Para el aprovechamiento y valorización de la pulpa de café y evitar su impacto ambiental negativo, se ha investigado<sup>18</sup>:

- Su transformación en abono orgánico utilizando la lombricultura con el fin de obtener abono orgánico y biomasa para la alimentación animal.
- La producción de hongos comestibles de los géneros Pleurotus, Lentinula y Ganoderma los cuales son muy apreciados por su gran valor nutritivo y medicinal
- Los procesos de ensilaje para su almacenamiento y conservación.
- La obtención de pectinas y de biocombustibles.

---

<sup>15</sup> ALEGRÍA EZQUERRA, Eduardo. Cardiología. En: REVISTA ESPAÑOLA DE CARDIOLOGÍA. vol. 62, no. 1, p. 109 [Consulta: 20 de febrero 2019] ISBN 0300-8932 Disponible en: [www.clinicalkey.es](http://www.clinicalkey.es)

<sup>16</sup> *Ibíd.*, p. 109

<sup>17</sup> RODRÍGUEZ V. N.; ZAMBRANO F., D.A.; RAMÍREZ G., C.A. Manejo y disposición de los subproductos y de las aguas residuales del beneficio del café. In: Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. Chinchiná : FNC : CENICAFÉ, 2013. 3 vols [Consulta: 10 de marzo 2019] Disponible en: [https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos\\_cafe/manejo\\_de\\_subproductos/P1](https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos/P1)

<sup>18</sup> *Ibíd.*, p. 2

El mucílago de café se genera en la etapa del desmucilaginado, y en base húmeda representa alrededor del 14,85% del peso del fruto fresco. Su producción media es de 768 kg/ha-año. Se ha investigado su utilización en la alimentación animal, en la producción de pectinas y de biocombustibles (biogás, bioetanol).<sup>19</sup>

El endocarpio del fruto (cisco y película plateada), representa en peso el 4,2% del fruto fresco y tiene excelentes propiedades combustibles (capacidad calórica de 17,90 MJ/kg), por lo que se utiliza en el secado del grano de café. También se ha utilizado como sustrato en el cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus*.<sup>20</sup>

La borra es el principal residuo generado en las fábricas de café soluble y representa cerca del 10% del peso del fruto fresco. Se utiliza como sustrato en el cultivo de hongos comestibles y medicinales.<sup>21</sup>

Los tallos de café provenientes de la práctica de zoqueo se generan en una proporción cercana a 0,6 kg/kg de café cereza procesado. Son utilizados por los productores para la cocción de alimentos y en el secado del grano y también se utilizan como sustrato en el cultivo de hongos comestibles y medicinales.<sup>22</sup>

---

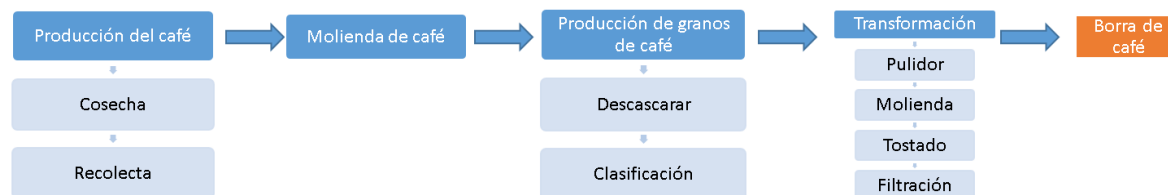
<sup>19</sup> *Ibid.*, p. 2

<sup>20</sup> *Ibid.*, p. 3

<sup>21</sup> *Ibid.*, p. 3

<sup>22</sup> *Ibid.*, p. 3

**Figura 2.** Proceso de la producción de café.



**Fuente:** elaboración propia, con base en Galanakis, C. M. (2017). Extraction and formulation of bioactive compounds. In A. Belščak-Cvitanović, & D. Komes (Eds.), *Handbook of coffee processing by products* (1st., pp. 106-107). US: Academic Press. Retrieved from <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-coffee-processing-by-products/galanakis/978-0-12-811290-8>

En la figura 2 se muestra el proceso de elaboración del café desde su cultivo hasta su industrialización, en cada etapa se generan los residuos mencionados anteriormente, en el caso de la borra de café, esta se genera en la última etapa la cual es la torrefacción del café, siendo así la forma industrial en la cual se obtiene borra de café.

### 1.3 BORRA DE CAFÉ

La borra de café es el residuo que queda después de la torrefacción del grano de café y también de la preparación de la bebida<sup>23</sup>. Cenicafé lo ha utilizado como componente del sustrato en el cultivo de hongos<sup>24</sup>.

**Figura 3.** Borra de café.



**Fuente:** PERIODICO EL TIEMPO. [Sitio web]. La borra de café tiene su encanto. [Consulta: 25 de marzo 2019]. Disponible en:

<sup>23</sup> ANGARITA FERNANDO Y AGUDELO RAFAEL. BORRA DE CAFÉ COMO MATERIAL ADSORBENTE PARA LA REMOCIÓN DE CROMO (III). [en línea] Proyecto de trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Ambiental. Universidad Libre Sede Bogotá. Bogotá: 2013. [Consulta: 20 de marzo 2019] Disponible en: <https://repository.unilivre.edu.co/bitstream/handle/10901/11292/BORRA%20DE%20CAF%C3%89%20COMO%20MATERIA%20L%20ADSORBENTE%20PARA%20LA%20REMOCION%20DE%20CROMO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

<sup>24</sup> Calle H. Subproductos del Café. Boletín Técnico N 6 Chinchina Colombia Cenicafé. (1977), 84. [https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos\\_cafe/manejo\\_de\\_subproductos/P1](https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos/P1)

<https://www.eltiempo.com/cultura/gente/usos-caseros-para-la-borra-del-cafe-121512>

A continuación, se presenta la tabla de composición de borra de café:

**Tabla 1.** Análisis de borra de café utilizada como combustible.

	%	Componente	%	Componente	%
Humedad	7-8	Acido tánico	0,90	Aminoácidos (%proteína)	
Proteína cruda	10-12	Acido palmítico	43,2	Alanina	6,2
Fibra cruda	35-44	Acido palmitoléico	0,40	Valina	9,0
Nitrógeno libre	13-18	Acido esteárico	9,70	Metionina	2,0
Ceniza	0,25-1,0	Acido oléico	14,0	Isoleucina	6,3
Calcio	0,08	Acido linoléico	37,0	Leucina	13,4
Magnesio	0,01	Acido arachídico	3,8	Tirosina	4,2
Potasio	0,04	Acido gadoléico	0,4	Fenilalanina	8,3
Sodio	0,03	Acido behénico	0,2	Lisina	2,9
Fósforo	0,01	Acidos grasos libres	7,6	Histidina	2,2
Manganeso	26,8ppm	Valordeyodo	85-93	Arginina	Trazas
Zinc	10,0ppm	No.De saponificación	185-193	Hidroxiprolina	1,0
Cobre	35ppm	Valordeperóxido	11-17	Glicina	7,6
Cloruros	(-)			Serina	1,9
Selenio	0,26 ppm			Acidoglutámico	18,6

**Fuente.** RODRÍGUEZ, N ,Cenicafé, Revista Cenicafe Vol 50. (1999). 205- 214. [Consulta: 20 de marzo 2019] Disponible en: [https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivos\\_cafe/manejo\\_de\\_subproductos/P1](https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivos_cafe/manejo_de_subproductos/P1)

**1.3.1 Usos de la borra de café.** Además de ser usado como sustrato en el cultivo de hongos comestibles y medicinales como se mencionó anteriormente, también es usado por algunas fábricas de café soluble como combustible directo, el proceso consiste es que después de las etapas de prensado y secado, la borra se utiliza como combustible en las calderas generadoras de vapor de agua, su valor calorífico está entre 24.91 MJ/kg (32) y 29.01 MJ/kg de borra seca.<sup>25</sup>

<sup>25</sup> MERO LOAIZA, RICARDO and MAMANI PARI, RENZO HENRY. OBTENCIÓN DE BIOGÁS COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE A PARTIR DE LOS SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ. En: REVISTA INVESTIGACIONES ALTOANDINAS - JOURNAL OF HIGH ANDEAN INVESTIGATION. Dec 27, .vol. 15, no. 2. ISSN 2306-8582 [Consulta: 20 de marzo 2019] Disponible en: <https://www.cenicafe.org/>

También es usado en la producción de biogás, biodiesel y bioetanol, debido a las propiedades calóricas que posee, a continuación, se presenta una tabla con datos calóricos de la borra de café según la forma en cuanto a combustible se refiere:

**Tabla 2.** Propiedades calóricas de la borra de café en distintos combustibles.

Subproducto	Poder calorífico	Producción	Referencia
Borra de café	✓ 29,01 MJ/Kg borra seca. Combustible sólido. ✓ 5,90 MJ/Kg borra seca. Combustible gaseoso (Biogás). ✓ 4,38 MJ/Kg borra seca. Combustible líquido (Bioetanol). ✓ 5,76 MJ/Kg borra seca. Combustible líquido (Biodiesel).	22,300 t/año	✓ Federacafé ✓ Adaptado de Kostenberg. ✓ Adaptado de Agudelo. ✓ Adaptado de Kondamudi.

**Fuente.** MERO LOAIZA, RICARDO and MAMANI PARI, RENZO HENRY. OBTENCIÓN DE BIOGÁS COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE A PARTIR DE LOS SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ. En: REVISTA INVESTIGACIONES ALTOANDINAS - JOURNAL OF HIGH ANDEAN INVESTIGATION. Dec 27., vol. 15, no. 2 .ISSN 2306-8582 [Consulta: 20 de marzo 2019] Disponible en: <https://www.cenicafe.org/>.

#### 1.4 BRIQUETA

Una briqueta es un biocombustible que es 100% ecológico y renovable y se le clasifica como biomasa sólida, esta puede estar generada a partir de diferentes materiales compactados, dichos materiales pueden ser biomasa forestal que provienen de los bosques o selvas, biomasa forestal proveniente de residuos de fábricas, biomasa residual urbana, carbón vegetal entre otras. La alta densidad en las briquetas es la característica más fundamental que poseen, su forma más

comúnmente vista es en cilindro; la aplicación que se les da es muy similar a la de la leña tradicional, por lo que pueden utilizarse en cualquier sitio.<sup>26</sup>

Su constitución compacta y uniforme hace que sean de fácil transporte y limpias a la hora de la limpieza, la combustión es constante no produce gran cantidad de humos, una producción de 1% de ceniza y tiene un rango de poder calorífico entre (17.000-19.000) KJ/Kg, el 2.21 Kg de briquetas sustituyen a un litro de gasoil, a continuación, se mencionaran ventajas tanto del producto como ambientales.<sup>27</sup>

#### Ventajas del producto

- Mayor poder calorífico que la leña
- Fácil y rápido encendido
- Baja humedad
- Alta densidad
- Ocupa menos espacio
- Homogéneas
- Fácil manipulación
- Sin olores, humos ni chispas
- Menor porcentaje de cenizas
- 100% ecológicas y naturales

#### Ventajas ambientales

- Energía limpia no contaminante
- Fuente renovable 100% reciclado
- Natural, no tóxico
- Sin conservantes, químicos ni aditivos
- Producen poco humo
- Sin malos olores
- Fabricados con restos forestales contribuyen a la limpieza del medio ambiente
- CO<sub>2</sub> neutro, lo que evita el efecto invernadero, cambio de clima y calentamiento global.<sup>28</sup>

Ya mencionado anteriormente, obtener un producto final de mayor densidad es lo que se requiere, al tener una mayor densidad el producto ocupara menos volumen al ser transportado. Los factores que influyen en la densidad de la briqueta son de dos tipos:

- La materia prima utilizada, a mayor es la densidad de la materia prima mayor será la densidad del producto final.

---

<sup>26</sup> Alexander Vera Velásquez; Diseño de briquetas ecológicas para la generación de energía calórica y mejoramiento de ecosistemas en el corregimiento de nabusimake, municipio de pueblo cesar; [en línea]; trabajo de grado para optar el título de ingeniero ambiental; Universidad nacional abierta y a distancia-UNAD; Publicado en Valledupar; 2014; [Consultado 25 marzo 2019]; Disponible en: <https://stadium.unad.edu.co/preview/UNAD.php?url=/bitstream/10596/6111/1/92694041.pdf> p 22

<sup>27</sup> Ibid., p. 23

<sup>28</sup> Ibid., p. 68

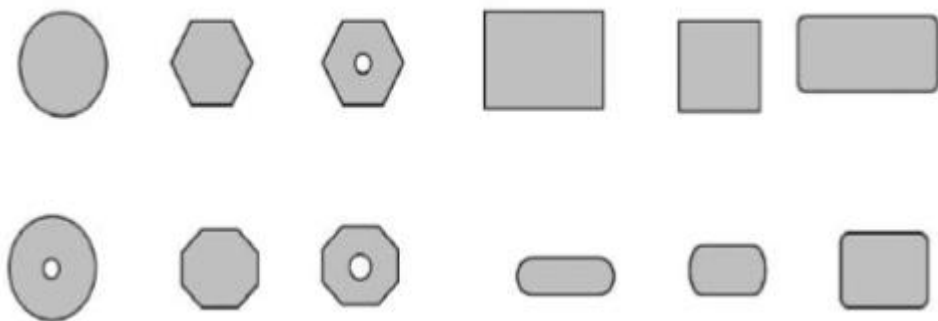
- La presión ejercida por la prensa en el proceso de fabricación, su buena manipulación y el correcto diseño. Las presiones de compactación dependen de la maquinaria a utilizar.

**1.4.1 Características importantes de las briquetas.** Para las briquetas es importante tener en cuenta la forma y proceso de elaboración, ya que son características que determinan las propiedades fisicoquímicas de la briketa, que a su vez afectan el proceso de combustión, humedad, método de compactación entre otras.

**1.4.1.1 Forma de las briquetas.** Existen varios tipos de briquetas: las briquetas rectangulares, las briquetas cilíndricas y las briquetas en forma de cilindro con un agujero en el centro; se van a analizar varios parámetros evidenciados en su proceso de fabricación y su forma, para concluir que las briquetas que ofrecen un mejor rendimiento son las briquetas en forma regular.<sup>29</sup>

Dentro de las formas de las briquetas se encuentran aquellas mostradas en la figura 4.

**Figura 4.** Formas de briquetas.



**Fuente:** ANALUISA, Darwin, HERNANDEZ, Edison, Construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal [En línea] Tesis Universitaria, Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, 2018. [Consultado 12 de agosto de 2019], Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9206>

Las briquetas rectangulares, por su forma son elaboradas a una presión mucho más elevada que las de forma redonda y también poseen más densidad, para que sean

<sup>29</sup> FRANCISCO Marcos Martín; Pélets y briquetas; Ecología; [Consulta: 10 de marzo de 2019] Disponible en: [http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo\\_2293\\_9990.pdf; 57](http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf; 57); p. 57

más duraderas la densidad de la materia debe ser mayor y por ende menos aire por centímetro cubico.<sup>30</sup>

La forma de las briquetas también afecta la combustión y la forma en la cual se da el almacenamiento de las mismas.

**1.4.1.2 La combustión en una briketa.** La forma afecta en la combustión de la briketa en la medida del oxígeno disponible alrededor de la misma, por esta razón la elaboración de briquetas con distintas formas influye en aspectos como que la briketa se queme más rápido o lento y que su tiempo de encendido sea menor o mayor.

La combustión de la briketa rectangular es más lenta porque el oxígeno disponible alrededor de una briketa de forma rectangular es menor, al tener un tiempo de combustión lento se aprovecha toda la energía calorífica que esta posee, por otro lado, las briquetas cilíndricas, por su método de elaboración, no están muy bien compactadas y pese a esto tienen un menor peso, más aire y se queman más rápidamente.<sup>31</sup>

**1.4.1.3 Almacenamiento.** A pesar de que las briquetas rectangulares tengan mejor rendimiento, otra ventaja de estas es que tenga un óptimo almacenamiento, su forma permite que sean ubicadas de una manera organizada en un pallet, así previniendo espacios vacíos y aprovechando al máximo su espacio. Las briquetas redondas aun si están bien organizadas tienen espacios vacíos que hace que aumente el volumen de almacenamiento.<sup>32</sup>

**1.4.2 Proceso de fabricación de la briketa.** Para la elaboración de las briquetas es necesario tener en cuenta la selección de los materiales para así poder seguir el proceso de fabricación.

**1.4.2.1 Selección de los Materiales.** La elección de los materiales tiene como fin contribuir a la preservación de los recursos naturales, y también tener un aprovechamiento de los residuos agrícolas. Se analizaron varios compuestos y se evidenciaron cuales contaron con el mayor poder calorífico:

- Cascarilla o cisco de café registra una capacidad calórica de 18,7 MJ/Kg.
- Bagazo de caño presenta una capacidad calórica de 17,9 MJ/Kg
- Cascarilla de arroz posee un poder calórico de 13,8MJ/Kg
- Aserrín con una capacidad calórica de 13,4 MJ/Kg

---

<sup>30</sup> Ib id., p. 57

<sup>31</sup> MARCOS Eduardo García alam; Diseño de proceso y de planta piloto para fabricación de briquetas de aserrín; [en línea]; Tesis para optar el título de ingeniero industrial y de sistemas; Universidad de piura; Piura; Enero 2014; [Consultado en 10 de marzo de 2019]; Disponible en: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1829/ING\\_535.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1829/ING_535.pdf?sequence=1&isAllowed=y); p.28

<sup>32</sup> Inid., p.20



Además de esto, se realizaron pruebas de ignición y duración de consumo de cada uno de los compuestos que tenían un peso aproximado de 150 g, estos fueron prendidos y arrojaron estos datos:

- Cascarrilla de café prendió de una manera inmediata y obtuvo un tiempo de duración de 5 minutos con 25 segundos.
- Cascarrilla de arroz se tardó 25 segundos para prender, pero registro una duración en tiempo de consumo de 4 minutos con 43 segundos.
- Bagazo de caña se encendió de manera inmediata pero su consumió en tiempo fue de 3 minutos y 17 segundos.<sup>33</sup>

Luego de seleccionar los materiales y determinar su proporción para las briquetas experimentales, estos son molidos para que la granulometría sea homogénea, posteriormente se mezclan de acuerdo a las proporciones y/o porcentajes ya establecidos, luego se continúa a adicionar el aglomerante natural hasta así obtener una masa homogénea y pastosa.<sup>34</sup>

**1.4.2.2 Compactación de la Mezcla.** Para ese paso de compactación se puede hacer de dos maneras, la primera es manualmente ejerciendo presión sobre la mezcla sin utilizar prensas, una persona común realiza una fuerza de 1.0 a 1.7 KPa, la segunda es por medio de prensas, pero según lo investigado el uso de esta no genera que el aglomerante compacte bien con la mezcla, esto genera briquetas sin resistencia a la ruptura y obviamente es necesario considerar los costos de adquisición de una prensa ya que son elevados. Se dice que, entre menor tamaño en las briquetas fabricadas, estas tienen un potencial productivo mucho mejor, ya que la concentración de energía calórica es mayor debido a la mejor compactación de la mezcla.<sup>35</sup>

**1.4.2.3 Secado de los Bloques.** Para esta última etapa se utiliza una marquesina que funciona como un secador solar, en este equipo se aprovecha las condiciones climáticas, la precipitación al año y la altura de la zona donde se llevara a cabo; para este proceso se recomienda utilizar el secado mecánico, ya que este optimiza la deshidratación en cuanto al tiempo de duración y el volumen productivo.<sup>36</sup>

---

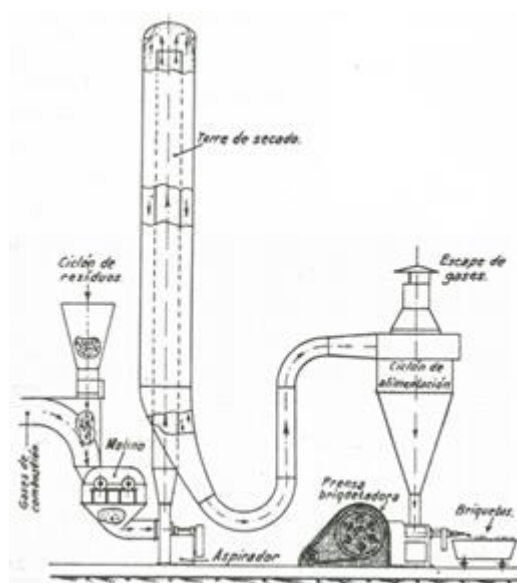
<sup>33</sup> Ibid., p. 28

<sup>34</sup> Ibid., p. 36

<sup>35</sup> Ibid., p. 39

<sup>36</sup> Ibid., p. 49

**Figura 5.** Croquis de una fábrica de briquetas.



**Fuente:** VELÉZ, Ricardo; Fabricación de briquetas; consultado en 11 de marzo de 2019; disponible en: [http://infomadera.net/uploads/articulos/arc\\_hivo\\_89\\_16075.pdf](http://infomadera.net/uploads/articulos/arc_hivo_89_16075.pdf)

En la figura 5 se muestra el croquis de lo que es una fábrica de briquetas, y se muestran las etapas del proceso como mezclado de los residuos, la molienda, el secado y lo que es la parte de prensado para así generar el producto final en este caso la briqueta.

## 1.5 COMBUSTIBLE

Es toda sustancia que emite o desprende energía por combustión controlada (energía química) o escisión nuclear (energía nuclear) capaz de plasmar su contenido energético en trabajo. Es también cualquier sustancia capaz de arder en determinadas condiciones (necesitará un comburente y una energía de activación).<sup>37</sup>

<sup>37</sup> ESPARZA, F. Combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. [en línea] 2012 [Consulta: 14 de febrero 2019] Disponible en: [http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros\\_documentos/combustibles.pdf](http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/combustibles.pdf)

**Tabla 3.** Clasificación de combustibles industriales.

Sólidos	Naturales	Maderas y Residuos Vegetales	
		Carbón	Turbas
			Lignitos
			Hullas
	Antracita		
Artificiales	Coques (carbón y Petróleo)		
	Aglomerados y Briquetas		
	Carbón Vegetal		
Líquidos	Alcoholes	Naturales (Fermentación e Hidrólisis)	
		Artificiales	
	Residuales	Lejías Negras	
	Derivados del petróleo	Gasóleos	
Fuelóleos			
Gaseosos	Residuales	Fuel-Gas	
	Gas Natural	Diferentes Familias	
	Gases Licuados del Petróleo (GLP)	Propanos y Butanos	
	Artificiales o Elaborados	Gas de Alto Horno	
		Gas de Coque	
		Gas Pobre	
		Gas de Agua	
Biogás	Gas Ciudad		

**Fuente:** elaboración propia, con base en GARCIA, R. COMBUSTION Y COMBUSTIBLES. [En línea] 2001 [Consulta: 14 de febrero 2019] Disponible en: <https://www.coursehero.com/file/29730408/Combustion-y-combustiblespdf/>

**1.5.1 Tipos de combustibles naturales generadores de calor.** Los combustibles sólidos más importantes son los que están basados por materiales lignocelulósicos que provienen ya sea del sector agrícola, forestal o también residuos que se producen las industrias. Algunas materias como paja, leña, las cortezas son empleadas en la elaboración de biocombustibles sólidos de origen agrario. Otro tipo de combustibles sólidos lo establece el carbón vegetal que surge de un tratamiento térmico de la biomasa leñosa en atmosferas de un contenido bajo de oxígeno. En el proceso de combustión de las biomosas se genera energía que esta es empleada directamente como energía térmica o también transforma para ser utilizada como energía eléctrica.<sup>38</sup>

<sup>38</sup> ROMERO, Arturo; Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles; [en línea]; Departamento de ingeniería química; Universidad complutene de

En general los combustibles sólidos cuando son quemados producen cenizas, y la combustión puede ser con una llama ardiente, este proceso depende de:

- Contenido húmedo del sólido
- Conductibilidad calorífica
- Aptitud y temperatura de ignición
- Grado de combustión
- Velocidad de propagación
- Carga termina<sup>39</sup>

La celulosa es el combustible que más se ha evidenciado a lo largo de la historia, este es uno de los principales componentes de la madera, papel e infinidad de tejido, su punto de ignición es 230°C. La temperatura de ignición de la madera y sus derivados dependen de:

- Densidad
- Características físicas
- Humedad
- Velocidad y duración del calentamiento
- Naturaleza del foco de calor
- Suministro y velocidad del aire<sup>40</sup>

Dentro de los tipos de combustibles naturales se encuentran:

**1.5.1.1 Leña.** Parte de los árboles y plantas que son cortadas y hechas trozos, se emplean como combustible.<sup>41</sup> La leña se obtiene directamente de la naturaleza y es considerada como una fuente de energía primaria, a la leña se le considera como la fuente más antigua de calor implementada por el hombre, lo que quizás se debe al hecho de que es mucho más accesible que otros tipos de combustibles, esto con el fin de que hoy en día se siga implementando en hogares primitivos con métodos tradicionales.<sup>42</sup>

---

Madrid; 2010;[Consultado 30 de septiembre de 2019]; Disponible en:  
<http://www.rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>

<sup>39</sup> Félix Esparza, Combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, [En línea], Bomberos de Navarra Nafarroako Suhiltzaileak, Consultado en: 15 de oct. de 19, Disponible en:  
[http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros\\_documentos/combustibles.pdf](http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/combustibles.pdf)

<sup>40</sup> Félix Esparza, Combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, [En línea], Bomberos de Navarra Nafarroako Suhiltzaileak, Consultado en: 15 de oct. de 19, Disponible en:  
[http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros\\_documentos/combustibles.pdf](http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/combustibles.pdf)

<sup>41</sup> Real Academia Española [sitio web] Diccionario de la lengua Española. Definición de leña. [Consulta: 14 de marzo 2019] Disponible en: <https://dle.rae.es/?id=N8RDtwC>

<sup>42</sup> MEJIA, Fabiola; Implicaciones del uso de la leña como combustible doméstico en la zona rural de Usme. [En línea]. Trabajo de grado para optar al título de magister en medio ambiente y desarrollo. Universidad Nacional De Colombia. Colombia 2011. Consultado en: 18 de sept. de 19. Disponibilidad en:  
<http://www.bdigital.unal.edu.co/4125/1/905057.2011.pdf>

El consumo de la leña está establecido por unas variables técnicas, económicas, ecosistémicas, sociales y culturales. Estudios realizados estiman que el consumo de leña a nivel mundial es de 1400 MTEP/año, contribuyendo así el 13% de la energía primaria mundial, y para los países no industrializados se considera alrededor del 30%. Se evidencia un problema tecnológico con la implementación de la leña, ya que su transformación, la eficiencia en el uso de la biomasa en países que están en el proceso de desarrollo es menor al 15%, en cambio los países ya desarrollados, las tecnologías ya disponibles permiten un beneficio de hasta el 80% de su potencial energético. Los sistemas energéticos basados en biomasa usan la madera, los residuos de madera y de procesos agrícolas como fuentes de generación de energía. Existen problemas que se evidencian por la baja densidad energética, pero se pueden evitar desarrollando procesos de densificación de la madera, como lo es en la fabricación de pellets y briquetas. La biomasa tiene como característica ser un combustible que posee una baja densidad energética, esto se debe a su densidad aparente, que en ocasiones es inferior a la del carbón al igual que su poder calorífico.<sup>43</sup>

**Tabla 4.** Clasificación de la biomasa según su producción y su consumo

RELATIVO A LA PRODUCCIÓN (OFERTA)	GRUPOS COMUNES	RELACIONADOS CON LOS USUARIOS (DEMANDA)
Combustibles de madera directos	Combustibles de madera	Sólidos: leña (madera en bruto, astillas, aserrín, pellets), carbón vegetal.
Combustibles de maderas indirectos		Líquidos: licor negro, metanol y aceite pirolítico.
Combustibles derivados de la madera		Gases: Productos procedentes de la gasificación y gases de la pirólisis de los combustibles mencionados.
Cultivos usados como combustibles	Agrocombustibles	Sólidos: paja, tallos, cáscaras, bagazo y carbón vegetal de los combustibles.
Subproductos agrícolas		Líquidos: Etanol, aceite vegetal en bruto, aceite "diester", metanol y aceite pirolítico procedente de agro combustibles sólidos.
Subproductos de origen animal		Gases: Biogás, gases procedentes de la producción de pirólisis de agro combustibles sólidos.
Subproductos agroindustriales		Sólidos: Residuos sólidos de origen municipal.
Subproductos de origen municipal	Subproductos de origen municipal	Líquidos: fango de aguas residuales, aceite pirolítico o residuos de origen municipal.
		Gas: procedente de vertedero y de fangos de aguas residuales.

**Fuente:** MEJIA, Fabiola, Implicaciones del uso de la leña como combustible doméstico en la zona rural de Usme. [En línea]. Trabajo de grado para optar al título de magister en medio ambiente y desarrollo. Universidad Nacional De Colombia. Colombia 2011. Consultado en: 18 de sept. De 19. Disponibilidad en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4125/1/905057.2011.pdf>

El proceso de combustión más conocido es el de la combustión directa de la leña y actualmente se obtiene casi la totalidad de la energía de este recurso, que se

<sup>43</sup> Ibid., p. 28

desarrolla a un rango de temperaturas entre 800 y 1000°C, implementando el aire como agente oxidante. Dicho proceso genera calor y productos de la combustión CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> y cenizas.<sup>44</sup>

La combustión en general se efectúa en dos etapas, ya que el combustible relaciona dos constituyentes combustibles: la materia volátil, que esta es una mezcla de alquitranes que se vaporizan mientras la temperatura aumenta, la combustión de estos produce pequeños chisporroteos en la llama. Lo que queda después es el material pirolizado que es sólido, junto con la materia inerte; este material pirolizado es más que todo carbón, el cual al ser quemado genera CO<sub>2</sub> y lo que es la materia inorgánica forma cenizas. Tres cuartas partes de la madera se sustituyen en los volátiles, se tienen que tener en cuenta los análisis de las propiedades y caracterización de las biomásas, que se presentan en la tabla 36.<sup>45</sup>

**Tabla 5.** Normas de análisis y caracterización de maderas

CARACTERÍSTICA	NORMAS APLICABLES		
Contenido de humedad	EN-14774	DIN 51718	ASTM E871
Contenido de volátiles	CEN EN15148	DIN 51720	ASTM E872
Contenido de ceniza	CEN EN14775	DIN 51719	ASTM D1102 – ASTM E1534 para combustibles particulados a partir de madera.
Análisis próximo		DIN 51700	
Análisis elemental	CEN/TS 15104		ASTM D5373 (para carbones)
Poder calorífico	CEN EN 14918	DIN 51900	ASTM D5865 (para carbones y coque)
Densidad a granel	CEN EN 15103		ASTM E873

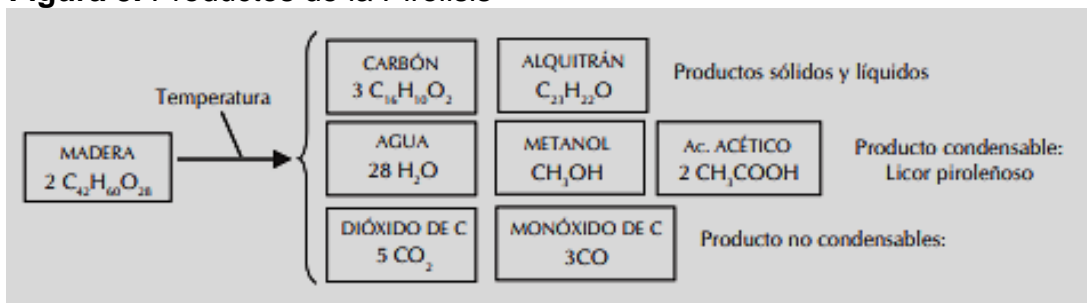
**Fuente:** MEJIA, Fabiola, Implicaciones del uso de la leña como combustible doméstico en la zona rural de Usme. [En línea]. Trabajo de grado para optar al título de magister en medio ambiente y desarrollo. Universidad Nacional De Colombia. Colombia 2011. Consultado en: 18 de sept. de 19. Disponibilidad en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4125/1/905057.2011.pdf>

**1.5.1.2 Carbón Vegetal.** El carbón vegetal es un combustible generado a partir de la combustión anaerobia de la madera, sin presencia de oxígeno, es decir solo la madera expuesta a altas temperaturas durante un tiempo determinado. Esta reacción de carbonización es llamada pirolisis y los productos obtenidos a partir de esta son los que se observan en la figura 5.

<sup>44</sup> *Ibíd.*, p. 28

<sup>45</sup> *Ibíd.*, p. 28

**Figura 5.** Productos de la Pirolysis



**Fuente:** DIAZ, Melina; El carbón vegetal: alternativa de energía y productos químicos; [en línea]; Xilema; 2010; [Consultado 30 de septiembre de 2019]; Disponible en: <https://es.scribd.com/document/376550274/El-Carbon-Vegetal-Alternativa-de-ENERGIA>

Como se había mencionado anteriormente el carbón vegetal procede de un tratamiento térmico de la biomasa leñosa en atmosferas con un contenido bajo de oxígeno. Este al ser producto de una alteración termoquímica de la biomasa primaria, se estima como biocombustible de naturaleza secundaria; el proceso de combustión lenta y parcial de la biomasa leñosa se da con un cierto contenido en humedad a una temperatura variable entre 250 y 600°C. El poder calorífico del producto generado varía entre 6000 y 8000 kcal/Kg, y esto depende del contenido en cenizas de la madera.<sup>46</sup>

El carbón vegetal es inerte, bajo condiciones atmosféricas normales este no presenta cambios significativos y no es afectado por agentes biológicos como, hongos e insectos que puedan atacar la madera. Esta materia posee características considerables, como la generación de humo a cantidades mínimas y un alto poder calorífico. Este es un producto sólido, frágil y poroso con un alto contenido de carbono.<sup>47</sup>

Para obtener un mayor rendimiento del carbón vegetal es mejor trabajar a bajas temperaturas, el dicho producto tendría una calidad mínima, esto puede deberse a que este es corrosivo por contener alquitranes ácidos que no se queman con una llama limpia sin humo. Para que el carbón vegetal sea de buena calidad este debe contener carbono fijo, carbono puro, aproximadamente del 75%; para el proceso de carbonización es recomendado trabajar a temperaturas de 500°C. Una de las características del carbón vegetal que lo hace quebradizo y que tienda a desmenuzarse es la friabilidad, esta se aumenta con el crecimiento de la

<sup>46</sup> Salvador, A. R. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat.(Esp)*, 104, 331-345.

<sup>47</sup> AMILCAR, Sergio; Rendimiento y calidad del carbón vegetal elaborado en horno tipo fosa con subproductos forestales de *Piscidia piscipula*(L.) Sarg. Y *Lonchocarpus castilloi* Standl. En Campeche; [En línea]; Título para obtener el grado de maestría en ciencias forestales; Universidad Autónoma De Nuevo León; Linares, Nuevo León; Marzo, 2013; Consultado en: 25 de septiembre de 2019; Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/3221/1/1080256611.pdf>.

temperatura de carbonización, donde el contenido de carbono fijo aumenta y por el contrario el contenido de las sustancias volátiles disminuye.<sup>48</sup>

Existen cuatro usos en los que se implementa el carbón vegetal:

- En sólido: Puede ser implementado como combustible para gasógenos, usos domésticos ya sea cocinas o parrilladas y en restaurantes.
- En polvo: Se usa como aditivo o como pigmento, muy utilizado en las industrias alimentarias.
- En aglomerado: Es bien manejado como briquetas o pellets, se dispone para uso energético, se puede aglomerar el polvo de carbón en diferentes formas aprovechando alguna sustancia pegajosa o aglomerante.

Cabe aclarar que el uso de carbón vegetal como combustible relativamente limpio, este puede ir en aumento en algunos países ya desarrollados, más que todo en el África urbana, sin embargo, puede implicar otros tipos de riesgos para la salud, así como consecuencias forestales.<sup>49</sup> En estos países desarrollados se implementan grandes cantidades para la producción de cobre y zinc, así como en la industria de los metales preciosos. El carbón vegetal como combustible sólido evidencia un alto poder calorífico con base a la biomasa de la cual fue obtenido, esto quiero decir que durante la pirolisis se desperdicia una importante cantidad de energía contenida en la biomasa que es implementada.<sup>50</sup>

**1.5.1.3 Pellets.** Los pellets son un producto totalmente natural, catalogado como biomasa sólida, el cual está formado por cilindros muy pequeños, de unos pocos milímetros de diámetro. Elaborados a partir de serrín natural seco, sin ningún aditivo, ya que se utiliza la propia lignina que contiene el serrín como aglomerante, comprimiendo el serrín a una alta presión para formar el pellet, lo que hace que los pellets tengan una composición muy densa y dura. Consiguiendo con ello un poder calorífico de aproximadamente 17.99MJ/Kg<sup>51</sup>. Se considera un buen pellet aquel que posee menos de 10% de humedad y una durabilidad mecánica mayor del 97,5%. Se evidencia un poder calorífico aproximado a 4.300 Kcal/Kg, una de sus principales características es la degradación para algunos porcentajes de humedad,

---

<sup>48</sup> DIAZ, Melina; El carbón vegetal: alternativa de energía y productos químicos; [en línea]; Xilema; 2010; [Consultado 30 de septiembre de 2019]; Disponible en: <https://es.scribd.com/document/376550274/El-Carbon-Vegetal-Alternativa-de-ENERGIA>

<sup>49</sup> AMILCAR, Op. Cit., p. 18

<sup>50</sup> AMILCAR, Op. Cit., p. 22

<sup>51</sup> TIENDA BIOMASA. [Sitio web] Que son los Pellets. [Consulta: 14 de marzo 2019]. Disponible en: <https://tiendabiomasa.com/pellet>



y por esta razón deben estar almacenados en lugares impermeables en donde no se evidencie condensaciones.<sup>52</sup>

**1.5.1.4 Astillas.** Las astillas de madera son pedazos pequeños alrededor de 5 y 100 mm de longitud, su calidad se relaciona de la materia prima de la que esta provenga y según estos factores se dividen en dos grupos:

- Astillas de clase 1: Proviene de las industrias de la primera y segunda transformación de la madera forestal, estas poseen humedades menores al 30%, pero su máximo valor ha sido de 45%.
- Astillas de clase 2: Se generan a través del tratamiento silvícolas, agrícolas. Su humedad de hasta un 45%, implementada en instalaciones de media y muy baja potencia. <sup>53</sup>

## 1.6 AGLOMERANTES

Los aglomerantes son elementos que se utilizan para unir o compactar compuestos, mediante reacciones químicas que se dan con agua y aire. Las propiedades de estos son de adherirse y moldearse juntos con otros materiales, para protegerlos endurecerlos y así alcanzar resistencias mecánicas, se necesita saber el contenido energético de cada material posee en su fabricación. Entre los aglomerantes se encuentran todos los materiales que, mediante procesos físicos de secado, evaporación de un disolvente, produce un endurecimiento que aglutina a los elementos y une cohesionando a los mismos, pero su composición química permanece inalterable.<sup>54</sup>

**1.6.1 Clasificación de los aglomerantes.** Los aglomerantes se pueden clasificar dependiendo de su naturaleza, procedencia, polímeros o su combustión. A continuación, en la figura 6 se muestra la clasificación de los aglomerantes:

---

<sup>52</sup> Fuente: III plan energético de Navarra horizonte 2020, Combustibles de biomasa tipos y características, febrero 2015, Consultado en: 15 de oct. de 19, [En línea], Disponible en: <https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/45C7C274-B3F4-4C91-B8B9-23259B8F5B39/0/201501Combustiblesdebiomasa.pdf>

<sup>53</sup> HARGASSNER Especialista en biomasa. [Sitio Web] Astillas, un recurso para producir energía de biomasa. [Consulta: 14 de marzo de 2019] Disponible en: <https://www.hargassner.es/2015/11/20/astillas-un-recurso-para-producir-energia-de-biomasa/>

<sup>54</sup> Anónimo; Materiales aglomerantes; Escuela técnica superior de ingenieros en topografía, geodesia y cartografía; [ en línea] Universidad politécnica de Madrid; [consultado en 11 de marzo de 2019]; disponible en: <https://studylib.es/doc/5593519/tema-3-materiales-aglomerantes---universidad-polit%C3%A9cnica-...>; p 3

**Figura 6.**Tipos de aglutinantes

POLÍMEROS	DE ACUERDO A SU ORIGEN.	DE ACUERDO A SU COMBUSTIÓN.
<b>Naturales</b> Almidón de maíz; gelatina; goma acacia; goma de tragacanto; y ácido alginico, etc.	<b>Orgánicos</b> Alquitrán, estiércol animal, manteca, aguas servidas, residuales o barro, gelatina, papel, restos y residuos de pescado, algas y almidones.	<b>Combustibles</b> Albuminatos, alcoholes, almidones, alquitranes, azúcares, breas, caseína, cola, etc.
<b>Sintéticos</b> El polivinilpirrolidona PVP, la metilcelulosa, Etilcelulosa, alcohol polivinílico, etc.	<b>Inorgánicos</b> Limo, arcilla, barro, cemento, cal, etc.	<b>No combustibles</b> Borrato de sodio, cal y cal hidratada, cemento, cloruro de magnesio, escayola, silicato de sodio, sílice, yeso. etc
<b>Azúcares</b> La glucosa (dextrosa), sucrosa y sorbitlo.		

**Fuente:** ANALUISA, Darwin, HERNÁNDEZ, Edison; Diseño y construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal [En línea] Tesis Universitaria, Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, 2018. [Consultado 12 de agosto de 2019], Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9206>

Por otra parte, los aglomerantes también se pueden clasificar según su endurecimiento:

- **Aglomerantes aéreos:** fraguan y endurecen solamente en aire, dando mezclas resistentes al agua, sin adquirir cohesión y dureza en medio húmedo.
- **Aglomerantes hidráulicos:** fraguan y endurecen en el aire y también en ambiente húmedo o con agua y también bajo el agua, tienen más resistencia mecánica pero menos capacidad de adherencia que los aéreos.

### 1.6.2 Aglomerantes más comunes en la industria.

- **Yeso:** Su material esencial es el sulfato cálcico hemihidratado, obtenido por deshidratación parcial de la roca natural llamada yeso natural, que fragua y así endurece por hidratación al recuperar el agua que perdió en la cocción, como adherente es poco utilizado por su baja resistencia tanto a acciones mecánicas como químicas, además su tiempo de fraguado es muy rápido.<sup>55</sup>

<sup>55</sup> Ibíd., p. 4

### Propiedades:

- Tiene un fraguado y un endurecimiento muy rápido, retrasándose con retardadores.
- Poca adherencia con piedra y madera.
- Oxida al hierro y al acero, sobre todo con humedad.
- Buen aislamiento del sonido y del fuego.

**Figura 7.** Yeso.



**Fuente:** ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA; Materiales aglomerantes; [en línea] Universidad politécnica de Madrid; [consultado en 11 de marzo de 2019]; disponible en: <https://studylib.es/doc/5593519/tema-3-materiales-aglomerantes---universidad-polit%C3%A9cnica-...>; p 4

- **Cal grasa:** pertenece a la clasificación de las cales aéreas donde se encuentran también las magras y fuertes, las cales grasas se caracterizan por tener de 95 a 100% de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ . Producto resultante de la calcinación y descomposición de las rocas calizas, calentándolas a temperaturas superiores a  $900^\circ\text{C}$ , es el elemento endurecedor de los morteros y cementos.<sup>56</sup>

### Propiedades

- Permeable al aire e impermeable al agua
- Finura del molido
- Velocidad de fraguado

---

<sup>56</sup> *Ibíd.*, p. 11

- Adherencia
- Aislante térmico y acústico

**Figura 8.** Cal grasa.



**Fuente:** ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA; Materiales aglomerantes; [en línea] Universidad politécnica de Madrid; [consultado en 11 de marzo de 2019]; disponible en: <https://studylib.es/doc/5593519/tema-3-materiales-aglomerantes---universidad-polit%C3%A9cnica-...>; p 4

- **Cal hidráulica:** Cocción de una roca caliza con un contenido entre un 8 y un 20% de arcillas da lugar a la cal hidráulica natural. Esta cal se caracteriza por su capacidad para fraguar en ambientes aéreos, así como en lugares con escasez de CO<sub>2</sub>, esta propiedad se le conoce como hidraulicidad.
- **Cemento:** es un aglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con agua, el producto final de la molienda de estas rocas llamado Clinker y se convierte en cemento cuando se le agrega yeso para que adquiera la propiedad de fraguar al añadirle agua y endurecerse posteriormente.<sup>57</sup>

### Propiedades

- Tiene un fraguado rápido y endurecimiento más lento.
- Buena adherencia con otros materiales como piedra, acero y cerámica.
- Resiste bien la humedad, puede emplearse en interiores y exteriores.
- Es muy resistente.
- Tiene una expansión al mezclarse con agua y posterior retracción.

---

<sup>57</sup> Ibíd., p. 16

**Figura 9. Cemento.**



**Fuente:** ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA; Materiales aglomerantes; [en línea] Universidad politécnica de Madrid; [consultado en 11 de marzo de 2019]; disponible en: <https://studylib.es/doc/5593519/tema-3-materiales-aglomerantes---universidad-polit%C3%A9cnica-...>; p 16

- **Papel bond:** es un papel que es elaborado 100% con fibras de eucalipto blanqueadas y cuenta con unas excelentes propiedades como, una gran resistencia superficie y composición. Se encuentra de distintos colores, pero normalmente es blanco, suele tener un gramaje entre los 60 y 115 gr/m<sup>2</sup> esto es lo que lo hace más resistente que los folios normales y corrientes. Es un papel que se recicla con el mismo proceso para cualquier producto derivado de la celulosa y el cartón, aunque su finalidad es distinta a la de otros papeles reciclados.<sup>58</sup>
- **Almidón de yuca:** el alto contenido de almidón de yuca y su mayor proporción de amilosa, en comparación con otras fuentes de almidón hace de este un importante cultivo industrial además de ser un cultivo alimenticio rico en calorías. El almidón está constituido por unidades de glucosa que se organizan en dos componentes: amilosa y amilopectina, estas macromoléculas se caracterizan por su grado de polimerización o ramificación lo cual afecta su comportamiento frente a los procesos de degradación. Las características funcionales de los almidones son:
  - Solubilidad.
  - Capacidad de retención de agua.
  - Poder de hinchamiento.
  - Tendencia a retrogradar.

---

<sup>58</sup> SMURFIT KAPPA.; [Sitio Web]; Papel Bond Form; [Consultado: 7 de marzo de 2019]; Disponible en: <https://www.smurfitkappa.com/es/products-and-services/paper-and-board/bond-form-paper>

- Propiedades de la pasta (viscosidad, consistencia, estabilidad del gel, claridad y resistencia al corte).
- Digestibilidad enzimática.
- Capacidad de emulsificante.

El almidón de yuca a diferencia de otros almidones es más fácil de cocinar y requiere menor consumo de energía durante su cocción, además tiene una tendencia baja a la retrogradación y produce un gel de mayor claridad y estabilidad. Su comportamiento lo hace conveniente como sustratos para procesos hidrolíticos pero inapropiado como sustituto para los almidones de cereales en procesos que requieran retrogradación<sup>59</sup>.

**Figura 10.** Almidón de yuca



**Fuente:** ARISTIZABAL, Johanna, Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca; Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación; [en línea]; Boletín de servicios agrícolas de la FAO 163; [consultado en 15 de marzo de 2019]; p. 39; disponibilidad en: <http://www.fao.org/3/a1028s/a1028s.pdf>; ISSN 1020-4334

- **Aserrín de madera:** según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el aserrín es el producto de todas las operaciones mecánicas de elaboración de la madera, especialmente de los aserraderos. Es un conjunto de partículas que se desprenden de la madera cuando se sierra. La madera se asierra por corte o desgarrado de sus fibras. Mediante la acción continua de una serie de dientes uniformemente separados e inclinados en dos direcciones, uno a continuación de otro, destinados a moverse en planos de trabajos paralelos y bastante juntos. La acción de los dientes

<sup>59</sup> JOHANNA Aristizabal; Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca; Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación; [en línea]; Boletín de servicios agrícolas de la FAO 163; [consultado en 15 de marzo de 2019]; p. 39; disponibilidad en: <http://www.fao.org/3/a1028s/a1028s.pdf>; ISSN 1020-4334

cortantes, produce un canal de anchura uniforme en toda la pieza, en lo que se desgarren 8 y extraen los trozos de fibra o aserrín. Este residuo puede llegar a representar hasta el 15 % de la producción total de madera procesada.

El aserrín es uno de los residuos forestales de mayor impacto ambiental que existe como agente contaminante del suelo y el agua. En la actualidad, a nivel de provincia, es utilizado en su mayoría para la fabricación de ladrillos, constituyéndose en un contaminante más de la atmósfera. No obstante, aún se pueden apreciar cómo se acumulan en los patios de los aserríos o son vertidos en los alrededores de las comunidades rurales, produciendo problemas ambientales, ya que a nivel del suelo la degradación natural de los residuos de la industria maderera es casi nula. Este residuo en la intemperie genera acumulación de polvo en el aire que es perjudicial para la salud.

### **Usos del aserrín de madera en la industria:**

- Combustible para calderas de vapor o calentar secadores
- Para la producción de carbón activado
- Para pirolisis y gasificación
- Como ayuda para procesos de filtración de líquidos y limpieza de suelo
- Para fabricación de ladrillos, briquetas, pellets, tableros aglomerados.<sup>60</sup>

En fabricación de briquetas, como aglutinante en briquetas de materiales orgánicos, siendo uno de los mejores almidones. Es usado principalmente para carbón vegetal o cascarilla de arroz, se usa por mostrar muy buenas propiedades de cohesión para este tipo de material, y además de bajo costo respecto a otros aglutinantes. La cantidad adecuada de adición de esta sustancia bordea desde el 4 al 20 % basado en el tipo de materia orgánica, siendo ideal para biomasa entre 4 al 8 %.<sup>61</sup>

---

<sup>60</sup> ORDOÑEZ Rivera Omar Fernando; evaluación de la influencia de la formulación de combustibles sólidos densificados de aserrín de pino blanco (*pinus pseudostrobus* lindl), reciclado de carbón activado y almidón de yuca (*manihot esculenta*), sobre las propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas de los combustibles sólidos densificados en general; [en línea]; Para optar el título de ingeniero químico; Universidad de San Carlos de Guatemala; Guatemala; 2015; [consultado en 20 de marzo de 2019]; disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3697/1/Omar%20Fernando%20Ord%C3%B3%C3%B1ez%20Rivera.pdf>; p 8

<sup>61</sup> *Ibíd.*, p. 27

**Figura 11.** Aserrín de madera



**Fuente:** ORDOÑEZ, Omar; evaluación de la influencia de la formulación de combustibles sólidos densificados de aserrín de pino blanco (*pinus pseudostrobus lindl*), reciclado de carbón activado y almidón de yuca (*manihot esculenta*), sobre las propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas de los combustibles sólidos densificados en general; [en línea]; Para optar el título de ingeniero químico; Universidad de San Carlos de Guatemala; Guatemala; 2015; [consultado en 20 de marzo de 2019]; disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3697/1/Omar%20Fernando%20Ord%C3%B3n%20Rivera.pdf>; p. 7

## **1.7 DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA BRIQUETA**

Para definir los criterios que van a hacer parte de la caracterización de la briqueta es importante establecer los mismos, por lo cual se basa en la Norma Técnica Colombiana NTC 2060<sup>62</sup>, la cual establece algunas pruebas fisicoquímicas para la caracterización de briquetas y así establecer su uso doméstico o en su defecto su uso como combustible para pequeñas calderas y procesos industriales en donde intervengan las mismas. Las propiedades son: Contenido de humedad, contenido de cenizas, contenido de materia volátil y resistencia mecánica.

Otra propiedad que no está incluida en la NTC 2060<sup>63</sup>, pero que es crucial para la evaluación de las briquetas de borra de café, es el poder calorífico de las mismas, debido a su condición como combustible sólido es importante cuantificar este valor para concluir la eficiencia del combustible.

**1.7.1 Resistencia mecánica o aplastamiento.** Los combustibles sólidos de este tipo como lo son las briquetas, son propensos a sufrir daños físicos como

---

<sup>62</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Briquetas combustibles para uso doméstico. NTC 2060. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 1998. 9p

<sup>63</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Briquetas combustibles para uso doméstico. NTC 2060. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 1998. 9p



quebraduras o desmoronamientos debido a caídas, transporte o incluso al aplastamiento, por eso es necesario realizar un estudio para determinar la capacidad máxima de fuerza que podrían resistir estas briquetas, además de condiciones de operación como temperatura, presión y una altura adecuada para el apilamiento de las mismas.<sup>64</sup>

Esta es una prueba física importante debido a que se basa en la capacidad de resistencia que tiene la briketa de borra de café a la fuerza que se le puede realizar, también es importante resaltar que el propósito principal del uso de un aglomerante en este es el de darle a la briketa propiedades físicas que permitieran solidificar el conjunto de materias primas, es por esto que es una propiedad importante de medir.

**1.7.2 Contenido de humedad.** El contenido de humedad es uno de los parámetros más importantes que influyen de manera indirectamente proporcional a la eficiencia de la briketa, ya que si un producto contiene un contenido de humedad alto se necesita generar más energía para realizar el proceso de combustión, y por ende afecta al poder calorífico. Este problema se debe controlar hasta que se llegue a un rango adecuado que debe estar entre 15-20%.<sup>65</sup>

**1.7.3 Poder Calorífico.** Es la cantidad de calor que entrega un kilogramo, o un metro cubico, de un combustible o de un material susceptible a descomponerse térmicamente al oxidarse en forma completa.<sup>66</sup>  
Sus unidades son: kcal/kg, kcal/m<sup>3</sup>, BTU/lb, BTU/pie<sup>3</sup>.

El poder calorífico es una de las propiedades más importantes a la hora de medir la eficiencia de un combustible sólido, esta depende de los compuestos que conforman la briketa. El compuesto más importante es la borra de café que como se ha mencionado anteriormente se caracteriza por tener un poder calorífico alto y pues es esta la propiedad que se quiere resaltar dentro de la briketa.

• **Poder Calorífico Superior (PCS).** El poder calorífico superior se define suponiendo que todos los elementos de la combustión (combustible y aire) son tomados a 0°C y los productos (gases de combustión) son llevados también a 0°C

---

<sup>64</sup> ANALUISA Darwin; Diseño y construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal; [en línea]; trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de ingeniero mecánico; Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; Riobamba-Ecuador; 2018; [Consultado 10 de agosto de 2019]; disponible en: <http://201.218.5.85/bitstream/123456789/9206/1/15T00682.pdf>; p. 8

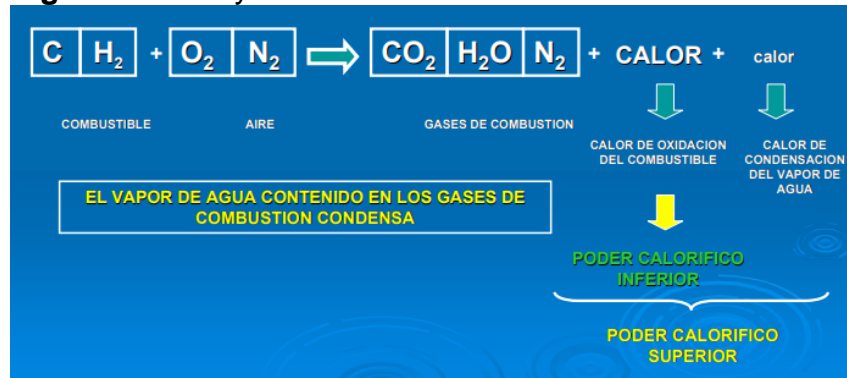
<sup>65</sup> *Ibíd.*, p. 8

<sup>66</sup> FELIX Jorge; Catedra Maquinas Térmicas: Captulo 1 Poder Calorifico; [En línea]; Universidad tecnológica nacional facultad regional Mendoza; [Consultado 15 de agosto de 2019]; disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas\\_termicas/01-poder\\_calorifico.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf)

después de la combustión, por lo que el vapor de agua se encontrará totalmente condensado.<sup>67</sup>

- **Poder Calorífico Inferior (PCI).** El poder calorífico inferior considera que el vapor de agua contenido en los gases de la combustión no condensa. Por lo tanto, no hay aporte adicional de calor por condensación del vapor de agua. Solo se dispondrá del calor de oxidación del combustible, lo cual por definición se denomina: Poder Calorífico Inferior del Combustible.<sup>68</sup>

**Figura 12.** PCI y PCS



**Fuente:** FERNÁNDEZ, Jorge, Catedra Maquinas Térmicas: Captulo 1 Poder Calorifico. [En línea], [Consultado el 12 de agosto de 2019], Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas\\_termicas/01-poder\\_calorifico.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf)

**1.7.4 Contenido de cenizas.** Con base a las briquetas, el contenido de cenizas se le conoce como el porcentaje en masa de cenizas luego de que se efectuó la cocción completa de la briqueta. Uno de los residuos que posee un contenido de cenizas alto es la cascara de arroz<sup>69</sup>, esta tiene hasta un 25% de cenizas, esto se debe a que posee un contenido de sílice alto<sup>70</sup>. El resto de los residuos de biomasa tienen un bajo contenido.<sup>71</sup>

En el procedimiento para determinar el contenido de ceniza, se lleva una muestra a un proceso de incineración a  $525 \text{ °C} \pm 25 \text{ °C}$ , esta propiedad tiene una relación de manera indirectamente proporcional a lo que es la viabilidad de la briqueta.

<sup>67</sup> *Ibíd.*, p. 3

<sup>68</sup> *Ibíd.*, p. 4

<sup>69</sup> ANALUISA, *Opc. Cit.*, p. 9

<sup>70</sup> ANALUISA, *Opc. Cit.*, p. 9

<sup>71</sup> ANALUISA, *Opc. Cit.*, p. 10

Esta característica es importante a la hora de cuantificar los residuos que deje la combustión de este tipo de materiales, es importante resaltar que un bajo contenido de cenizas sería una característica ideal a la hora de considerar las materias primas para la construcción de las briquetas, para el procedimiento y cálculo de las cenizas.

**1.7.5 Material Volátil.** Cada uno de los componentes del carbón que se liberan al calentarlo a alta temperatura en ausencia de oxígeno, exceptuando el agua superficial y el agua higroscópica.<sup>72</sup>

El material volátil toma un papel importante en el proceso de caracterización, ya que de este dependen otras propiedades como el carbono fijo y la capacidad calorífica. También es importante a la hora de medir que tan contaminante puede llegar a ser el producto, ya que al obtener este dato se obtiene la cantidad de material de carbono que se desprende a la hora de generarse la combustión.

Este es un método para determinar el contenido de materia volátil total, se basaba en un proceso de exposición de la materia a temperaturas por encima de los 900 °C ± 25°C durante 7 minutos, luego de esto se realizaba el respectivo pesaje para poder determinar el material volátil de las muestras. Esta propiedad es indirectamente proporcional a que la briqueta obtenga una mejor eficiencia.

**1.7.6 Carbono fijo.** Es la parte que no es volátil y se quema en estado sólido. Es la diferencia entre la suma de del contenido de humedad residual, contenido de ceniza y contenido de material volátil y 100.

**1.7.7 Cromatografía de gases.** Es una técnica analítica e instrumental que tiene como objetivo separar y analizar los componentes de una mezcla, en este caso de un gas.<sup>73</sup> Con el fin de cualificar los gases que emite la combustión de la briqueta de borra de café esta es una de las pruebas más importantes realizadas en el trabajo, el desarrollo de nuevas tecnologías y avances que tengan como una de sus principales funciones mitigar el impacto ambiental, entonces esta prueba determina una característica importante a la hora de medir la viabilidad del desarrollo de la briqueta a nivel comercial, siendo el ámbito doméstico uno de los sectores del comercio en el cual se quiere o se podría aplicar esta combustible sólidos en el futuro.

---

<sup>72</sup> VASQUEZ, Erika; Metodología para la cartectiracion para com busyibles solidos maderables del área metropolitana del Valle de Aburra” AMVA”, Colombia; [en línea]; 2006; Vol 59, No 2. p. 3557-3564; [Consultado 13 de Julio de 2019]; Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v59n2/a11v59n2.pdf>

<sup>73</sup> GUTIÉRREZ BOUZÁN, M., & DROGUET, M. (2002). La cromatografía de gases y la espectometría de masas: identificación de compuestos causantes de mal olor. Boletín Intexter [En línea]; 2002; núm. 122, p. 35-41. [Consulta: 1 de noviembre de 2019] Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099/2733>

**1.7.8 Grado de reactividad.** La relación VM / FC aumenta el grado de reactividad de la biomasa. Cuanto mayor sea este factor, más fácil será el encendido y cuanto más bajo sea el tiempo para que se dé la combustión será mayor, por ende, este también es un indicativo de las propiedades caloríficas que puede tener la briqueta de borra de café.<sup>74</sup>

**1.7.8 Densidad.** Es una propiedad importante de la materia y por esta razón es importante medirla, todo material tiene densidad, esta característica física influye sobre el peso que tendrá la briqueta dependiendo de las materias primas analizadas, por eso es importante su obtención.

---

<sup>74</sup> GARCIA, R., PIZARRO, C., LAVIN, A. G., & BUENO, J. L. Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. Fuel [En línea]; 2014; pp. 1139-1147 [Consulta: 10 de octubre 2019] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113007771>

## 2. COMPOSICIÓN DE LAS BRIQUETAS DE BORRA DE CAFÉ

Para la elaboración de las formulaciones de las briquetas de borra de café, es necesario el conocimiento de algunas características de las materias primas (borra de café, aglomerante y agua) consideradas influyentes dentro de las capacidades finales de la briqueta, por ende es pertinente evaluar propiedades como: el contenido de humedad, contenido de cenizas, contenido de materia volátil, carbono fijo, densidad por compactación y el poder calorífico, esta última como una propiedad determinante ya que se está desarrollando un combustible como alternativa.

Inicialmente es importante la elección del aglomerante que va a ser parte de la composición de la briqueta, para esto se elaboró una selección inicial mediante una matriz de Pugh, la cual es una herramienta cuantitativa que permite comparar opciones entre sí mediante un arreglo multidimensional, también se denomina como una matriz de decisiones.<sup>75</sup> Como se puede observar en la tabla 4 se incluyen los diferentes tipos de aglomerantes existentes y se hace una selección del mejor tipo para la elaboración de la briqueta de borra de café.

**Tabla 6.** Matriz de selección tipo de aglomerante

	(1-10)	Orgánicos	Inorgánicos	Sintéticos	Azúcares
<b>Criterios</b>	Peso	Importancia			
Usados en briquetas	10	+	-	-	-
Combustible	10	+	+	-	-
Fácil obtención	8	+	+	-	-
Costos	10	+	+	-	-
Positivos	+	38	28	0	0
Negativos	-	0	-10	-38	-38
<b>Resultados</b>		38	18	-38	-38

**Fuente:** elaboración propia.

<sup>75</sup> CERVONE, Frank; Managing digital libraries: the view from 30,000 feet, applied digital library project management Using Pugh matrix analysis in complex decision-making situations; [en línea]; 2009; [consultado 20 de septiembre de 2019]; Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/1206/c49198d48319947a7f140199bb951c375c07.pdf>

En la tabla 6 se observan los diferentes criterios elegidos para la realización de la briqueta, estos fueron seleccionados debido a la importancia que tienen a la hora de la elaboración y posterior caracterización del biocombustible sólido. El primer criterio corresponde a los aglomerantes usados en briquetas, este es importante debido a que existen cuatro tipos de clasificación para aglomerantes, pero no todos son usados en la realización de briquetas. El segundo criterio, al tratarse de un biocombustible, tiene como objetivo evaluar que cada una de las materias primas que conformen la briqueta realice el proceso de combustión, de lo contrario no podrá ser considerado como combustible. El tercer criterio se basa en que tan accesibles pueden llegar a ser los aglomerantes; al tratarse de un proyecto que busca el aprovechamiento de recursos, el uso de aglomerantes de fácil obtención es considerada una opción con mayores beneficios. Por último el cuarto criterio, aunque todos los aglomerantes tienen un costo ya sea mayor o menor, en pro de la viabilidad de la elaboración de la briqueta de borra de café, aquellos aglomerantes con menor costo serán tenidos en cuenta en mayores proporciones para el desarrollo de la briqueta.

La matriz concluye que los aglomerantes de tipo orgánico, son los más adecuados para ser parte de la briqueta, sin embargo; dentro de este grupo existen aglomerantes que por sus distintas propiedades han sido más usados, y por esto se realizó una revisión bibliográfica para poder identificar cuáles son las mejores opciones como aglomerantes para briquetas.

Se encontraron estudios como (Fonseca Cuenca Edison Geovanny, 2011)<sup>76</sup>, en donde se realizaron dos briquetas: en una implementando aserrín con cola blanca y en la otra se usó almidón de yuca como aglomerante con cascarilla de arroz; en la tabla 7 se compararon los resultados de distintas pruebas fisicoquímicas de las dos briquetas y estos fueron los datos:

---

<sup>76</sup> *Ibíd.*, p. 85

**Tabla 7.** Comparación de propiedades

Parámetro	MUESTRA (base húmeda)	
	C (aserrín)	A (cascarilla)
C-Carbono (%)	58.99	39.07
H-Hidrógeno (%)	5.60	4.45
O-Oxígeno (%)	25.64	28.88
N-Nitrógeno (%)	0.13	0.55
S-Azufre (%)	<0.03	<0.03
W-Humedad (%)	9.1	7.8
A-Cenizas (%)	0.51	19.22
PCSBS (MJ/Kg)	28.41	16.91
PCIBS (MJ/Kg)	25.62	15.85
PCIBH (MJ/Kg)	24.016	15.49

**Fuente:** FONSECA, Édison; Desarrollo de un Proceso Tecnológico para la Obtención de Briquetas de Aserrín de Madera y Cascarilla de Arroz, y Pruebas de Producción de Gas Pobre; [en línea]; Tesis de grado para optar el título de ingeniero mecánico; Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; Riobamba-Ecuador; 2011; [Consultado 1 de septiembre de 2019]; disponible en: [file:///C:/Users/K555L/Downloads/15T00495%20\(5\).pdf](file:///C:/Users/K555L/Downloads/15T00495%20(5).pdf)

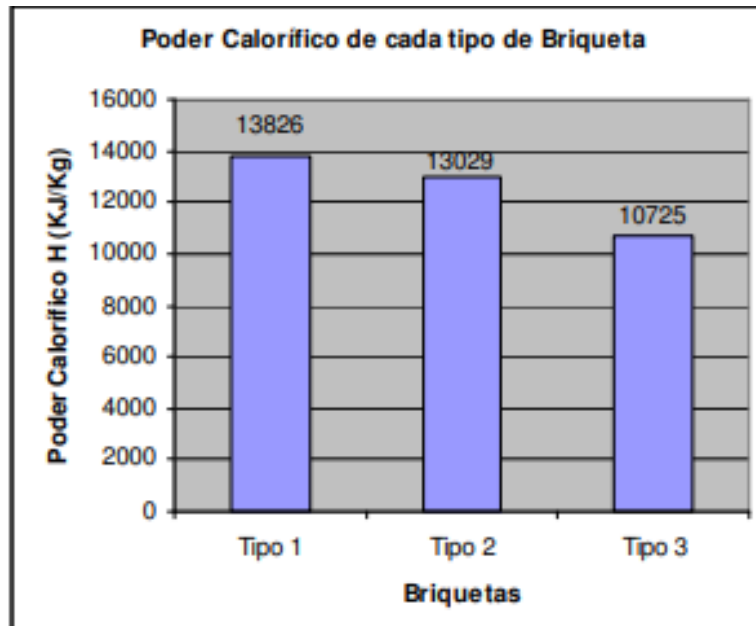
Acerca de los aglomerantes implementados, el almidón de yuca presenta excelentes características, este brinda propiedades fisicoquímicas importantes como alta viscosidad y alto poder calorífico, de acuerdo a esto se tuvieron en cuenta los poderes caloríficos como referencia para poder seleccionar la mejor opción. Los poderes caloríficos de las briquetas fueron de 28,4 MJ/Kg para las de aserrín, y de 16,9 MJ/Kg para las de almidón de yuca.<sup>77</sup>

En otro estudio, según (Valderrama, 2007), se realizaron tres tipos de briquetas, la primera con (Residuos sólidos orgánicos (RSO) 70%, estiércol de cuy 20% y aserrín 10%), la segunda con (RSO 70%, estiércol de cuy 20%, cal 5% y aserrín 5%) y la tercera con (RSO 70%, estiércol de cuy 20% y arcilla 10%); en este proyecto se evidencia que el aserrín posee un poder calorífico alto con respecto a los demás

<sup>77</sup> *Ibíd.*, p. 1

componentes, de un valor de 13400 KJ/Kg. Comparando el poder calorífico de los tres tipos de briqueta, se concluyó que el de tipo uno, con mayor cantidad de aserrín, tiene un poder calorífico de 13,826 KJ/Kg, los otros dos tipos de briquetas tienen un poder calorífico de 13.029 KJ/Kg y 10.725 KJ/Kg respectivamente.<sup>78</sup> Se destaca la fácil obtención del aserrín de madera ya que este es un residuo del proceso de la madera, en la figura 13 se pueden observar los datos correspondientes.

**Figura 13.** Poder calorífico de las briquetas



**Fuente:** VALDERRAMA Andres; Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica en cocinas no convencionales; [en línea]; Centro de desarrollo e investigación en termofluidos CEDIT; [consultado 6 de septiembre de 2019]; disponible en:

[http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/Publicaciones/rev\\_cedit/2007\\_V02/pdf/a04v2.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/Publicaciones/rev_cedit/2007_V02/pdf/a04v2.pdf); p. 33.

En la universidad de Ecuador (Mireya, 2017) se planteó la elaboración de briquetas mediante desechos como tallos de rosas y papel reciclado; esto, con el fin de sustituir el uso de madera y del carbón vegetal. Para la obtención de las briquetas se formularon concentraciones de papel reciclado de 10%, 20%, 30% y almidón de yuca de 10%; la briqueta elaborada a partir de 30% de papel reciclado se clasificó

<sup>78</sup> VALDERRAMA Andres; Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica en cocinas no convencionales; [en línea]; Centro de desarrollo e investigación en termofluidos CEDIT; [consultado 6 de septiembre de 2019]; disponible en: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/Publicaciones/rev\\_cedit/2007\\_V02/pdf/a04v2.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/Publicaciones/rev_cedit/2007_V02/pdf/a04v2.pdf); p. 33.



como un biocombustible sólido de alta calidad energética, obtuvo un contenido de cenizas de 13,02% y un poder calorífico superior de 5922,33 cal/g, asimismo presentó excelentes propiedades físicas, como lo es la resistencia al aplastamiento con un valor de 160 N de fuerza aplicada a la briqueta; de acuerdo con los datos evidenciados en la figura 14, la briqueta cumplió con los rangos permitidos por el lineamiento de la norma técnica colombiana NTC 2060.<sup>79</sup>

**Figura 14.** Recopilación de resultados previos.

Tallos de Rosas molidos	Porcentaje de Papel, %	Porcentaje Humedad, %	Esfuerzo al Aplastamiento, kPa	Porcentaje de Ceniza, %	Material Volátil, %	PCS, cal/g	PCI, cal/g
Luz de Malla 1,5	10	9,83	6,75	13,54	64,83	5973,82	5556,19
	20	9,78	6,27	13,18	65,1	5945,27	5548,02
	30	9,49	9,45	13,14	71,34	5922,02	5523,38
Luz de Malla 4,0	10	9,7	5,88	13,3	64,65	5975,54	5582,33
	20	9,61	7,13	13,16	66,55	5945,5	5565,41
	30	9,58	10,22	13,02	72,1	5922,33	5539,96

**Fuente:** ALARCON Shirley; Elaboración de briquetas a partir de desechos de tallos de rosas y papel reciclado; [en línea]; Universidad central del Ecuador; 2017; [Consultado 10 de septiembre de 2019]; disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13003/1/T-UCE-0017-0059-2017.pdf4>

En esta investigación se observó el impacto del papel reciclado como aglomerante y que propiedades le brinda este a la briqueta, se tuvieron en cuenta los resultados dados por las briquetas, en comparación a otros combustibles sólidos, y se pudo evidenciar que el contenido de humedad del carbón vegetal con respecto a las briquetas, es de 3-5% y 10%, respectivamente. También se pudo ver que el poder calorífico y la humedad son similares en el caso del papel y de la madera.<sup>80</sup>

<sup>79</sup> Alarcon Solorzano Shirley Mireya; Elaboración de briquetas a partir de desechos de rosas y papel reciclado; [en línea]; trabajo de titulación., modalidad proyecto de investigación para la obtención del título de ingeniería química; Universidad central del Ecuador; Quito; 2017; [Consultado 3 de noviembre de 2019]; Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13003/1/T-UCE-0017-0059-2017.pdf>

<sup>80</sup> *Ibíd.*, p. 72

En otro estudio (Analuisa, 2018), se elaboraron briquetas de borra de café y un aglomerante como el almidón de yuca, y se compararon sus resultados con el carbón vegetal; el poder calorífico fue calculado de dos formas: la primera, con una fórmula basada en propiedades tales como la cantidad de proteína, fibra y grasas, y la segunda, se basó en una prueba experimental realizada en una bomba calorimétrica. En la tabla 6 se muestran los datos obtenidos para la briketa de borra de café y almidón de yuca realizada.

**Tabla 8.** Resultado del análisis bromatológico de una briketa de borra de café con almidón de yuca

<b>Parámetro</b>	<b>Resultados</b>
Humedad (%)	9.12
Cenizas (%)	1.76
Proteína (%)	12.56
Fibra (%)	17.37
Grasas (%)	12.89
PCS1 (MJ/Kg)	17.21
PCS2 (MJ/Kg)	17.62

**Fuente:** ANALUISA, Darwin HERNANDEZ, Edison; Diseño y construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal [En línea] Tesis Universitaria, Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, 2018. [Consultado 12 de agosto de 2019], Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9206>

En la tabla 8 se evidencian los resultados obtenidos a partir de diferentes pruebas realizadas a la briketa, las cuales corresponden a: contenido de humedad de cenizas y el cálculo del poder calorífico. El almidón de yuca como aglomerante es

excelente, ya que este permite mayor adherencia entre partículas de café y además es un producto orgánico que no genera contaminación ambiental.<sup>81</sup>

Luego de las distintas revisiones bibliográficas acerca de los aglomerantes que se han mencionado anteriormente, se puede observar que los aglomerantes como el papel reciclado, el aserrín de madera y el almidón de yuca, son usados para la elaboración de briquetas y cumplen con las propiedades fisicoquímicas que se necesitan para el desarrollo de un biocombustible sólido, por esta razón fueron seleccionados para ser parte del estudio y así, a través de pruebas a nivel laboratorio, determinar cuál de los tres aglomerantes mencionados anteriormente es el más adecuado para ser usado como materia prima en la elaboración de la briqueta de borra de café.

## 2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

Como se ha mencionado anteriormente, es importante caracterizar las materias primas a partir de propiedades que permitan determinar bondades o dificultades en las propiedades finales de la briqueta, se resalta que en esta parte del trabajo de grado las propiedades analizadas para los aglomerantes influyen directamente en la elección del mismo.

Propiedades como contenido de humedad, cenizas, material volátil, carbono fijo y densidad se calcularon a nivel laboratorio en las instalaciones del Sena sede Tecnoparque línea biotecnología y nanotecnología, para el proceso de estas propiedades se implementó la mufla y las temperaturas requeridas para los destinos procesos. El poder calorífico en esta parte del proyecto se determinó mediante una revisión bibliográfica que se mostrara más adelante.

Para cada propiedad analizada a continuación se realizaron tres replicas.

**2.1.1 Humedad.** El desarrollo del proceso de experimentación para la determinación de la humedad (H) se desarrolló bajo la norma NTC 2558<sup>82</sup> para la borra de café y con la norma ASTM D3172-13<sup>83</sup> para los aglomerantes, esta norma además incluye los procedimientos para el proceso experimental y cálculo de propiedades como Ceniza (C), Volátiles (V) y Carbono Fijo (CF)<sup>84</sup>; los cuales serán desarrollados posteriormente.

---

<sup>81</sup> ANALUISA, Opc. Cit., p. 13

<sup>82</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Metodo para determinar el contenido de humedad total. NTC 2558. 1 ed. Bogota D.C.; El instituto, 1998. 4p

<sup>83</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice For Proximate Analysis of Coal and Coke. ASTM D3172-13. 1 ed. West Conshohocken, 2013. 4p

<sup>84</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice For Proximate Analysis of Coal and Coke. ASTM D3172-13. 1 ed. West Conshohocken, 2013. 4p

Para determinar el contenido de humedad se siguió el diagrama de flujo mostrado en el anexo A.

La fórmula bajo la cual se reportan los datos de humedad y que está establecida por la norma es la siguiente:

**Ecuación 1.** Determinación del contenido de humedad

$$\%H = \frac{\text{peso perdido}}{\text{peso de la muestra}} \times 100$$

**Fuente:** INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Metodo para determinar el contenido de humedad total. NTC 2558. 1 ed. Bogota D.C.; El instituto, 1998. 4p

A continuación, se muestran los datos obtenidos para contenido de cenizas de cada una de las materias primas, teniendo en cuenta que, %Humedad RB hace referencias a datos obtenidos por referencia bibliográfica con el fin de compararlos con los experimentales.

**Tabla 9.** Contenido de humedad.

<b>Materia Prima</b>	<b>% Humedad</b>	<b>%Humedad RB</b>
Borra de Café	57.43 ± 1.16%	56.70% <sup>85</sup>
Almidón de Yuca	13.56 ± 1.26%	10-13% <sup>86</sup>
Papel	2.85 ± 0.19%	-----
Aserrín de madera	10.22 ± 0.24 %	10-20% <sup>87</sup>

**Fuente:** elaboración propia.

<sup>85</sup> CORREA, J. L.G., et al. Drying of spent coffee grounds in a cyclone dryer. *Coffee Science*, [en línea]. 2013, *Periodicidad 9* (1) pp. 65-74. [Consultado el 1 de septiembre de 2019] Disponible en: <https://www.openaire.eu/search/publication?articleid=od>

<sup>86</sup> Aristizábal, J., Sánchez, T., & Lorío, D. M. (2007). *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca* [En línea] (pp. 16-18). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [Consultado el 1 de septiembre de 2019] Disponible en: <http://roa.ult.edu.cu/handle/123456789/2257>

<sup>87</sup> Serret-Guasch, N., Giralt-Ortega, G., & Quintero-Ríos, M. (2016). Caracterización de aserrín de diferentes maderas. [En línea] *Tecnología Química*, 36(3), 395-405.. [Consultado el 1 de septiembre de 2019] Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852016000300012](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000300012)

**2.1.2 Cenizas.** La determinación del contenido de cenizas (C) se desarrolló bajo la norma ASTM D3172-13,<sup>88</sup> la cual establece el procedimiento experimental y el método de cálculo para esta propiedad.

Para determinar el contenido de cenizas se siguió el diagrama de flujo mostrado en el anexo B.

La fórmula bajo la cual se reportan los datos de cenizas (C) y la cual está establecida por la norma es la siguiente:

**Ecuación 2.** Determinación del contenido de cenizas

$$\%C = \frac{\text{Peso de cenizas}}{\text{Peso muestra}} \times 100$$

**Fuente:** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice For Proximate Analysis of Coal and Coke. ASTM D3172-13. 1 ed. West Conshohocken, 2013. 4p

A continuación, se muestran los datos obtenidos para contenido de cenizas de cada una de las materias primas, teniendo en cuenta que, %Cenizas RB hace referencias a datos obtenidos por referencia bibliográfica con el fin de compararlos con los experimentales.

**Tabla 10.** Cenizas de cada materia prima.

<b>Materia prima</b>	<b>% Cenizas</b>	<b>% Cenizas RB</b>
Borra de café	2.36 ± 0.002%	0.60% <sup>89</sup>
Almidón de Yuca	0.11 ± 0.007 %	< 0.12% <sup>90</sup>
Papel	7.92 ± 0.39	-----
Aserrín de madera	2.33 ± 0.06 %	0.5-2% <sup>91</sup>

**Fuente:** elaboración propia.

<sup>88</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice For Proximate Analysis of Coal and Coke. ASTM D3172-13. 1 ed. West Conshohocken, 2013. 4p

<sup>89</sup> CORREA, J. L.G., et al. Drying of spent coffee grounds in a cyclone dryer. Coffee Science, [en línea].2013, Periodicidad 9 (1) pp. 65-74. [Consultado el 1 de septiembre de 2019] Disponible en: <https://www.openaire.eu/search/publication?articleid=od>

<sup>90</sup> ARISTIZÁBAL, Op. Cit., p.17

<sup>91</sup> Serret-Guasch., Op. Cit., p. 400

**2.1.3 Material volátil.** La determinación del contenido material volátil (V) se realizó bajo la norma ASTM D3172-13<sup>92</sup> la cual proporciona el procedimiento experimental y la fórmula de cálculo de esta propiedad.

Para determinar el contenido de material volátil se siguió el diagrama de flujo mostrado en el anexo C.

La fórmula con la cual se reportan los datos y la cual se encuentran en la norma mencionada anteriormente es la siguiente:

**Ecuación 3.** Determinación del contenido de materia volátil

$$\%V = \frac{\text{Peso muestra}(\text{peso cenizas} - \text{peso recipiente})}{\text{Peso muestra}} \times 100$$

**Fuente:** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice For Proximate Analysis of Coal and Coke. ASTM D3172-13. 1 ed. West Conshohocken, 2013. 4p

A continuación, se muestran los datos obtenidos para contenido de cenizas de cada una de las materias primas, teniendo en cuenta que, %Material Volátil RB hace referencias a datos obtenidos por referencia bibliográfica con el fin de compararlos con los experimentales.

**Tabla 11.** Determinación de materia volátil.

<b>Materia Prima</b>	<b>Materia Volátil (%)</b>	<b>Materia Volátil (%) RB</b>
Borra de café	75.15 ± 0.52 %	72.15 <sup>93</sup>
Almidón de Yuca	85.12 ± 1.15 %	
Aserrín de Madera	83.51 ± 2.29 %	
Papel	89.76 ± 4.66%	

**Fuente:** elaboración propia.

**2.1.4 Poder calorífico.** Con respecto a la forma en la cual se van a reportar los datos para las materias primas, se decidió hacer una búsqueda bibliográfica

<sup>92</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice For Proximate Analysis of Coal and Coke. ASTM D3172-13. 1 ed. West Conshohocken, 2013. 4p

<sup>93</sup> Tangmankongworakoon;. An approach to produce biochar from coffee residue for fuel and soil amendment purpose; International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 1-8.; 2019; [Consultado 15 de septiembre de 2019]; disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40093-019-0267-5>

adecuada para tener un indicio de que propiedades caloríficas podrían aportarle las materias primas a la briqueta.

A continuación, se muestran los valores encontrados:

**Tabla 12.** Poder calorífico de cada materia prima.

<b>Materia Prima</b>	<b>Poder Calorífico (MJ/Kg)</b>
Borra de Café	24.91-29.01 <sup>94</sup>
Almidón de Yuca	15.30 <sup>95</sup>
Aserrín de Madera	17.54 <sup>96</sup>
Papel	NR

**Fuente:** elaboración propia.

**2.1.5 Carbono fijo.** La determinación del carbono fijo se realizó en base a la norma ASTM D3172-13.<sup>97</sup>

Está basado en las propiedades que se calcularon anteriormente y los datos e reportan según la fórmula mostrada a continuación:

**Ecuación 4.** Carbono fijo

$$\text{Carbono fijo (CF): } 100 - (HuR + C + MV)$$

**Fuente:** INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Briquetas combustibles para uso doméstico. NTC 2060. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 1998. 9p

Donde:

HuR (%): Humedad relativa.

C (%): Contenido de cenizas.

MV (%): Contenido Materia Volátil.

Los datos obtenidos para carbono fijo de cada una de las materias primas se reportan en la siguiente tabla:

<sup>94</sup> Rodríguez, N ,Cenicafé, Revista Cenicafé Vol 50. (1999). 205- 214. [Consulta: 20 de marzo 2019] Disponible en: [https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos\\_cafe/manejo\\_de\\_subproductos/P1](https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos/P1)

<sup>95</sup> Ordóñez, Op. Cit., p. 93

<sup>96</sup> Ordóñez, Op. Cit., p. 93

<sup>97</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice For Proximate Analysis of Coal and Coke. ASTM D3172-13. 1 ed. West Conshohocken, 2013. 4p

**Tabla 13.** Carbono fijo de cada materia prima.

<b>Materias Primas</b>	<b>Carbono Fijo (%)</b>
Borra de Café	2.85
Almidón de Yuca	0.94
Aserrín de Madera	4.56
Papel	-----

**Fuente:** elaboración propia.

**2.1.6 Densidad.** La determinación de la densidad se realizó bajo la Norma Técnica Colombiana NTC 4084<sup>98</sup> Densidad por compactación la cual otorga el procedimiento experimental y la fórmula para la determinación de la propiedad.

Para la determinación de la densidad se siguió el diagrama de flujo mostrado en el anexo D.

La fórmula usada para reportar los datos de densidad es la siguiente:

**Ecuación 5.** Determinación de la densidad.

$$\rho = \frac{\text{Masa de la muestra}}{\text{Volumen de la muestra luego de la compactacion}}$$

**Fuente:** INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Briquetas combustibles para uso doméstico. NTC 2060. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 1998. 9p

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

**Tabla 14.** Densidad de cada materia prima.

<b>Materia prima</b>	<b>Densidad (g/ml)</b>
Borra de café	0.57 ± 0.019 %
Almidón de Yuca	0.78 ± 0.012 %
Papel	0.052 ± 0.004%
Aserrín de madera	0.19 ± 0.007%

**Fuente:** elaboración propia.

<sup>98</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. CAFÉ TOSTADO Y MOLIDO METODO PARA LA DETERMINACION DE LA DENSIDAD POR COMPACTACION NTC 4084. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 2005. 7p



## 2.2 PROPIEDADES FÍSICAS: EXPERIMENTACIÓN CON LOS AGLOMERANTES

Las briquetas de borra experimentales, como se decidió llamar a esta sección del trabajo, se realizaron con el fin de probar la resistencia estructural que los tipos de aglomerante otorgaban a la briqueta, se realizaron briquetas de borra de café, borra de café - papel, borra de café - almidón y borra de café - aserrín de madera. A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos para cada uno de los aglomerantes y su proceso de elaboración.

**Tabla 15.** Composiciones pre-experimentación.

Fecha publicación	Autor	Aglomerantes	Porcentaje aglomerante (Wt%)	Presión ejercida
2011	Fonseca, E; Tierra. L	Almidón de yuca Aserrín	4,10,20	13.94kPa
NR	Valderrama, A; Curo, H;	Aserrín	5-10	(0.8-1.7)kPa
2017	Alrcon, S	Papel Almidón	10,20,30	<5000kPa
2018	Analuisa, D; Hernández, E	Almidón de yuca	12.82	≤5000kPa

**Fuente:** elaboración propia.

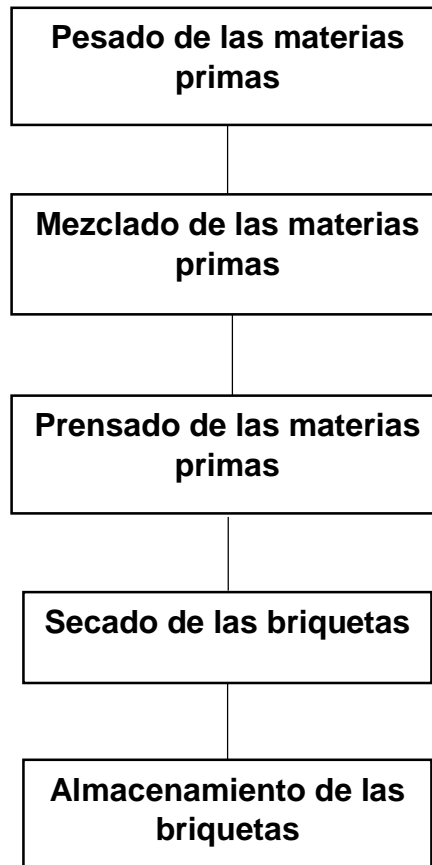
De acuerdo a la tabla 15 se pueden mostrar las distintas revisiones bibliográficas, aglomerantes, porcentajes de composición másica y la presión ejercida en el desarrollo de las briquetas. Los aglomerantes que se muestran son algunos de los más implementados y también muestran las distintas composiciones en las cuales se formularon. A partir de esta tabla 15 se hizo una selección de los valores de las composiciones de cada aglomerante que se muestran en los experimentos mostrados más adelante, como se puede observar las presiones ejercidas en las revisiones bibliográficas se consideran presiones bajas, lo que corresponde a prensas que ejercen menos de 5 MPa de presión.

Se realizaron las briquetas teniendo en cuenta las composiciones de la tabla 13 para cada aglomerante, cada experimento se realizó por duplicado.

### 2.2.1 PROCESO DE ELABORACION DE LAS BRIQUETAS

El proceso por el cual se llevaron a cabo todas las pre-experimentaciones con los aglomerantes se puede observar en la figura 15.

**Figura 15.** Proceso de elaboración de las briquetas.



**Fuente:** elaboración propia.

De acuerdo a la figura 15 se describe el proceso de desarrollo de las briquetas, cabe resaltar que los pasos previos al prensado de las materias primera se realizaron en las instalaciones del Sena sede Tecnoparque línea de biotecnología y nanotecnología. El pesado de las materias primas se realizó en una balanza analítica para posterior pasar al mezclado que en este caso se realizó de forma manual. Para el paso del prensado de la mezcla se prosiguió a un taller de mecánica donde se finalizaron los últimos pasos del proceso.

Por otro lado, para la obtención de las materias primas la borra de café se obtuvo mediante la empresa Starbucks de manera gratuita, el papel reciclaje mediante la Universidad de América, el aserrín se adquirió por medio de una carpintería de barrio y el almidón que este fue el único aglomerante que se tuvo que hacer un gasto monetario. El almidón de yuca se obtuvo comercialmente, cada unidad consta de mil gramos de almidón natural, empacadas en bolsas tetrapack

**2.2.1.1 Pesado de las materias primas.** Para esta parte del proceso se usó una balanza analítica como se puede observar en la figura 16. La cual tiene la capacidad de otorgar pesos con cuatro cifras significativas, lo que dio un elemento de seguridad a la hora de realizar el pesaje para las diferentes materias primas, sobre todo para la borra de café y el almidón de yuca, ya que para el agua fue más fácil debido a su densidad. Con respecto a las pérdidas de materia dentro de lo que fue el proceso de transporte y posterior compactación de la mezcla, se decidió pesar masa de materia prima adicional alrededor de 5 g por medida, teniendo en cuenta cualquier pérdida que afectara el proceso.

**Figura 16.** Balanza analítica



**Fuente:** elaboración propia

**2.2.1.2 Mezclado de las materias primas.** En esta etapa del proceso, ya con cada materia prima pesada de acuerdo a su formulación tomada del diseño de experimentos mostrado anteriormente, se realizó la mezcla tomando en cuenta el tamaño y el tipo de briqueta a elaborar. Para conocer si la mezcla tiene un aspecto adecuado, antes de realizar el procedimiento de prensado la mezcla debe tener una textura viscosa, de esta manera, cuando se compacte en la máquina, los tres componentes se aglomeren generando una estructura sólida para la briqueta que se constituirá, este proceso se realizó de forma manual.

**2.2.1.3 Compactación de la prensa.** La elaboración de la briqueta no se realizó de forma manual sino mediante una prensa hidráulica compactadora, algunas especificaciones de este equipo son:

- Prensa hidráulica de 5 toneladas.
- Presión ejercida por la prensa para realizar la compresión: 10.34 MPa

La ventaja de este artefacto radica en que permitió un mayor control sobre el proceso y además aseguró que la briqueta cumpliera con la norma mencionada anteriormente, la única manipulación que se le dio manualmente fue en el mezclado de la borra de café junto con el agua y el aglomerante, lo cual fue una etapa previa a la modelación en la maquina compactadora; la briqueta cumplió con las siguientes especificaciones:

- Forma: Cilindro hueco.
- Diámetro: 10.16 cm.
- Longitud: 8 -10 cm.
- Diámetro del agujero del centro: 2.54 cm.

En la figura 17, se muestra la prensa que se utilizó para la elaboración de las briquetas.

**Figura 17.** Prensa hidráulica usada en la elaboración de las briquetas.



**Fuente:** elaboración propia

**2.2.1.4 Secado de las briquetas de borra de café.** Una vez se hayan obtenido las briquetas de borra de café y el aglomerante, el proceso siguiente es el secado, ya que las briquetas aun poseen una cantidad de humedad que es pertinente eliminar para así tener mejores resultados a la hora de la combustión. El proceso de secado se puede efectuar de manera natural, en este caso se secan por convección libre a la intemperie; o en la mufla, por convección forzada.

Se tienen varios tipos de secado:

➤ **Secado al aire libre.** Posterior al proceso de compactación en la prensa, las briquetas aun presentan un contenido de humedad y esto puede llegar a generar inconvenientes en su utilización con fines energéticos. El secado natural consiste en poder aprovechar las condiciones ambientales, especialmente en días soleados, para favorecer la deshidratación de la briqueta. El movimiento del aire depende de la acción del viento, la disipación de la humedad se origina del potencial de secado del aire y también de la influencia directa de la energía solar; este es uno de los métodos más implementados, considerando que, permite que un mayor número de briquetas se sequen.

En este método las briquetas bajaran su humedad hasta disponer una relación de equilibrio entre la humedad interna y la del ambiente, a este equilibrio se le conoce como higroscópico. Se han venido elaborando distintos mecanismos de secado en el ambiente, esto con el fin disminuir el gasto energía, generando así secadores solares tipo invernaderos, una tecnología adecuada donde se puede conseguir fácilmente la energía solar y así se reduce el tiempo de secado.<sup>99</sup>

➤ **Secado forzado.** En el método anterior, con las mejores condiciones ambientales e infraestructura suficiente para el almacenamiento de las briquetas durante un periodo prolongado, es bastante complicado poder adquirir humedades por debajo del 20% en base humedad. Cuando la humedad conseguida después del método natural no es la adecuada para el procesado de material, o no se evidencian condiciones óptimas para su realización, es indispensable recurrir al secado forzado.

Este tipo de secado se efectúa mediante un combustible que facilite las condiciones óptimas, y así se puedan obtener humedades inferiores a la humedad de equilibrio con el medio ambiente, este es un aspecto favorable ya que se reduce de manera drástica el tiempo de secado, pero se perjudica el proceso poniendo en riesgo la viabilidad económica del beneficio energético de las briquetas.<sup>100</sup>

El secado de un sólido consiste en disociar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido, con el fin de conseguir disminuir el contenido de líquido residual hasta un valor tolerablemente bajo. Se evidencian distintos tipos de operaciones de secado, se diferencian por la metodología seguida en su procedimiento; estos pueden llegar a ser por eliminación de agua de una solución

---

<sup>99</sup> FONSECA, Op. Cit., p. 80

<sup>100</sup> FONSECA, Op. Cit., p. 83

mediante el proceso de ebullición sin presencia de aire; también por eliminación de agua mediante adsorción del sólido; por reducción del contenido de líquido, hasta alcanzar un valor determinado, mediante evaporación en presencia de un gas o por crecimiento de temperatura.<sup>101</sup>

El producto que es sometido a este tipo de secado puede llegar a soportar temperaturas elevadas o bien se requiere un tratamiento alterno con temperaturas suaves o moderadas.

Tipos de secadores más usuales:

- Secadores directos.
- Secadores indirectos.
- Secadores diversos.
- Secadores discontinuos o por lote.
- Secadores continuos.
- Secadores para sólidos granulares o rígidos y pastas semisólidas.
- Secadores que pueden aceptar alimentaciones líquidas o suspensiones.<sup>102</sup>

Para el secado de las briquetas de borra de café y el aglomerante seleccionado, primero se dejaron secando a la intemperie, a una temperatura ambiente de 25°C, una presión atmosférica de (1024 hPa) y por un lapso de tiempo de 3 días, esto con el fin de que factores externos, como lo son la luz solar y la temperatura del viento, ayuden a que las briquetas disminuyan su contenido de humedad; pero este método no ayuda a que las briquetas pierdan gran cantidad de humedad, por esta razón, posteriormente se llevan a la mufla para que allí se garantice la eliminación de la humedad en una gran proporción; la mufla se programó a una temperatura de 105°C por un tiempo de 24 horas. Se decidió realizar estos dos métodos para así poder obtener un mejor producto con unas características adecuadas.

**2.2.1.5 Almacenamiento de las briquetas.** Para el proceso de almacenamiento las briquetas fueron apiladas en una caja de cartón con unas dimensiones de 12cm\*12cm, siendo protegidas del agua, ya que, al ser aisladas de esta manera, se evita el incremento de la humedad por el contacto con el aire. El objetivo de almacenar las briquetas es para posteriormente realizar pruebas fisicoquímicas a estas, similares a las ejecutadas previamente a las materias primas, esto con el fin de comparar las propiedades obtenidas con la de otros combustibles sólidos.

Según la norma técnica colombiana NTC 2060 en su numeral 3, se muestran las indicaciones correctas que debe presentar una briqueta:

- Las briquetas deben tener un tamaño como mínimo 3 cm en su dimensión, también se requiere una combustión limpia y debe ser de fácil encendido, además

---

<sup>101</sup> FONSECA, Op. Cit., p. 85

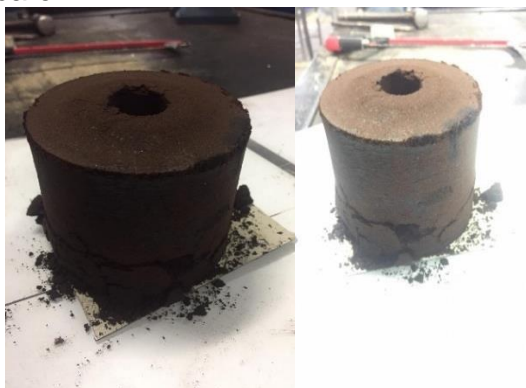
<sup>102</sup> FONSECA, Op. Cit., p. 87

de esto cuando estas son transportadas o situadas en condiciones normales de almacenamiento, no deben deteriorarse.

- Algunas características físicas, mecánicas y otras; como el tamaño y poder calorífico, deben ser semejantes.
- A la hora de la selección del aglutinante, este debe poseer características de aglomerante y que no sea tóxico, ni debe emitir gases peligrosos durante el proceso de combustión en una cantidad mayor a la permisible.<sup>103</sup>

**2.2.2 Pre-experimentos briquetas de 100% borra de café.** Antes de mostrar el desarrollo para los aglomerantes, es importante aclarar que no se contempla la posibilidad de realizar una briqueta hecha a partir de 100% borra de café, se realizaron experimentos mostrados en la figura 18. Estos experimentos no tuvieron éxito debido a que, aunque se logró construir la briqueta, sus capacidades físicas eran muy limitadas, como se pueden observar en la figura 18 se presentaron grietas severas dentro de la briqueta que proporcionaban debilidad a su estructura, y con cualquier contacto físico la briqueta quedaría destruida. Esto se da debido a que no se cuenta con una prensa hidráulica que proporcione la suficiente presión para que la borra de café se pueda aglomerar por sí sola, para la elaboración de una briqueta en ausencia de aglomerante se necesitan de presas hidráulicas que proporcionen una presión superior a 100 MPa.<sup>104</sup>

**Figura 18.** Briqueta 100% borra de café



**Fuente:** elaboración propia.

---

<sup>103</sup> Alarcon Solorzano Shirley Mireya; Elaboración de briquetas a partir de desechos de rosas y papel reciclado; [en línea]; trabajo de titulación., modalidad proyecto de investigación para la obtención del título de ingeniería química; Universidad central del Ecuador; Quito; 2017; [Consultado 3 de noviembre de 2019]; Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13003/1/T-UCE-0017-0059-2017.pdf>

<sup>104</sup> ANALUISA, Op. Cit., p. 11

**2.2.3 Briquetas elaboradas con papel: seco y mojado.** De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se realizaron cinco experimentos para la elaboración de las briquetas, en los cuales se usó la materia prima indispensable, la borra de café, y papel como el material aglomerante; en cada uno de dichos experimentos se evaluó la pérdida de agua después de desarrollar la briqueta, con respecto a la medición de este factor, se analizó porque es pertinente tener datos acerca de la cantidad de recursos necesarios a la hora de realizar la briqueta, lo que corresponde a una medida de impacto ambiental y también de la eficiencia del proceso.

Para el aglomerante en los pre-experimentos 1, 2 y 3, mostrados en las tablas 13, 14 y 15, el papel fue previamente humedecido, con el fin de conocer qué consecuencias se podrían evidenciar al realizar las briquetas. En los pre-experimentos 1 y 2 se desarrollaron las briquetas con las mismas cantidades, tanto de borra de café como de papel húmedo, 242,3 g y 242,3 g respectivamente, y el agua agregada en estos dos primeros pre-experimentos fue de 1000g en ambos casos; en el experimento 1 se generó una pérdida de agua de 500 g y en el experimento 2 fue de 480 g, esto se da debido a la presión generada por la prensa en el momento de la elaboración de las briquetas; esta pérdida de agua, al ser significativa, reduce el porcentaje de humedad y ayuda a las briquetas a que posean mejores propiedades fisicoquímicas. En el pre-experimento 3 también se utilizó el papel húmedo, pero la diferencia radica en la cantidad de agua, de borra de café y de aglomerante que se necesitó para dicha elaboración, 800 g, 303 g y 130 g respectivamente, pero en este caso la cantidad de borra de café fue mayor al aglomerante; la pérdida de agua en este pre-experimento fue de 450 g, esto como bien se ha comentado, se debe a distintos factores como: la correcta realización de la mezcla de los compuestos y la fuerza aplicada a la prensa a la hora de construir la briqueta.

En los pre-experimentos 4 y 5 mostrados en las tablas 16 y 17, la diferencia se presenta en el aglomerante, en este caso el papel, que no fue previamente humedecido; con respecto a esto, se decidió variar la cantidad de agua en estos pre-experimentos: en el pre-experimento 4 se aumentó la cantidad de agua (1200 g) y en el pre-experimento 5 se disminuyó dicha cantidad (800 g), esto con el fin de analizar las pérdidas de agua y conocer si al realizar la mezcla con una respectiva cantidad de agua las propiedades físicas de la briqueta mejoran.



**Tabla 16.** Experimento 1 papel húmedo.

Papel previamente húmedo			
Experimento 1			
Mezcla antes de la briqueta	Agua(g)	500	50,78%
	Papel(g)	242,3	24,61%
	Borra(g)	242,3	24,61%
Peso de la mezcla (g)		984,6	100%
Agua(g) que se pierde		500	-

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 17.** Experimento 2 papel húmedo.

Papel previamente húmedo			
Experimento 2			
Mezcla antes de la briqueta	Agua(g)	520	51,80%
	Papel(g)	242,3	24,10%
	Borra(g)	242,3	24,10%
(g)		1004,6	100%
Agua(g) que se pierde		480	-

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 18.** Experimento 3 papel húmedo.

Papel previamente húmedo			
Experimento 3			
Mezcla antes de la briqueta	Agua(g)	350	44,70%
	Papel(g)	130	16,60%
	Borra(g)	303	38,7%
(g)		783	100%
Agua(g) que se pierde		450	-

**Fuente:** elaboracion propia.

En la figura 19, se muestran las briquetas elaboradas para papel previamente humedecido, junto con sus respectivas composiciones másicas.

**Figura 19.** Briquetas: Experimentos 1, 2 y 3 Papel.



**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 19.** Experimento 4 papel seco.

Papel seco			
Experimento 4			
Mezcla antes de la briqueta	Agua(g)	500	67,33%
	Papel(g)	50	6,73%
	Borra(g)	192,6	25,94%
(g)		742,6	100,10%
Agua(g) que se pierde		700	-

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 20.** Experimento 5 papel seco.

Papel seco			
Experimento 5			
Mezcla antes de la briqueta	Agua(g)	365	34,27%
	Papel(g)	50	4,69%
	Borra(g)	650	61,03%
(g)		1065	100%
Agua(g) que se pierde		465	-

**Fuente:** elaboración propia.

En la figura 20, se muestra la briqueta correspondiente al pre-experimento 4, una briqueta elaborada con papel seco.

**Figura 20.** Briqueta experimento 4 papel seco.



**Fuente:** elaboración propia.

Por lo mencionado anteriormente se considera que usar el papel como aglomerante en primera instancia, implicaría pérdidas de agua significativas, lo que corresponde a un factor en contra, ya que, aunque se garantiza el aglomerado de las materias primas usando el papel, también se está afectando un recurso importante: el agua, lo que aumentaría el impacto ambiental producto de la elaboración de la briqueta a partir de la borra de café.

**2.2.4 Briquetas elaboradas con almidón de yuca.** En estos dos pre-experimentos se implementó otro aglomerante, el almidón de yuca, con el fin de evaluar las características físicas que este podría agregarle a la briqueta de borra de café. Se pudo evidenciar en las tablas 18 y 19, que se necesitó una cantidad menor de agua para el desarrollo de estos (280 y 300 g respectivamente) con respecto a los anteriores pre-experimentos donde se empleó el papel como aglomerante; y también se puede observar que las pérdidas de agua fueron menores (110 y 100 g respectivamente) con respecto al papel. Los datos de los experimentos se pueden observar a continuación:

**Tabla 21.** Experimento 1 almidón de yuca.

Almidón de yuca			
Experimento 1			
Mezcla antes de la briqueta	Agua(g)	170	20,22%
	Almidón(g)	118,28	14,066%
	Borra(g)	552	65,72%
(g)		840,88	100%
Agua(g) que se pierde		110	-

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 22.** Experimento 2, almidón de yuca.

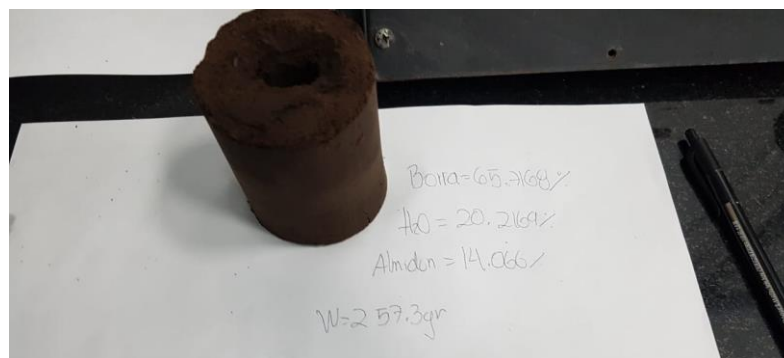
Almidón de yuca			
Experimento 2			
Mezcla antes de la briqueta	Agua(g)	200	24,69%
	Almidón(g)	110	13,58%
	Borra(g)	500	61,73%
(g)		810	100%
Agua(g) que se pierde		100	-

**Fuente:** elaboración propia

El almidón de yuca tiene propiedades que benefician físicamente a la briqueta, debido a su capacidad de retención de agua, se describe al almidón de yuca como un compuesto higroscópico, el cual se caracteriza por tener la capacidad de absorber humedad de su entorno,<sup>105</sup> es por esto que en este tipo de experimentos tanto el uso como la pérdida de agua fueron menores. Otras capacidades pertenecientes a este aglomerante que es importantes de resaltar son su condición como emulsificante y algunas propiedades de la pasta como, la viscosidad y consistencia.<sup>106</sup> Aunque de los aglomerantes estudiados es el único que no está establecido como residuo, ya que es producto de un proceso industrial que tiene un costo, las propiedades físicas que este último le dio a la briqueta son bastante importantes; más adelante en la matriz de selección que se realizó, se establecerán algunos aspectos y propiedades determinantes para la elección del aglomerante.

En la figura 21, se presenta la briqueta correspondiente al pre-experimento 1 en donde se usó almidón de yuca como aglomerante.

**Figura 21.** Briqueta: Experimento 1 almidón de yuca.



**Fuente:** elaboración propia.

<sup>105</sup> ARIZTIZÁBAL, Op. Cit., p. 36

<sup>106</sup> ARIZTIZÁBAL, Op. Cit., p. 36

**2.2.5 Briquetas elaboradas con aserrín de madera.** Para las briquetas que se elaboraron con aserrín se hicieron dos pre-experimentos mostrados en las tablas 20 y 21, a partir de la misma base de 500 g de borra de café se establecieron los porcentajes restantes para el aserrín de madera y el agua, se presentaron pérdidas de agua de 200 g y 214 g para cada uno de estos pre-experimentos; en comparación a los realizados con papel, en donde en promedio se pierden 500 g de agua, se logra una reducción de más del 50% en cuanto a agua desperdiciada se refiere. En comparación a los pre-experimentos realizados con el almidón de yuca en donde se perdieron, en promedio, 180 g de agua, se obtiene una pérdida de agua similar entre los dos aglomerantes; aunque el almidón de yuca logra tener mejores condiciones en cuanto a este aspecto considerando su capacidad higroscópica, como se mencionó anteriormente. Los datos de los experimentos pueden ser observados a continuación:

**Tabla 23.** Experimento 1 aserrín de madera.

Aserrín de madera			
Experimento 1			
Mezcla antes de la briqueta	Agua(g)	116,7	20,0024%
	Aserrín de madera(g)	166,7	20,0024%
	Borra(g)	500	59,99%
(g)		833,4	100%
Agua(g) que se pierde		183,3	-

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 24.** Experimento 2 aserrín de madera.

Aserrín de madera			
Experimento 2			
Mezcla antes de la briqueta	Agua(g)	148.08	18.6%
	Aserrín de madera(g)	148.08	18.6%
	Borra(g)	500	62.8%
(g)		833,4	100%
Agua(g) que se pierde		183,3	-

**Fuente:** elaboración propia

Lo ocurrido con respecto a las propiedades físicas que brinda el aserrín de madera a la briqueta es que, aunque se logró la elaboración de la misma, a la hora de establecer contacto con la briqueta se presentó una debilidad considerable en su

estructura, el aserrín de madera no proporciono las condiciones apropiadas para el proceso de briqueta, en comparación a las otorgadas por el almidón de yuca.

En la figura 22, se muestra la briqueta elaborada para el pre experimento 1 en donde se usó aserrín de madera como aglomerante.

**Figura 22.** Briqueta elaborada con aserrín de madera como aglomerante.



**Fuente:** elaboración propia.

### 2.3 ELECCIÓN DEL AGLOMERANTE

El aglomerante es una parte fundamental dentro del proceso de elaboración de las briquetas ya que es el encargado de promover la aglomeración de los compuestos dentro del combustible sólido; luego de obtener los datos de humedad, cenizas, material volátil, carbono fijo y poder calorífico gracias a la caracterización de las materias primas como se mencionó anteriormente, es necesario la elección del aglomerante que proporcione unas mejores características fisicoquímicas a la briqueta, por esta razón se construye una matriz llamada la matriz de Pugh. Lo que se busca con esta herramienta es soportar la elección del aglomerante además de poder priorizar de una manera rápida las características de la briqueta que se quieren mejorar dentro de los criterios usados para la construcción de la matriz, se tuvieron en cuenta los elementos de la caracterización y se incluyeron dos más; el primero referido a los costos, ya que dentro de la postura de la química verde el papel y el aserrín de madera funcionan como residuos mientras que el almidón de yuca tiene un costo en su obtención, se decidió incluir este elemento dentro del estudio; el segundo corresponde a las características físicas que este tipo de aglomerantes le dan a la briqueta, para los cuales se usaron experimentos como se mencionó anteriormente, dando así un indicio del beneficio que podrían tener los

aglomerantes para las características físicas finales de la briqueta. A continuación, se muestra la matriz construida con los diferentes datos cuantitativos tenidos en cuenta para su consecución.

**Tabla 25.** Matriz de Pugh para elección de aglomerante.

	(1-10)	Almidón de Yuca	Aserrín de madera	Papel Reciclado
<b>Criterios</b>	Peso	Importancia		
Humedad	6	-	-	+
Cenizas	6	+	-	-
Material Volátil	6	+	+	-
Costos	10	-	+	+
Propiedades físicas	10	+	-	-
Poder Calorífico	7	+	+	-
Positivos	+	29	23	16
Negativos	-	-16	-22	-29
<b>Resultados</b>		13	1	-13

**Fuente:** elaboración propia.

**2.3.1 Criterio matriz de Pugh.** Este criterio se basa en las pruebas fisicoquímicas que se realizaron y fueron reportadas previamente, es importante porque permite establecer la matriz y así escoger el aglomerante que proporcione las mejores propiedades a la briqueta, a continuación, se presentan los distintos criterios evaluados junto con su explicación dentro de la matriz.

**2.3.1.1 Contenido de humedad.** Como se puede observar en la matriz, se le dio un valor de peso de 6, esto debido a que, como ya se ha mencionado, es una característica importante para la briqueta, su influencia dentro del proceso de combustión es innegable, para este proyecto entre menos humedad tenga el compuesto menor energía necesitará para llegar a la combustión, por ende y basados en la caracterización anterior (ver tabla humedad), el papel como compuesto con menor humedad llevo la importancia positiva dentro de la matriz.

**2.3.1.2 Contenido de cenizas.** De igual forma que al contenido de humedad se decidió darle el mismo peso de 6 a esta propiedad dentro de la matriz, porque se considera que el impacto, en este caso, es para el medio ambiente debido a la generación de residuos y este es un aspecto necesario, de forma que el aglomerante que menos cenizas produjera a la hora de realizarse la descomposición orgánica de la materia iba a ser el que se llevara la importancia

positiva dentro de la matriz, por esta razón el almidón de yuca lleva el signo positivo dentro de la matriz.

**2.3.1.3 Materia volátil.** Como se mencionó anteriormente es importante resaltar las características de cada propiedad que le llevan a tener cierto peso sobre la matriz, se decidió darle un peso de 6 porque, al igual que las dos propiedades previamente aludidas tiene una influencia sobre el medio ambiente, ya que, definiendo material volátil como desprendimientos gaseosos de la materia orgánica e inorgánica durante el calentamiento,<sup>107</sup> el aglomerante que proporcione un porcentaje de materia volátil menor, de la misma manera, tendrá un impacto menor sobre la contaminación del aire; por eso la importancia positiva se le dio al aserrín de madera y al almidón de yuca debido a que sus porcentajes de materia volátil son similares a diferencia del papel (ver tabla de materia volátil).

**2.3.1.4 Costos.** El peso que tiene dentro de la matriz es de 10, su importancia radica en que dentro del propósito de la generación de un combustible amigable con el medio ambiente, también entra el concepto de asequibilidad en las materias primas que hacen parte del combustible sólido, usar aglomerantes que sean residuos también mitigara el impacto ambiental, y es por esto, el nivel que se le atribuye dentro de la matriz; el papel y el aserrín de madera llevan la importancia positiva debido a que al ser residuos poseen un costo nulo, mientras que el almidón de yuca tiene cierto gasto para su obtención.

**2.3.1.5 Propiedades físicas.** Para que el combustible sólido sea aceptable tiene que contar con características físicas que le permitan tener un buen funcionamiento durante todo el proceso que conlleva a ser considerada como combustible, y es por esta razón que de igual forma que los costos se le da un peso de 10 dentro de la matriz. Es este segmento, el objetivo principal que tiene el uso del aglomerante, como se mencionó, es darle consistencia al combustible y permitir así la unión de las partículas de borra de café evitando inestabilidad en el mismo; como se mostró en los experimentos realizados para ver qué tan adecuados o no eran los aglomerantes para las características físicas de las briquetas, se pudo observar que el de mejor rendimiento fue el almidón de yuca y es por esto que en esta propiedad la importancia positiva le es atribuida.

**2.3.1.6 Poder calorífico.** Tiene un peso de 7 dentro de la matriz porque a diferencia de propiedades como cenizas, humedad y material volátil, esta característica propia de cada combustible es un factor de diferenciación y además de eficiencia dentro del concepto a establecer en la viabilidad del desarrollo de las

---

<sup>107</sup> VASQUEZ, Erika; Metodología para la caracterización de combustibles sólidos maderables del área metropolitana del Valle de Aburrá "AMVA", Colombia; [en línea]; 2006; [Consultado 24 de septiembre de 2019]; Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1799/179914075011.pdf>



briquetas de borra de café, por esto da un indicativo acerca de que cantidad energética podrían aportar los aglomerantes al producto final; luego de las investigaciones bibliográficas que se hicieron, se encontró que los aglomerantes con más aporte calorífico fueron el almidón de yuca y el aserrín de madera, por esta razón llevan la importancia positiva dentro de la matriz.

**2.3.2 Resultados de la matriz de Pugh.** Como se observa en la tabla 25 el almidón de yuca es el aglomerante con el puntaje más alto, por ende, es el elegido para la realización de las briquetas de borra de café, esto se explica debido a las propiedades físicas, de poder calorífico y cenizas que obtiene a diferencia del aserrín de madera y el papel. Su contenido de amilosa y amilopectina, temperatura de gelatinización, consistencia del gel y textura, comportamiento viscoso y propiedades térmicas, permite su utilización en la industria alimenticia como estabilizante, agente de relleno, adhesivo, ligante, enturbiante, formador de películas, estabilizante de espumas, agente de antienviejamiento de pan, gelificante, glaseante, humectante y espesante.<sup>108</sup>

## 2.4 DETERMINACIÓN DE LAS FORMULACIONES

Teniendo en cuenta lo elaborado previamente, se puede dar a conocer que se realizara un diseño de experimentos para poder determinar las diferentes formulaciones de las briquetas teniendo en cuenta diferentes composiciones de las materias primas que intervienen dentro de la elaboración de la briqueta, a continuación, se muestra el diseño de experimentos realizado, además de los resultados obtenidos para el mismo.

**2.4.1 Diseño de experimentos.** Luego de caracterizar las materias primas y elegir el aglomerante como se ha expuesto, es necesario establecer el diseño de experimentos para las diferentes composiciones de la briqueta, para tal fin; se usó el programa Desing Expert versión 11, en donde se aplicó un diseño de mezclas llamado Simplex Lattice<sup>109</sup>, ampliado a tres factores. En la tabla 26 se muestran cada uno de los factores y las variables de respuesta respectivas.

---

<sup>108</sup> ALVIS, Armando; Análisis físico-químico y morfológico de almidones de ñame, yuca y papa y determinación de la viscosidad de las pastas; [en línea]; 2008; [Consultado 26 de septiembre de 2019]; Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v19n1/art04.pdf>

<sup>109</sup> CERVONE, Frank; Managing digital libraries: the view from 30,000 feet, applied digital library project management Using Pugh matrix analysis in complex decision-making situations; [en línea]; 2009; [consultado 20 de septiembre de 2019]; Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/1206/c49198d48319947a7f140199bb951c375c07.pdf>

**Tabla 26.** Factores y variables de respuesta.

<b>FACTOR</b>	<b>VARIABLES DE RESPUESTA</b>
- Borra de café	-Poder calorífico
- Almidón de yuca (aglomerante)	-Resistencia al aplastamiento
- Agua	

**Fuente:** elaboración propia.

Conjuntamente, se dan a conocer las restricciones necesarias para la elaboración de los experimentos; dichas restricciones se basan en rangos máxicos expresados en porcentaje para cada una de las materias primas dentro del proceso de elaboración de la briqueta, además, estas restricciones son necesarias en la realización del diseño de experimentos, ya que por medio de estas se obtiene el número de corridas correspondientes al diseño de los experimentos; para esto se definieron rangos de porcentaje a nivel máxico para cada factor, los cuales fueron definidos así:

**Tabla 27.** Rango de composición para cada factor.

<b>FACTOR</b>	<b>RANGO DE COMPOSICIÓN (%)</b>
<b>Borra de café</b>	55-80%
<b>Almidón de yuca</b>	10-20%
<b>Agua</b>	10-30%

**Fuente:** elaboración propia.

Las restricciones que se tuvieron en cuenta para la formulación de la tabla anterior fueron las siguientes:

En la composición de la briqueta se tiene que priorizar el uso de la borra de café como principal materia prima, por ende; se estableció que más del 50% de la composición final tenía que corresponder a la borra de café. En estudios realizados

por López (2018)<sup>110</sup> en donde se hicieron briquetas a partir de la borra del café y almidón de yuca como aglomerante, se estableció una composición másica de 72.68% como óptima para la borra de café dentro de la briqueta,<sup>111</sup> entonces se decidió establecer un rango entre 60-80% para la composición de borra de café dentro del combustible sólido, debido a que es un rango de composiciones que además de priorizar la composición de la borra, también permite analizar el impacto del aglomerante sobre las propiedades finales de la briqueta, esto también resultado de las pruebas experimentales realizadas, en donde a estas composiciones se obtuvieron briquetas con una mejor respuesta a nivel físico<sup>112</sup>. Esto como indicativo de que es el residuo del cual se quieren aprovechar las propiedades, entre las cuales se quiere resaltar su poder calorífico, el cual se encuentra entre 24.91 MJ/Kg y 29.01 MJ /Kg de borra seca.<sup>113</sup>

Con respecto a los porcentajes para el aglomerante y el agua, mediante búsquedas bibliográficas en donde, por ejemplo en estudios realizados por López (2018) se estableció un valor óptimo de 12.82% para el almidón de yuca y de 14.5% para el agua<sup>114</sup>; también según rangos óptimos para el uso de almidón de yuca de entre 10-20% y mediante los experimentos realizados, se establecieron valores entre 10-20% para el aglomerante en este caso el almidón de yuca y de 20-30% para el agua utilizada en la mezcla; cabe resaltar que se hicieron pruebas para la elaboración de una briqueta de 100% borra de café, sin embargo, la presión otorgada por la prensa no es suficiente para la compactación de la materia prima, para la compactación o peletización del combustible a partir de únicamente borra de café se necesitan entre más de 100 Mpa<sup>115</sup> y la prensa con la cual se desarrollaron las briquetas posee una presión de 10.34Mpa; por ende, se justifica el uso del aglomerante que, como ya se ha mencionado, tiene como función facilitar la compactación de la mezcla.

A continuación, se muestra en la tabla 28 las formulaciones en porcentajes másicos obtenidas según el diseño de experimentos:

---

<sup>110</sup> ANALUISA, Op. cit., p. 99

<sup>111</sup> ANALUISA, Op. cit., p. 99

<sup>112</sup> ANALUISA, Op. cit., p. 99

<sup>113</sup> Federación nacional de cafeteros de Colombia; Avances técnicos cenicafe 393; Los subproductos del café: Fuente de energía renovable; Nelson Rodríguez valencia, diego Antonio Zambrano franco; Marzo de 2010; Fecha de consulta 10 de marzo de 2019; ISSN-0120-0178; disponible en: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/351/1/avt0393.pdf>

<sup>114</sup> . ANALUISA, Op. cit., p. 99

<sup>115</sup> ANALUISA, Op. cit., p. 99

**Tabla 28.** Proporciones de cada uno de los experimentos a realizar.

Std	Borra de café	Aglomerante	Agua
1	0.8	0.1	0.1
2	0.75	0.12	0.12
3	0.7	0.1	0.2
4	0.66	0.12	0.22
5	0.65	0.2	0.15
6	0.65	0.15	0.2
7	0.6	0.2	0.2
8	0.6	0.15	0.25
9	0.6	0.1	0.3
10	0.55	0.2	0.25

**Fuente:** elaboración propia.

## **2.5 ELABORACIÓN DE LAS BRIQUETAS DE BORRA DE CAFÉ Y UN AGLOMERANTE**

En esta sección se procede la elaboración de las distintas briquetas de borra de café y almidón de yuca de acuerdo al diseño de experimentos realizado en el capítulo anterior. Para la elaboración de estas se siguió el mismo procedimiento mencionado en la figura 15.

## **2.6 BRIQUETAS ELABORADAS**

Teniendo en cuenta las diferentes formulaciones obtenidas por el diseño de experimentos y siguiendo el proceso de elaboración expuesto previamente, se elaboraron las diferentes briquetas de borra de café y almidón de yuca. Los resultados se muestran a continuación.

- **Briqueta 1 (Borra de café-80%, Almidón-10%, Agua-10%)**

**Figura 23.** Briqueta 1.



**Fuente:** elaboración propia.

- **Briqueta 2 (Borra de café-75%, Almidón-12.5%, Agua-12.5%)**

**Figura 24.** Briqueta 2.



**Fuente:** elaboración propia.

- **Briqueta 3 (Borra de café-70%, Almidón-10%, Agua-20%)**

**Figura 25.** Briqueta 3.



**Fuente:** elaboración propia.

- **Briqueta 4 (Borra de café-66.66%, Almidón-11.66%, Agua-21.66%)**

**Figura 26.** Briqueta 4.



**Fuente:** elaboración propia.

- **Briqueta 5 (Borra de café-65%, Almidón-20%, Agua-15%)**

**Figura 27.** Briqueta 5.



**Fuente:** elaboración propia.

- **Briqueta 6 (Borra de café-65%, Almidón-15%, Agua-20%)**

**Figura 28.** Briqueta 6.



**Fuente:** elaboración propia.

- **Briqueta 7 (Borra de café-60%, Almidón-20%, Agua-20%)**

**Figura 29.** Briqueta 7.



**Fuente:** elaboración propia.

- **Briqueta 8 (Borra de café-60%, Almidón-15%, Agua-25%)**

**Figura 30.** Briqueta 8.



**Fuente:** elaboración propia.



- **Briqueta 9 (Borra de café-60%, Almidón-10%, Agua-30%)**

**Figura 31.** Briqueta 9.



**Fuente:** elaboración propia.

- **Briqueta 10 (Borra de café-55%, Almidón-20%, Agua-25%)**

**Figura 32.** Briqueta 10.



**Fuente.** Elaboración propia.

### **3. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS BRIQUETAS DE BORRA DE CAFÉ ELABORADAS**

La caracterización de las briquetas de borra de café construidas es una parte importante dentro del desarrollo del trabajo ya que va a permitir concluir la eficiencia del combustible sólido y que tan amigable o no es con el medio ambiente. Propiedades como el poder calorífico y la caracterización del gas que emite la briketa de borra de café a la hora de su combustión son características fundamentales para el proyecto y las respectivas conclusiones que se van a evidenciar más adelante.

Muchas de las propiedades que se van a desarrollar en este capítulo van a ser comparadas con la NTC 2060 <sup>116</sup> la cual es la norma para la briketa como combustible, varios de los procesos se hicieron basados en la norma mencionada anteriormente y otras incluidas dentro de la misma.

Propiedades como contenido de humedad, cenizas, carbono fijo material volátil se calcularon a nivel laboratorio en las instalaciones del Sena sede tecnoparque línea biotecnología y nanotecnología, para el proceso de estas propiedades se implementó la mufla y las temperaturas requeridas para los destinos procesos.

El poder calorífico se determinó mediante una fórmula encontrada en revisiones bibliográficas que más adelante se explicara.

Para el análisis del gas de combustión mediante un cromatógrafo de gases se realizaron en los laboratorios ASINAL S.A.S en Bogotá D.C, para este proceso se hizo una inversión económica para la obtención de los resultados. La única prueba mecánica como la resistencia al aplastamiento se tuvo la necesidad de buscar con taller mecánico que facilitó una máquina universal para obtener los resultados.

Para cada propiedad analizada a continuación se realizaron dos replicas.

#### **3.1 HUMEDAD**

El contenido de humedad se realizó bajo la Norma Técnica Colombiana NTC 1872<sup>117</sup>, la cual muestra el procedimiento experimental y la fórmula para el cálculo de esta propiedad.

La determinación del contenido de humedad se hizo en base al diagrama de flujo mostrado en el anexo A. En donde se muestra el proceso para la determinación de la propiedad.

---

<sup>116</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Briquetas combustibles para uso doméstico. NTC 2060. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 1998. 9p

<sup>117</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Humedad total en carbón. NTC 1872. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 2006. 19p

A continuación, se muestra la fórmula con la cual se reportan los datos obtenidos para el contenido de humedad:

**Ecuación 6.** Determinación del contenido de humedad.

$$\%H = \frac{\text{peso perdido}}{\text{peso de la muestra}} \times 100$$

**Fuente:** INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Humedad total en carbón. NTC 1872. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 2006. 19p

**Tabla 29.** Porcentaje de humedad de las briquetas.

<b>Briquetas de Borra de café</b>	<b>(%) Humedad</b>
Briqueta 1	5.16 ± 1.83%
Briqueta 2	6.05 ± 0.46%
Briqueta 3	8.58 ± 0.76%
Briqueta 4	13.38 ± 0.89%
Briqueta 5	6.87 ± 0.55%
Briqueta 6	7.41 ± 1.35 %
Briqueta 7	7.52 ± 1.14%
Briqueta 8	11.83 ± 2.25%
Briqueta 9	16.79 ± 1.47%
Briqueta 10	14.15 ± 0.96%

**Fuente:** elaboración propia

### 3.2 CONTENIDO DE CENIZAS

Para la determinación del contenido de cenizas total de las briquetas de borra de café se realizó el protocolo establecido en la Norma Técnica Colombiana NTC 1859<sup>118</sup>.

<sup>118</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Determinación de cenizas en muestras de carbón y coque. NTC 1859. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 2011. 9p

Para cálculo de cenizas totales se empleó la ecuación 7. Los datos e reportan en la tabla 30.

**Ecuación 7. Porcentaje de cenizas Totales.**

$$\%C = \frac{\text{Peso de cenizas}}{\text{Peso muestra}} \times 100$$

**Fuente:** INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Determinación de cenizas en muestras de carbón y coque. NTC 1859. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 2011. 9p

**Tabla 30.** Porcentaje de cenizas por briqueta.

Briquetas de borra de café	(%) Cenizas
Briqueta 1	1.75 ± 0.059%
Briqueta 2	1.64 ± 0.15%
Briqueta 3	1.53 ± 0.091%
Briqueta 4	1.46 ± 0.036%
Briqueta 5	1.43 ± 0.075%
Briqueta 6	1.43 ± 0.074%
Briqueta 7	1.32 ± 0.081%
Briqueta 8	1.42 ± 0.017%
Briqueta 9	1.31 ± 0.027%
Briqueta 10	1.22 ± 0.084%

**Fuente:** elaboración propia.

### 3.3 MATERIAL VOLÁTIL

La materia volátil para las briquetas es un aspecto importante como se ha venido enunciando durante todo el trabajo, en este caso se realizó un protocolo establecido por la Norma Técnica Colombiana NTC 2018<sup>119</sup>.

Para el cálculo de materia volátil total se empleó la ecuación 8.

<sup>119</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Análisis de materia volátil en muestras de carbón y coque. NTC 2018. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 2004. 9p

### Ecuación 8. Porcentaje de Materia Volátil

$$\%V = \frac{\text{Peso muestra}(\text{peso cenizas} - \text{peso recipiente})}{\text{Peso muestra}} \times 100$$

**Fuente:** INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Análisis de materia volátil en muestras de carbón y coque. NTC 2018. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 2004. 9p

Los resultados del contenido de materia volátil de las briquetas de borra de café se encuentran reportados en la tabla 31.

**Tabla 31.** Material volátil de las briquetas

Briquetas de borra de café	(%) Material Volátil
Briqueta 1	85.28 ± 1.17 %
Briqueta 2	84.39 ± 0.91 %
Briqueta 3	81.86 ± 1.54 %
Briqueta 4	77.06 ± 0.87 %
Briqueta 5	83.57 ± 0.57 %
Briqueta 6	83.03 ± 1.26 %
Briqueta 7	82.92 ± 2.08 %
Briqueta 8	78.61 ± 1.78 %
Briqueta 9	73.65 ± 2.91 %
Briqueta 10	76.29 ± 1.35 %

**Fuente.** Elaboración propia.

### 3.4 CARBONO FIJO

Para la determinación del carbono fijo de las briquetas de borra de café se realizó el protocolo indicado en la Norma Técnica Colombiana 2060<sup>120</sup>.

La fórmula que se menciona en la Norma Técnica Colombiana NTC 2060<sup>121</sup> y con la cual se reportan los datos obtenidos es la siguiente expresada en la ecuación 9.

<sup>120</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Briquetas combustibles para uso doméstico. NTC 2060. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 1998. 9p

<sup>121</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Briquetas combustibles para uso doméstico. NTC 2060. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 1998. 9p

**Ecuación 9.** Determinación del contenido de Materia Volátil

$$\text{Carbono fijo (CF): } 100 - (HuR + C + MV)$$

**Fuente.** INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Briquetas combustibles para uso doméstico. NTC 2060. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 1998. 9p

Donde:

HuR (%): Humedad relativa de la briqueta.

C (%): Contenido de cenizas de la briqueta.

MV (%): Contenido Materia Volátil de la briqueta.

Los resultados del contenido de carbono fijo se muestran reportados en la tabla 32, no se tuvieron en cuenta los valores de humedad para este cálculo debido a que en estudios realizados se determinó que este valor se excluye para el cálculo del contenido de carbono fijo.<sup>122</sup> Los resultados se muestran a continuación junto con algunos valores reportados para dicha propiedad.

---

<sup>122</sup> GARCIA, R., PIZARRO, C., LAVIN, A. G., & BUENO, J. L. Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. Fuel [En línea]; 2014; pp. 1139-1147 [Consulta: 10 octubre 2019] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113007771>

**Tabla 32.** Porcentaje de carbono fijo por briquetas.

<b>Briquetas de borra de café- almidón</b>	<b>(%) Carbono Fijo</b>
Briqueta 1	12.96%
Briqueta 2	13.96%
Briqueta 3	16.60%
Briqueta 4	21.47%
Briqueta 5	14.99%
Briqueta 6	15.54%
Briqueta 7	15.75%
Briqueta 8	19.69%
Briqueta 9	25.03%
Briqueta 10	22.49%

**Fuente:** elaboración propia.

### **3.5 PODER CALORÍFICO**

Para el cálculo de esta propiedad se decidió hacer uso de la ecuación 10, la cual es una relación basada en algunos estudios realizados a diferentes tipos de compuestos, con el fin de obtener una relación que permitiera calcular el poder calorífico basado en propiedades como el contenido de humedad, contenido de cenizas y contenido de materia volátil. Cabe resaltar que en este estudio se analizaron la mayoría de fórmulas empíricas desarrolladas a lo largo de la historia para el cálculo del poder calorífico superior, se hizo una comparación con una recopilación de datos obtenidos de poderes caloríficos de compuestos que han sido obtenidos a partir de pruebas experimentales.<sup>123</sup>

---

<sup>123</sup> GARCIA, R., PIZARRO, C., LAVIN, A. G., & BUENO, J. L. Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. Fuel [En línea]; 2014; pp. 1139-1147 [Consulta: 10 octubre 2019] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113007771>

**Ecuación 10.** Poder calorífico superior.

$$HHV = 1.73 \times 10^4 - 117.51 \cdot A + 165.551 \cdot FC - 232.69 \cdot M$$

**Fuente.** GARCIA, R., PIZARRO, C., LAVIN, A. G., & BUENO, J. L. Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. Fuel [En línea]; 2014; pp. 1139-1147 [Consulta: 10 de octubre 2019] Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113007771>

Donde:

HHV: Poder calorífico superior. (kJ/kg)

A: Contenido de Cenizas. (%)

FC: Carbono Fijo. (%)

M: Humedad. (%)

Los resultados del poder calorífico se muestran reportados en la tabla 33, junto con algunos valores reportados para dicha propiedad.

**Tabla 33.** Poder calorífico de las briquetas.

<b>Briqueta de Borra de Café</b>	<b>kJ/kg</b>	<b>MJ/kg</b>
Briqueta 1	18040.36	18.04
Briqueta 2	18010.56	18.01
Briqueta 3	17872.22	17.87
Briqueta 4	17569.92	17.57
Briqueta 5	18014.61	18.01
Briqueta 6	17979.93	17.98
Briqueta 7	18001.71	18.00
Briqueta 8	17684.76	17.68
Briqueta 9	17382.49	17.38
Briqueta 10	17587.31	17.59

**Fuente:** elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 33, los valores más altos del poder calorífico que se dieron para las briquetas fueron de 18.01, 18.014 y 18.04 (MJ/kg) correspondientes a las briquetas 2, 5 y 1 respectivamente, sin embargo; cabe resaltar que los datos obtenidos para las demás briquetas no se alejan de los mencionados anteriormente, esto se debe a la influencia de la borra de café como materia prima y que el almidón, cumpliendo su función como aglomerante, no tiene



un peso tan impactante en la capacidad calorífica de la briqueta, sino más bien en sus capacidades físicas, como se ha venido comentando a lo largo del trabajo.

Estas briquetas (2,5 y 1) tienen composiciones de borra de café de 75%, 65% y 80% respectivamente, siendo la borra de café la materia prima con el poder de calorífico más alto, el porcentaje de este en la briqueta va a determinar gran parte de las capacidades calóricas de la misma, por ende se puede evidenciar que las briquetas con mayor composición másica de borra de café son aquellas que obtuvieron los poderes caloríficos más altos. Otro factor importante en este proceso de cálculo del poder calorífico superior es la humedad de cada una de las briquetas, esta humedad, como se pudo observar, influyó directamente en los valores mostrados en la tabla 29, a valores más altos de humedad la briqueta posee un poder calorífico menor, esto debido a que considerando que la evaporación es un proceso endotérmico, esta humedad disminuye el contenido de energía útil del combustible, y por ende, la capacidad y eficiencia en el proceso de combustión. Y es por esto que se obtienen poderes caloríficos más bajos a humedades más altas.<sup>124</sup>

En un estudio realizado por López (2018),<sup>125</sup> en donde se realizaron briquetas de borra de café y almidón de yuca como aglomerante, se realizaron dos procedimientos para la determinación del poder calorífico del combustible sólido<sup>126</sup>; el primero se basó en el uso de una bomba calorimétrica en donde obtuvieron un resultado de 17.21 MJ/kg;<sup>127</sup> y el segundo consistió en el uso de una ecuación de energía de alimentos, la cual se basa en propiedades expresadas en porcentaje como la humedad, cenizas, proteína, fibra y grasas, obteniendo un resultado de 17.62 MJ/kg para el poder calorífico del compuesto.<sup>128</sup> Cabe aclarar que los dos procedimientos mencionados anteriormente se realizaron para una briqueta que se componía de 72.68% de borra de café, 12.82% de almidón de yuca y 14.5% de

---

<sup>124</sup> GARCIA, R., PIZARRO, C., LAVIN, A. G., & BUENO, J. L. Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. *Fuel* [En línea]; 2014; pp. 1139-1147 [Consulta: 10 octubre 2019] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113007771>

<sup>125</sup> ANALUISA LÓPEZ, D. S., & HERNÁNDEZ GAVILANES, E. V. Diseño y construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal. [En línea] Trabajo de grado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sede: Riobamba Ecuador. Riobamba: 2018. [Consulta: 3 de agosto de 2019] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9206>

<sup>126</sup> ANALUISA LÓPEZ, D. S., & HERNÁNDEZ GAVILANES, E. V. Diseño y construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal. [En línea] Trabajo de grado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sede: Riobamba Ecuador. Riobamba: 2018. [Consulta: 3 de agosto de 2019] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9206>

<sup>127</sup> ANALUISA LÓPEZ, D. S., & HERNÁNDEZ GAVILANES, E. V. Diseño y construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal. [En línea] Trabajo de grado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sede: Riobamba Ecuador. Riobamba: 2018. [Consulta: 3 de agosto de 2019] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9206>

<sup>128</sup> ANALUISA LÓPEZ, D. S., & HERNÁNDEZ GAVILANES, E. V. Diseño y construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal. [En línea] Trabajo de grado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sede: Riobamba Ecuador. Riobamba: 2018. [Consulta: 3 de agosto de 2019] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9206>

agua, expresados en composiciones másicas<sup>129</sup>. Como se evidenció, los resultados son bastante similares a los obtenidos en este trabajo de grado, se presenta una desviación de los datos incluyendo a los determinados por López (2018)<sup>130</sup> de 0.2315%, lo que indica una desviación baja y resultados confiables de los poderes caloríficos obtenidos.

### 3.6 CROMATOGRAFÍA DE GASES

Antes de entrar en detalle acerca del análisis de los gases de combustión de la briqueta de borra de café y almidón, se decidió, mediante fuentes bibliográficas, establecer que compuestos se esperarían del análisis con cromatografía de gases, mediante el análisis elemental de las materias primas.

Para la borra de café, según Potip (2018)<sup>131</sup> y Kristanto (2018),<sup>132</sup> la borra de café está compuesta básicamente por carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y un pequeño porcentaje de azufre. En la tabla 34 se pueden ver los datos reportados por los autores mencionados anteriormente.

---

<sup>129</sup> ANALUISA LÓPEZ, D. S., & HERNÁNDEZ GAVILANES, E. V. Diseño y construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal. [En línea] Trabajo de grado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sede: Riobamba Ecuador. Riobamba: 2018. [Consulta: 3 de agosto de 2019] Disponible en: <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/9206>

<sup>130</sup> ANALUISA LÓPEZ, D. S., & HERNÁNDEZ GAVILANES, E. V. Diseño y construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal. [En línea] Trabajo de grado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sede: Riobamba Ecuador. Riobamba: 2018. [Consulta: 3 de agosto de 2019] Disponible en: <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/9206>

<sup>131</sup> POTIP, S., & WONGWUTTANASATIAN, T. Combustion characteristics of spent coffee ground mixed with crude glycerol briquette fuel. *Combustion Science and Technology*. [En línea]; 2018; 190(11), p. 2030-2043. [Consulta: 2 de noviembre de 2019] Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00102202.2018.1482888>

<sup>132</sup> KRISTANTO, G. A., & WIJAYA, H. Assessment of spent coffee ground (SCG) and coffee silverskin (CS) as refuse derived fuel (RDF). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. [En línea]; 2018; Vol. 195, No. 1, p. 012056 IOP Publishing. [Consulta: 2 de noviembre de 2019] Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/195/1/012056/meta>

**Tabla 34.** Análisis elemental para el café gastado (SPG) o borra de café.

Parámetro	SPG Potip <sup>133</sup>	SPG Kristanto <sup>134</sup>
Carbono (%)	54.61	43
Hidrógeno (%)	6.59	8.65
Oxígeno (%)	34.83	45.44
Nitrógeno (%)	3.97	1.41
Azufre (%)	0	1.60

**Fuente:** Potip, S., & Wongwuttanasatian, T. (2018). Combustion characteristics of spent coffee ground mixed with crude glycerol briquette fuel. *Combustion Science and Technology*, 190(11), 2030-2043. Y Kristanto, G. A., & Wijaya, H. (2018, December). Assessment of spent coffee ground (SCG) and coffee silverskin (CS) as refuse derived fuel (RDF). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 195, No. 1, p. 012056). IOP Publishing.

Para el almidón de yuca, según Messina (2015),<sup>135</sup> el almidón de yuca está compuesto es su mayoría por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, los datos mostrados por el autor mencionado anteriormente se muestran en la tabla 35.

**Tabla 35.** Análisis elemental para el almidón de yuca.

Parámetro	Almidón de yuca Messina <sup>136</sup>
Carbono (%)	44.4
Hidrógeno (%)	6.3
Oxígeno (%)	49.2
Nitrógeno (%)	0.1

**Fuente:** Messina, L. G., Bonelli, P. R., & Cukierman, A. L. (2015). Copyrolysis of peanut shells and cassava starch mixtures: Effect of the components proportion. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 113, 508-517.

El análisis elemental de las materias primas tiene como fin tener un indicio acerca de que compuestos pueden estar presentes en el gas de combustión de la briqueta, la combustión es una reacción química que se produce entre un

<sup>133</sup>POTIP, S., & WONGWUTTANASATIAN, T. Combustion characteristics of spent coffee ground mixed with crude glycerol briquette fuel. *Combustion Science and Technology*. [En línea]; 2018; 190(11), p. 2030-2043. [Consulta: 2 de noviembre de 2019] Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00102202.2018.1482888>

<sup>134</sup>KRISTANTO, G. A., & WIJAYA, H. Assessment of spent coffee ground (SCG) and coffee silverskin (CS) as refuse derived fuel (RDF). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. [En línea]; 2018; Vol. 195, No. 1, p. 012056 IOP Publishing. [Consulta: 2 de noviembre de 2019] Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/195/1/012056/meta>

<sup>135</sup>MESSINA, L. G., BONELLI, P. R., & CUKIERMAN, A. L. (2015). Copyrolysis of peanut shells and cassava starch mixtures: Effect of the components proportion. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. [En línea]; 2015; 113, p. 508-517. [Consulta: 2 de noviembre de 2019] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237015001023>

<sup>136</sup>MESSINA, L. G., BONELLI, P. R., & CUKIERMAN, A. L. (2015). Copyrolysis of peanut shells and cassava starch mixtures: Effect of the components proportion. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. [En línea]; 2015; 113, p. 508-517. [Consulta: 2 de noviembre de 2019] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237015001023>

material oxidable y oxígeno en presencia de algún tipo de energía que funciona como iniciadora de la reacción,<sup>137</sup> siendo así, los gases que se esperarían encontrar en el gas de combustión son: Monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, oxígeno, nitrógeno e incluso, si la borra de café tiene algún contenido de azufre dentro de su estructura, podrían esperarse óxidos de azufre en pequeñas cantidades.

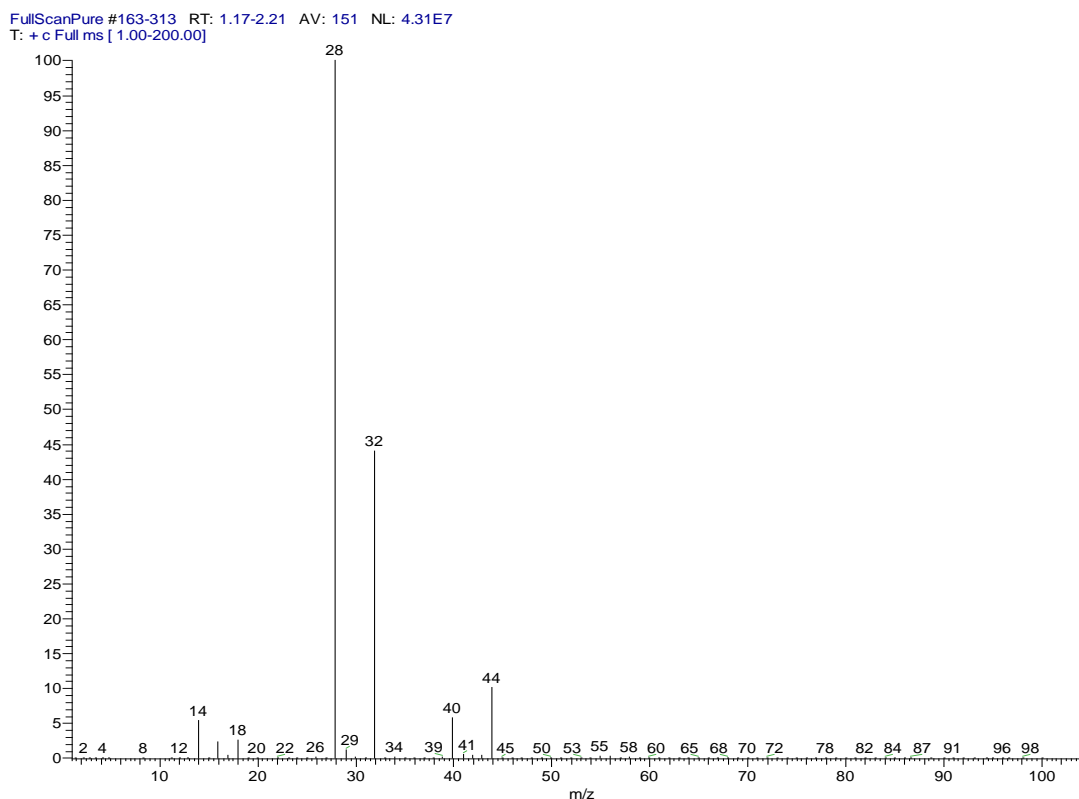
**3.7.1 Determinación de la cromatografía de gases.** Para la realización de la cromatografía de gases, se decidió hacer la combustión de la briqueta número 2, debido a que cuenta con un poder calorífico de 18.01 MJ/kg y además posee una resistencia al aplastamiento de 791.87 N que lo catalogan como la mejor briqueta del proyecto, el gas de combustión de esta briqueta fue el analizado mediante el método de cromatografía.

Debido a que no ocurrió una separación de los gases en la columna cromatográfica usada, el espectro de masas obtenido para la mezcla de gases presente en el gas de combustión analizado es una combinación lineal de los espectros de masas de sus componentes individuales. El análisis cualitativo del espectro obtenido para una inyección del gas puro (Figura 33) permite caracterizar la mezcla de gases producto de la combustión de la briqueta de café, pues los compuestos tienen iones característicos cuya presencia en el espectro de masas, indica, a su vez, su presencia en la muestra.

---

<sup>137</sup> CASTILLEJO MUÑOZ, R., PRIETO RUZ, T., & BLANCO LÓPEZ, Á. (2005). El lenguaje y las teorías de los alumnos en la comprensión de la combustión. *Enseñanza de las Ciencias*, (Extra),[En línea]; 2005;p. 1-7. . [Consulta: 28 de Octubre de 2019] Disponible en: [https://ddd.uab.cat/pub/edlc/edlc\\_a2005nEXTRA/edlc\\_a2005nEXTRAp154lenteo.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/edlc/edlc_a2005nEXTRA/edlc_a2005nEXTRAp154lenteo.pdf)

**Figura 33.** Espectro de masas para una inyección de gas de combustión analizado.



**Fuente:** elaboración propia.

De manera cualitativa se establece que al gas lo componen principalmente cuatro compuestos: nitrógeno ( $m/z$  28 y 14), dióxido de carbono ( $m/z$  44), oxígeno ( $m/z$  32) y agua ( $m/z$  18), que se encuentra en una concentración relativamente baja pero cuyo ion característico aún destaca entre los pocos iones con mayor abundancia. Se destaca además la presencia del ion a  $m/z$  40 con una abundancia relativa cerca del 5%, este ion es característico de un fragmento orgánico identificado como  $\text{CH}_2\text{CN}$ , cuyo precursor es el acetonitrilo, la emisión de acetonitrilo es un marcador específico de la combustión de biomasa (Holzinger et. al, 2001), y su elevada concentración en la muestra analizada es, con seguridad, provocada por la elevada presencia de enlaces carbono nitrógeno en el material de combustión de partida (briqueta de café).

Finalmente se realizó un esfuerzo para obtener estimados cuantitativos para la caracterización completa del gas de combustión analizado. La cuantificación se ejecuta sin estándares de los gases analizados, usando metanol como estándar interno y bajo la suposición de que la intensidad relativa con la que se detecta un

ion es proporcional a la concentración del precursor del ion en la muestra antes de fragmentarse, esta aproximación es buena para compuestos que presentan patrones de fragmentación sencillos con pocos iones predominantes, para moléculas con patrones de fragmentación más complejos se usan las abundancias relativas de los iones reportados en la literatura (espectro de masa de la librería del software del equipo) para estimar la concentración de la molécula usando solo el ion característico con el que fue identificado, los resultados para la cuantificación del gas se muestran en la tabla 36.

**Tabla 36.** Resultados cuantificación de compuestos de la muestra.

Compuesto	Formula estructural	Concentración (% v/v)	Incertidumbre* (+/- %)
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	61	2
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	6.15	0.05
Oxígeno	O <sub>2</sub>	25.8	0.8
Agua	H <sub>2</sub> O	1.69	0.07
Acetonitrilo	CH <sub>2</sub> CN	3	1
Hidrocarburos alifáticos	(CH <sub>3</sub> )(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> (CH <sub>3</sub> )	0.26	0.1
Hidrocarburos aromáticos	Sin fórmula generalizada	0.09	0.04
Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	0.9	0.02
Monóxido de nitrógeno	NO	0.098	0.006
Monóxido de carbono	CO	0.6	0.05
Tetrazina	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> N <sub>4</sub>	0.06	0.01

**Fuente:** elaboración propia.

Se puede observar en la tabla 36, que como se había mencionado anteriormente los compuestos que priman en el gas de combustión son el dióxido de carbono, el oxígeno y el nitrógeno, sin embargo, también hay presencia de otros compuestos en porcentajes menores, se destaca que la incertidumbre se obtuvo gracias a que las concentraciones fueron halladas por triplicado. También la presencia de óxidos, tanto de carbono como de nitrógeno, es indicador de que si hubo combustión de la briqueta.

Con respecto a la contaminación por la generación de dióxido de carbono; la briqueta está compuesta en su mayoría por borra de café la cual es considerada biomasa, esta biomasa no es generadora de dióxido de carbono, debido a que el aquel que produce es el mismo que consume a la hora de la realización de su

fotosíntesis, por ende, es un ciclo en donde la borra de café le devuelve al medio ambiente el dióxido de carbono que sus materias primas consumieron en el proceso de fotosíntesis.<sup>138</sup> Algo similar pasa con el almidón de yuca, el almidón es el lugar donde la plantas almacenan su energía en raíces, en este caso, de la yuca, por lo tanto, el almidón es una sustancia que se obtiene exclusivamente de los vegetales que lo sintetizan a partir del dióxido de carbono que toman de la atmósfera, del agua y del suelo.<sup>139</sup> De modo que a la hora de realizar la combustión el dióxido de carbono generado por el almidón es el mismo que uso para su síntesis<sup>140</sup>.

Por otra parte existe un problema con respecto al manejo de los aromáticos que hacen parte del gas de combustión, como se puede observar en la tabla 36, estos son considerados además de contaminantes perjudiciales para la salud humana, lo que implicaría que la briqueta de borra de café podría usarse en equipos que tengan sistemas de retención de partículas, con el fin de mitigar el impacto que tendría el gas de combustión sobre el entorno.

Como se mencionó anteriormente, gracias a la revisión bibliográfica acerca del análisis elemental de la borra de café y el almidón de yuca, la tabla 36 comprueba algunos de los componentes que se esperaba estuvieran presentes en el gas de combustión de la briqueta, se destaca el hecho de que no se presentan óxidos de azufre, ya que este último, tiene impactos indeseados sobre el medio ambiente y también sobre la salud humana, es considerado un gas tóxico e irritante.<sup>141</sup>

---

<sup>138</sup> econoticas.com *el periódico verde*. La biomasa no contamina. [Sitio Web]. [Consulta: 16 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://www.ecoticias.com/biocombustibles/72788/biomasa-contamina>

<sup>139</sup> FONSECA CUENCA, E. G., & TIERRA TINGO, L. F. *Desarrollo de un Proceso Tecnológico para la Obtención de Briquetas de Aserrín de Madera y Cascarilla de Arroz, y Pruebas de Producción de Gas Pobre*. [En línea] Trabajo de grado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sede: Riobamba Ecuador, Riobamba: 2011. [Consulta: 15 de agosto de 2019] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1883>

<sup>140</sup> FONSECA CUENCA, E. G., & TIERRA TINGO, L. F. *Desarrollo de un Proceso Tecnológico para la Obtención de Briquetas de Aserrín de Madera y Cascarilla de Arroz, y Pruebas de Producción de Gas Pobre*. [En línea] Trabajo de grado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sede: Riobamba Ecuador, Riobamba: 2011. [Consulta: 15 de agosto de 2019] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1883>

<sup>141</sup> Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR) España. SOX (OXIDOS DE AZUFRE). [Sitio Web]. [Consulta: 28 de octubre de 2019] Disponible en: <http://www.prtr-es.es/SOx-oxidos-de-azufre.15598.11.2007.html>

### 3.7 GRADO DE REACTIVIDAD

Esta propiedad depende de una relación entre material volátil y carbono fijo. En la tabla 37 se muestran los datos de las diez briquetas analizadas.

**Tabla 37.** Relación VM/FC grado de reactividad de las briquetas de borra de café.

<b>Briquetas de borra de café</b>	<b>VM/FC</b>
Briqueta 1	3.47
Briqueta 2	3.28
Briqueta 3	2.85
Briqueta 4	2.23
Briqueta 5	3.11
Briqueta 6	3.02
Briqueta 7	2.99
Briqueta 8	2.40
Briqueta 9	1.89
Briqueta 10	2.14

**Fuente:** elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 37, los valores más altos son para las briquetas 2, 5 y 1, con valores de 3.28, 3.11 y 3.47, respectivamente. Son las mismas briquetas con los poderes caloríficos más altos, por ende, se puede concluir que a mayor facilidad de encendido las briquetas de borra de café tienen mayor capacidad calorífica, esto explicado porque se necesita una menor cantidad de calor para poder llegar a la combustión, que también se ve influenciada por otra propiedad, la humedad, aspecto que ya se ha analizado anteriormente.

### 3.8 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Para determinar la resistencia a la compresión, se basó en la norma técnica colombiana NTC 2060,<sup>142</sup> la cual indica el procedimiento para determinar la resistencia a la compresión de briquetas de origen biomásico.

A continuación, en la tabla 38, se reportan los valores de fuerzas ejercidas para la destrucción de cada una de las briquetas elaboradas.

<sup>142</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Briquetas combustibles para uso doméstico. NTC 2060. 1 ed. Bogotá D.C.,; El instituto, 1998. 9p



**Tabla 38.** Resistencia a la compactación.

<b>Briquetas de borra de café</b>	<b>Fuerza (N)</b>
Briqueta 1	738.94
Briqueta 2	791.87
Briqueta 3	784.59
Briqueta 4	765.61
Briqueta 5	797.19
Briqueta 6	790.12
Briqueta 7	754.35
Briqueta 8	790.14
Briqueta 9	754.35
Briqueta 10	801.87

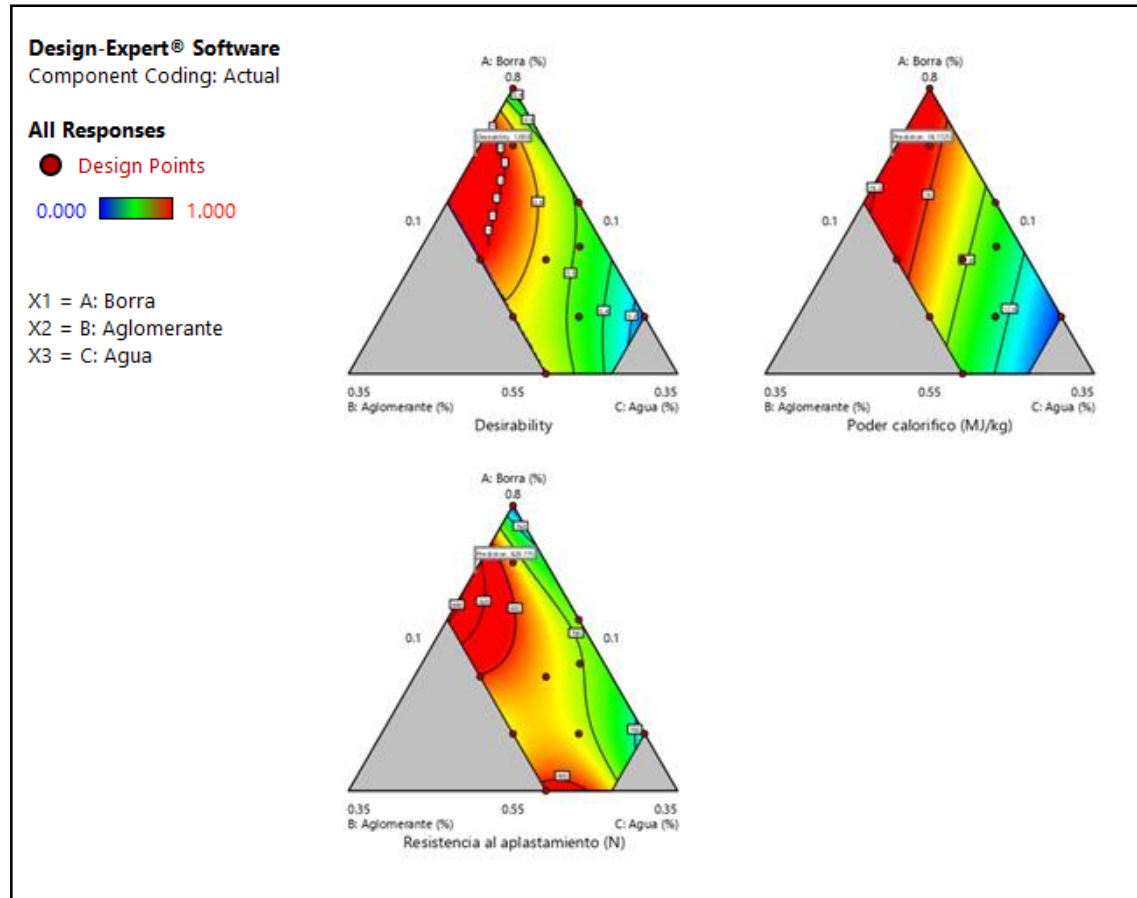
**Fuente:** elaboración propia.

En la tabla 38 se pueden evidenciar los datos obtenidos a partir de la resistencia a la compresión de cada briqueta, esta propiedad pretende mostrar que tan compactada esta la briqueta y si el almidón de yuca tuvo algún papel importante en estos resultados. Las briquetas con mayor capacidad de compresión son la que tienen en su composición porcentual una mayor cantidad de almidón de yuca; las briquetas 10 y 5 son las que obtuvieron los mayores datos, 801.87 N y 797.19 N, respectivamente y con cantidades de almidón de 20% cada una.

### **3.9 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Existen dos características importantes dentro de la caracterización hecha anteriormente para cada briqueta, estas son el poder calorífico y la resistencia al aplastamiento, las cuales son las encargadas de definir la mejor briqueta de borra de café de las diez analizadas. Según el diseño de mezclas Simplex Lattice realizado en el programa Design Expert el comportamiento de estas dos propiedades dentro del sistema de composiciones es el mostrado en la figura 32.

**Figura 34.** Comportamiento poder calorífico y resistencia al aplastamiento.



**Fuente:** elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 34, las partes rojas de la gráfica representan las zonas en donde la propiedad analizada tiene un valor más alto. La tendencia es que en aquellas briquetas donde el contenido de borra de café sea mayor y con un contenido de agua menor, tendrán un poder calorífico más alto debido a las grandes bondades caloríficas que posee esta materia prima, de los residuos que se generan durante el proceso de elaboración del café, este es el que presenta valores de poder calorífico más altos. También se puede observar que aquellas briquetas con mayor contenido de aglomerante dentro de su estructura presentan mejores condiciones para resistencia al aplastamiento. Luego de realizar el análisis gráfico mediante el programa, este a su vez permite concluir la mejor briketa del desarrollo, mediante un análisis de optimización-predicción, el programa concluye con una confianza del 95% que la mejor briketa es la número 2, con una composición de: Borra de café: 75%, Aglomerante: 12.5% y Agua: 12.5%. La briketa número 2 es la que, según los datos reportados, maneja un mejor balance entre sus propiedades químicas y mecánicas, ya que cuenta con un poder calorífico de 18.01 MJ/kg.

## **4. COMPARACIÓN BIBLIOGRÁFICA CON OTROS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DE TIPO BIOMÁSICO**

En este capítulo se realizó una comparación bibliográfica entre la briqueta de borra de café y aglomerante con otros combustibles sólidos, como la leña y el carbón vegetal. Propiedades como, contenido de humedad, contenido de cenizas, material volátil, carbono fijo y poder calorífico; fueron características que se tuvieron en cuenta a la hora de generar dicha comparación, esto con el fin de evidenciar si la briqueta de borra de café y un aglomerante puede llegar a sustituir otros combustibles sólidos, ya que además de estar compuesto por residuos agroindustriales, sea amigable con el medio ambiente.

Para poder realizar la comparación de los combustibles ya mencionados anteriormente, primero se conocerán las características tanto físicas como fisicoquímicas de los combustibles que será comparado con nuestro combustible sólido alternativo.

### **4.1 COMPARACIÓN DE LA BRIQUETA DE BORRA DE CAFÉ Y ALMIDÓN DE YUCA CON OTROS COMBUSTIBLES SÓLIDOS**

En el capítulo anterior se realizó la caracterización de las briquetas de borra de café y el almidón de yuca, con el fin de comparar los resultados experimentales con datos de otros combustibles sólidos de manera bibliográficamente, con esto lo que se quiere saber es que tan eficiente es la borra de café.

**4.1.1 Comparación de la briqueta de borra de café con la leña y carbón vegetal.** A continuación, en la tabla 39, se van a mostrar los datos obtenidos en el capítulo anterior, de acuerdo a las pruebas realizadas, como, contenido de humedad, cenizas, material volátil, carbono fijo, poder calorífico. Estos datos se compararon con valores de combustibles como la leña y el carbón vegetal de manera bibliográficamente.

**Tabla 39.** Comparación de la briqueta de borra de café y almidón de yuca con la leña y el carbón vegetal.

<b>Pruebas</b>	<b>Briqueta de borra de café 1</b>	<b>Carbón vegetal</b>	<b>Leña</b>
Contenido de Cenizas (%)	1.7486±0,059%	0.5-7.5	0.4-1.2
Material volátil (%)	85.28	20.9-32.1	NR
Carbono fijo (%)	12.9659	54,6-90	NR
Contenido de Humedad (%)	5.16±1,83%	5-10	8.45-11.2
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	NR	0,20-0,26	0.035-0.571
Poder calorífico (KJ/Kg)	18040.3635	28500-35600	17800-18700

**Fuente:** elaboración propia

Como se mencionó anteriormente se compararon los datos de manera bibliográficamente con la briqueta número 1, ya que esta fue la que obtuvo los mejores resultados, obteniendo un valor para el poder calorífico de 18.04 MJ/kg, esta satisface energéticamente aquellos procesos en los cuales se use leña como combustible ya que esta última produce energía en un rango de 17.8-18.7 MJ/Kg. Sin embargo, con respecto al carbón vegetal, este último posee un poder calorífico de entre 28.5-35.6 MJ/Kg y por ende la briqueta no satisface energéticamente los procesos en los que se use carbón vegetal como combustible.

**4.1.2 Comparación de la briqueta de borra de café con biocombustibles sólidos.** A continuación, en la tabla 40, se observa el poder calorífico de diferentes tipos de biomasa, donde HHV y LHV, significa poder calorífico superior y poder calorífico inferior, respectivamente y también se comparan propiedades como contenido de humedad y de cenizas.

**Tabla 40.** Características de combustión de algunos combustibles sólidos.

Biocombustibles sólidos	Contenido de humedad (%)	Cenizas (%)	HHV1 (MJ/Kg)	LHV2 (MJ/Kg)
Phalaris arundinacea	4,7	5,5	19,5	-
Paja de trigo	8,6	7,9	17,617	-
Residuos de algodón	4,8	3,1	19,652	-
Residuos de soya	5,8	4,7	18,77	-
Residuos sólidos municipales	-	4,4	-	17,2
Pellets de madera	7,6	0,5	-	19
Briqueta de borra de café	5.16	1.7486	18	-

**Fuente:** VARGAS LAZO, A. M. Estudio de la producción de pellets a partir de borra de café (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá).

En la tabla 41, se muestra una comparación de dos propiedades que influyen de manera importante en un combustible de biomasa: el poder calorífico y el contenido de humedad. Comparando los datos de la briqueta 1 desarrollada en este proyecto, se puede evidenciar que se está dentro de los rangos de estos biocombustibles sólidos, destacando que el contenido de cenizas es menor para la briqueta en comparación los demás a excepción de los Pellets de madera, con respecto a los valores del poder calorífico de puede observar que se está muy cerca del valor de los otros combustibles, por ende: se podrían mediante la briqueta de borra de café satisfacer energéticamente aquellos procesos en donde sean utilizados y además garantizando la producción de energía limpia y eficaz.

**Tabla 41.** Cuadro resumen de principales propiedades de los combustibles e biomasa.

Combustible	PCI (poder calorífico inferior)		Humedad (%)
	(KJ/Kg)	(KWh/Kg)	
Pellets	17.000-19.000	4,7-5,3	<15
Astillas	10.000-16.000	2,8-4,4	<40
Leña	14.400-16.200	4,0-4,5	<20
Briquetas	17.000-19.000	4,7-5,3	<20
Hueso de aceituna	18.000-19.000	5,0-5,3	7-12
Cascara de frutos secos	16.000-19.000	4,4-5,3	8-12

**Fuente:** III PLAN ENERGÉTICO DE NAVARRA HORIZONTE 2020, Combustibles de biomasa tipos y características, febrero 2015, Consultado en: 15 de oct. de 19, [En línea], Disponible en: <https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/45C7C274-B3F4-4C91-B8B9-23259B8F5B39/0/201501Combustiblesdebiomasa.pdf>

En la tabla 41, se puede observar que, con respecto al poder calorífico, las briquetas en general poseen un PCI mayor en comparación con la leña tradicional en 2000 KJ/Kg, también se observa que todas las briquetas de borra de café que se elaboraron están en el rango de poder calorífico de las briquetas tradicionales y que los valores de humedad también se encuentran en el rango que se muestra en la tabla para combustibles en forma de briquetas.

**4.1.3 Emisión de gases.** Uno de los aspectos más importantes en el desarrollo de combustibles sólidos es la contaminación al aire que estos mismos producen al momento de su combustión, por eso se realizó un estudio mediante la cromatografía de gases para determinar los compuestos que se encuentran presentes en el gas de combustión de la briqueta como ya se enuncio anteriormente, es importante comparar estos resultados con los de otro tipo de biocombustibles, sin embargo; no se han hecho muchos estudios acerca de la cuantificación que de los gases que combustibles como la leña y el carbón generan. Se encontró un estudio realizado por El Departamento de Ingeniería Mecánica de Tailandia, (Potip, 2018)<sup>143</sup> en donde

<sup>143</sup> POTIP, Sarupop; Combustion characteristics of spent coffee ground mixed with crude glycerol briquette fuel; [en línea]; 2018; [consultado 30 de septiembre de 2019]; disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00102202.2018.1482888>

<sup>143</sup> KRISTANTO, GA; Assessment of spent coffee ground (SCG) and coffee silverskin (CS) as refuse derived fuel (RDF); [en línea]; 2018; [consultado 3 de octubre de 2019]; Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/195/1/012056>

realizaron una briqueta de borra de café usando glicerol como aglomerante, en este estudio se realizó un análisis de gases para determinar los componentes de los gases de combustión que esta briqueta producía, en la tabla 42, se muestran los valores obtenidos en el estudio (BBG) junto los valores obtenidos para la briqueta de borra de café y almidón de yuca (BBY) desarrollada en este proyecto

**Tabla 42.** Comparación emisión de gases. BBG Y BBY

<b>Compuestos</b>	<b>BBG ( % v/v)<sup>144</sup></b>	<b>BBY (%v/v)</b>
CO	1.262	0.6
NOx	38	1
HC	270	-
O2	21	25.8
CO2	19	6.15

**Fuente:** elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 42, los valores para BBG son mayores que los evidenciados para BBY a excepción del contenido de oxígeno, lo que es un indicativo de que la briqueta de borra de café en lo que a emisiones respecta es una alternativa más amigable con el medio ambiente que la briqueta que usa como aglomerante el glicerol. Esto se puede dar debido a que el almidón de yuca usado como aglomerante en este proyecto es considerado como biomasa, lo que resalta la importancia de la naturaleza de las materias primas que puede influir en aspectos cruciales, como en este caso es la contaminación del aire.

**4.1.4 Comparación con la norma técnica colombiana NTC 2060.** La norma técnica colombiana NTC 2060, es la cual indica las distintas pruebas y requisitos, que se deben realizar para la elaboración de una briqueta de uso doméstico, como se he venido enunciando durante el trabajo, esta norma es la base de varias pruebas que se le realizaron a la briqueta como el contenido de humedad, contenido de cenizas, contenido de materia volátil y carbono fijo, a continuación, en la tabla 43, se muestran aquellos requisitos con las que tiene que cumplir una briqueta para ser usada en el hogar, además de clasificarlas en dos grupos: 1 y 2.

<sup>144</sup> *Ibíd.*, p. 25

**Tabla 43.** Requisitos de las briquetas domesticas

Propiedad	Tipo 1	Tipo 2	Briqueta de borra de café
Poder Calorífico, en KJ/kg, mínimo	21000	12500	18040.3635
Cenizas, en % m/m, máximo	30	30	1.75±0.059%
Carbono fijo, % en masa, minino	50	-	12.9659
Materia volátil, en % máximo, m/m	15	15	85.28
Humedad, % máximo	2.5	2.5	5.16±1.83
Contenido de azufre, en % m/m, máximo	1.0	1.0	0

**Fuente:** elaboración propia, Con base en: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Briquetas combustibles para uso doméstico. NTC 2060. 1 ed. Bogotá D.C, El instituto, 1998. 9p

Los dos tipos de briquetas se clasifican según su origen, el de tipo 1 proviene del carbón mineral y las del tipo 2 son briquetas elaboradas de cualquier otro tipo de procedencia de tipo biomásico.<sup>145</sup> En la tabla 43 se compararon los resultados de la briqueta número 1 de borra de café con los requisitos según la norma técnica colombiana NTC 2060, y se observó que se cumplieron todos los requisitos menos en la prueba de material volátil, la briqueta se podría clasificar de tipo 2 debido a que es de origen biomásico. También se destaca que gracias a la cromatografía de gases realizada para el gas de combustión, se pudo observar que no hay óxidos de azufre en el gas, lo que permite concluir que la briqueta de borra de café y almidón de yuca no tiene contenido de azufre en su estructura. La briqueta no cumple con la norma para ser usada de manera doméstica, sin embargo; puede tener una aplicabilidad en la industria como combustible de algún tipo de maquinaria como

<sup>145</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Briquetas combustibles para uso doméstico. NTC 2060. 1 ed. Bogotá D.C, El instituto, 1998. 9p



calderas, pero sería necesario el estudio en este campo para observar que tan viable es la briqueta de borra de café en este tipo de aplicabilidad.

## 5. CONCLUSIONES

- Según la matriz de Pugh el almidón de yuca muestra las mejores condiciones para ser usado como aglomerante en la briqueta. Se observó que con respecto a los otros aglomerantes analizados, este posee propiedades fisicoquímicas como contenido de humedad, contenido de cenizas y una alta capacidad de aglomeración, que lo identifican como el aglomerante más apto para la elaboración de la briqueta.
- La mejor briqueta del estudio es la briqueta número dos, considerando que corresponde a una composición de 75 % borra de café, 12.5% almidón de yuca y 12.5% agua; con un poder calorífico de 18.01 MJ/kg y una resistencia al aplastamiento de 791.87 N. Fue la briqueta escogida mediante el diseño de experimentos de mezclas Simplex Lattice, esto corroborando el impacto en cuanto a poder calorífico que tiene la borra de café como materia prima y el impacto estructural que le da el aglomerante a la briqueta. Esta briqueta satisface energéticamente aquellos procesos en los cuales se use leña ya que esta última produce energía en un rango de 17.8-18.7 MJ/Kg.
- La briqueta de borra de café y almidón de yuca no es viable como biocombustible sólido alternativo doméstico, ya que no cumple con la norma técnica colombiana NTC 2060 para contenido de materia volátil y humedad, por ende no puede ser usada de forma doméstica. Además de poseer componentes tóxicos en su gas de combustión, como acetonitrilo e hidrocarburos en una concentración de 3%v/v y 0.35%v/v respectivamente, los cuales según la Resolución No 2254 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para calidad del aire, están fuera del rango de emisión permitido.
- La briqueta de borra de café y almidón de yuca puede ser usada como combustible sólido en procesos industriales que usen calderas con una capacidad entre 10 y 20 BHP. Estas calderas deben tener un sistema de retención y purificación de gases de combustión, con el fin de cumplir los requerimientos de la Resolución No 2254 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

## 6. RECOMENDACIONES

- Es necesario el uso de un aglomerante para poder desarrollar la estructura de la briqueta, por eso se incluyó un experimento con el uso de 100% borra de café con el fin de medir la capacidad que tenía la borra de café para ser prensada en ausencia de un aglomerante. Por eso se recomienda el uso de una prensa hidráulica que tenga la capacidad de ejercer una presión mayor, para evaluar la briqueta de borra de café sin aglomerante.
- Se recomienda probar valores de temperatura de combustión diferentes con el fin de medir la influencia de esta variable dentro del contenido de materia volátil de la briqueta de borra de café.
- Se recomienda llevar el proceso de elaboración de la briqueta de borra de café y almidón de yuca a escala piloto, con el fin de visualizar el proceso de forma industrial, teniendo en cuenta balances de materia y de energía que posteriormente influirán en el análisis financiero del proceso.
- Se recomienda un método más eficiente de secado, con el fin de promover la capacidad calorífica de la briqueta sin tener una influencia significativa en los costos que tenga el proceso.
- Es importante realizar un análisis financiero para ver qué tan viable es la elaboración de la briqueta de borra de café y almidón, con respecto a otros combustibles como los mencionados a lo largo del trabajo.
- Se recomienda diseñar un sistema de retención y purificación de gases con el fin de darle uso a la briqueta de borra de café y almidón de yuca de forma industrial.

## BIBLIOGRAFÍA

ALARCON SOLORZANO Shirley Mireya; Elaboración de briquetas a partir de desechos de rosas y papel reciclado; [en línea]; trabajo de titulación., modalidad proyecto de investigación para la obtención del título de ingeniería química; Universidad central del Ecuador; Quito; 2017; [Consultado 3 de noviembre de 2019]; Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13003/1/T-UC-0017-0059-2017.pdf>

ALEGRÍA EZQUERRA, Eduardo. Cardiología. En: REVISTA ESPAÑOLA DE CARDIOLOGÍA. vol. 62, no. 1, p. 109 [Consulta: 20 de febrero 2019] ISBN 0300-8932 Disponible en: [www.clinicalkey.es](http://www.clinicalkey.es)

VERA, Alexander; Diseño de briquetas ecológicas para la generación de energía calórica y mejoramiento de ecosistemas en el corregimiento de nabusimake, municipio de pueblo cesar; [en línea]; trabajo de grado para optar el título de ingeniero ambiental; Universidad nacional abierta y a distancia-UNAD; Publicado en Valledupar; 2014; [Consultado 25 marzo 2019]; Disponible en: <https://stadium.unad.edu.co/preview/UNAD.php?url=/bitstream/10596/61111/1/92694041.pdf> p 22

ALVIS, Armando; Análisis físico-químico y morfológico de almidones de ñame, yuca y papa y determinación de la viscosidad de las pastas; [en línea]; 2008; [Consultado 26 de septiembre de 2019]; Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v19n1/art04.pdf>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice For Proximate Analysis of Coal and Coke. ASTM D3172-13. 1 ed. West Conshohocken, 2013. 4p

AMILCAR, Sergio; Rendimiento y calidad del carbón vegetal elaborado en horno tipo fosa con subproductos forestales de *Piscidia piscipula*(L.) Sarg. Y *Lonchocarpus castilloi* Standl. En Campeche; ;[En línea]; Titulo para obtener el grado de maestría en ciencias forestales; Universidad Autónoma De Nuevo León; Linares, Nuevo León; Marzo, 2013; Consultado en: 25 de septiembre de 2019; Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/3221/1/1080256611.pdf>.

ANALUISA Darwin; Diseño y construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal; [en línea]; trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de ingeniero mecánico; Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; Riobamba-Ecuador; 2018; [Consultado 10 de agosto de 2019]; disponible en: <http://201.218.5.85/bitstream/123456789/9206/1/15T00682.pdf>; p. 8

ANGARITA, Fernando, AGUDELO, Rafael. BORRA DE CAFÉ COMO MATERIAL ADSORBENTE PARA LA REMOCIÓN DE CROMO (III). [En línea] Proyecto de trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Ambiental. Universidad Libre Sede Bogotá. Bogotá: 2013. [Consultado: 20 de marzo 2019] Disponible en: <https://repository.unilivre.edu.co/bitstream/handle/10901/11292/BORRA%20DE%20CAF%C3%89%20COMO%20MATERIAL%20ADSORBENTE%20PARA%20LA%20REMOCI%C3%93N%20DE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, Materiales aglomerantes; Escuela técnica superior de ingenieros en topografía, geodesia y cartografía,; consultado en 11 de marzo de 2019; p 32, [Consultado: 20 de marzo 2019], Disponible en: <https://www.topografia.upm.es/>

CALLE, H. Subproductos del Café. Boletín Técnico N 6 Chinchina Colombia Cenicafe. (1977), 84.

[https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos\\_cafe/manejo\\_de\\_subproductos/P1](https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos/P1)

CERVONE, Frank; Managing digital libraries: the view from 30,000 feet, applied digital library project management Using Pugh matrix analysis in complex decision-making situations; [en línea]; 2009; [consultado 20 de septiembre de 2019];

Disponible en:

<https://pdfs.semanticscholar.org/1206/c49198d48319947a7f140199bb951c375c07.pdf>

CORREA, J. L.G., et al. Drying of spent coffee grounds in a cyclone dryer. Coffee Science, [en línea].2013, Periodicidad 9 (1) pp. 65-74. [Consultado el 1 de septiembre de 2019] Disponible en: <https://www.openaire.eu/search/publication?articleid=od>

ESPARZA, F. Combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. [en línea] 2012

[Consulta: 14 de febrero 2019] Disponible en:

[http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros\\_documentos/combustibles.pdf](http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/combustibles.pdf)

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA; Avances técnicos cenicafe 393; Los subproductos del café: Fuente de energía renovable; Nelson Rodríguez Valencia, Diego Antonio Zambrano Franco; Marzo de 2010; Fecha de consulta 10 de marzo de 2019; ISSN-0120-0178; disponible en: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/351/1/avt0393.pdf>

FELIX Jorge; Catedra Maquinas Térmicas: Capítulo 1 Poder Calorífico; [En línea]; Universidad tecnológica nacional facultad regional Mendoza; [Consultado 15 de agosto de 2019]; disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas\\_termicas/01-poder\\_calorifico.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf)

FONSECA Édison; Desarrollo de un Proceso Tecnológico para la Obtención de Briquetas de Aserrín de Madera y Cascarilla de Arroz, y Pruebas de Producción de Gas Pobre; [en línea]; Tesis de grado para optar el título de ingeniero mecánico; Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; Riobamba-Ecuador; 2011; [Consultado 1 de septiembre de 2019]; disponible en: [file:///C:/Users/K555L/Downloads/15T00495%20\(5\).pdf](file:///C:/Users/K555L/Downloads/15T00495%20(5).pdf)

FRANCISCO Marcos Martín; Pélets y briquetas; Ecología; [Consulta: 10 de marzo de 2019] Disponible en: [http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo\\_2293\\_9990.pdf](http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf); 57; p. 57

GARCIA, R. COMBUSTION Y COMBUSTIBLES. [en línea] 2001 [Consulta: 14 de febrero 2019] Disponible en: <https://www.coursehero.com/file/29730408/Combustion-y-combustiblespdf/>  
GARCIA, R., PIZARRO, C., LAVIN, A. G., & BUENO, J. L. Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. Fuel [En línea]; 2014; pp. 1139-1147 [Consulta: 10 octubre 2019] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113007771>

HARGASSNER Especialista en biomasa. [Sitio Web] Astillas, un recurso para producir energía de biomasa. [Consulta: 14 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://www.hargassner.es/2015/11/20/astillas-un-recurso-para-producir-energia-de-biomasa/>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C: El instituto 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

\_\_\_\_\_.Briquetas combustibles para uso doméstico. NTC 2060. 1 ed. Bogotá D.C.; El instituto, 1998. 9p

JOHANNA Aristizabal; Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca; Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación; [en línea]; Boletín de servicios agrícolas de la FAO 163; [consultado en 15 de marzo de 2019]; p. 39; disponibilidad en: <http://www.fao.org/3/a1028s/a1028s.pdf>; ISSN 1020-4334

KRISTANTO, GA; Assessment of spent coffee ground (SCG) and coffee silverskin (CS) as refuse derived fuel (RDF); [en línea]; 2018; [consultado 3 de octubre de 2019]; Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/195/1/012056>

LOPEZ, M., MONGLIGARDI, N., & Checkley, N. (2014). Chronic obstructive pulmonary disease by biomass smoke exposure. Obtenido de national Library of Medicine: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24718533>

MARCOS Eduardo García alam; Diseño de proceso y de planta piloto para fabricación de briquetas de aserrín; [en línea]; Tesis para optar el título de ingeniero industrial y de sistemas; Universidad de Piura; Piura; Enero 2014; [Consultado en 10 de marzo de 2019]; Disponible en: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1829/ING\\_535.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1829/ING_535.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

MEJIA, Fabiola; Implicaciones del uso de la leña como combustible doméstico en la zona rural de Usme. [En línea]. Trabajo de grado para optar al título de magister en medio ambiente y desarrollo. Universidad Nacional De Colombia. Colombia 2011. Consultado en: 18 de sept. De 19. Disponibilidad en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4125/1/905057.2011.pdf>

MERO, Ricardo and MAMANI Pari, RENZO Henry. OBTENCIÓN DE BIOGÁS COMO FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE A PARTIR DE LOS SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ. En: REVISTA INVESTIGACIONES ALTOANDINAS - JOURNAL OF HIGH ANDEAN INVESTIGATION. Dec 27, .vol. 15, no. 2. ISSN 2306-8582 [Consulta: 20 de marzo 2019] Disponible en: <https://www.cenicafe.org/>

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolucion No 2254 "Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones"; [en línea]; Colombia 2017. Consultado en: 12 de Febrero de 2020. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf>

ORDOÑEZ Rivera Omar Fernando; evaluación de la influencia de la formulación de combustibles sólidos densificados de aserrín de pino blanco (*pinus pseudostrobus* lindl), reciclado de carbón activado y almidón de yuca (*manihot esculenta*), sobre las propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas de los combustibles sólidos densificados en general; [en línea]; Para optar el título de ingeniero químico; Universidad de San Carlos de Guatemala; Guatemala; 2015; [consultado en 20 de marzo de 2019]; disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3697/1/Omar%20Fernando%20Ord%C3%B3n%20Riviera.pdf>; p 8

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO). Modulo opciones de uso final de la energía. Sub modulo productos intermedios o finales. Sección 1: Briquetas [en línea] 2014 pp.1-28 [Consulta: 14 de marzo 2019] Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-bp845s.pdf>

ORTIZ, M. Cocinar con leña o carbón causa el 17% de muertes por calidad del aire. [Sitio web] En: EL TIEMPO. Bofota 26 de junio de 2017. [Consulta: 20 Febrero de

2019]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/cocinar-en-lena-o-carbon-causa-muertes-por-calidad-del-aire-103026>

PAZ, A. La deforestación en Colombia aumento un 23%. [Sitio web] En: MONGABAY LATAM 15 de junio de 2018. [Consulta: 20 febrero de 2019]. Disponible en: <https://es.mongabay.com/2018/06/aumenta-la-deforestacion-en-colombia/>

PREEDY, Victor R. *The Coffee Plant and Beans: An Introduction* [en línea] En: FARAH, A. and FERREIRA DOS SANTOS, Thiago eds. *Coffee in Health and Disease Prevention*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier Acad. Press, 2010. pp.7 [Consulta: 14 de febrero 2019] ISBN 0123744202 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780124095175/coffee-in-health-and-disease-prevention>

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA [sitio web] Diccionario de la lengua Española. Definición de leña. [Consulta: 14 de marzo 2019] Disponible en: <https://dle.rae.es/?id=N8RDtwC>

RODRÍGUEZ V. N.; ZAMBRANO F., D.A.; RAMÍREZ G., C.A. Manejo y disposición de los subproductos y de las aguas residuales del beneficio del café. In: *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura*. Chinchiná : FNC : CENICAFÉ, 2013. 3 vols [Consulta: 10 de marzo 2019] Disponible en: [https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos\\_cafe/manejo\\_de\\_subproductos/P1](https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos/P1)

Rodriguez, N ,Cenicafé, *Revista Cenicafé Vol 50*. (1999). 205- 214. [Consulta: 20 de marzo 2019] Disponible en: [https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos\\_cafe/manejo\\_de\\_subproductos/P1](https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos/P1)

ROMERO, Arturo; Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles; [en línea]; Departamento de ingeniería química; Universidad Complutense de Madrid; 2010; [Consultado 30 de septiembre de 2019]; Disponible en: <http://www.rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>

SAENGER, M., et al. Combustion of coffee husks. En: *RENEWABLE ENERGY*. Vol. 23, no. 1, p. 103-121 [Consulta: 14 de febrero 2019] ISBN 0960-1481. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148100001063>

SMURFIT KAPPA.; [Sitio Web]; Papel Bond Form; [Consultado: 7 de marzo de 2019]; Disponible en: <https://www.smurfitkappa.com/es/products-and-services/paper-and-board/bond-form-paper>



Tangmankongworakoon;. An approach to produce biochar from coffee residue for fuel and soil amendment purpose; International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 1-8.; 2019; [Consultado 15 de septiembre de 2019]; disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40093-019-0267-5>

TIENDA BIOMASA. [Sitio web] Que son los Pellets. [Consulta: 14 de marzo 2019]. Disponible en: <https://tiendabiomasa.com/pellet>

VALDERRAMA Andres; Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica en cocinas no convencionales; [en línea]; Centro de desarrollo e investigación en termofluidos CEDIT; [consultado 6 de septiembre de 2019]; disponible en:

[http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/Publicaciones/rev\\_cedit/2007\\_V02/pdf/a04v2.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/Publicaciones/rev_cedit/2007_V02/pdf/a04v2.pdf); p. 33.

VARGAS angelica; Estudio de la producción de pellets a partir de borra de café; [en línea]; Universidad Nacional de Colombia; 2018; [Consultado 18 de septiembre de 2019]; disponible en:

<http://bdigital.unal.edu.co/70087/1/Tesis%20de%20maestr%C3%ADa.pdf>

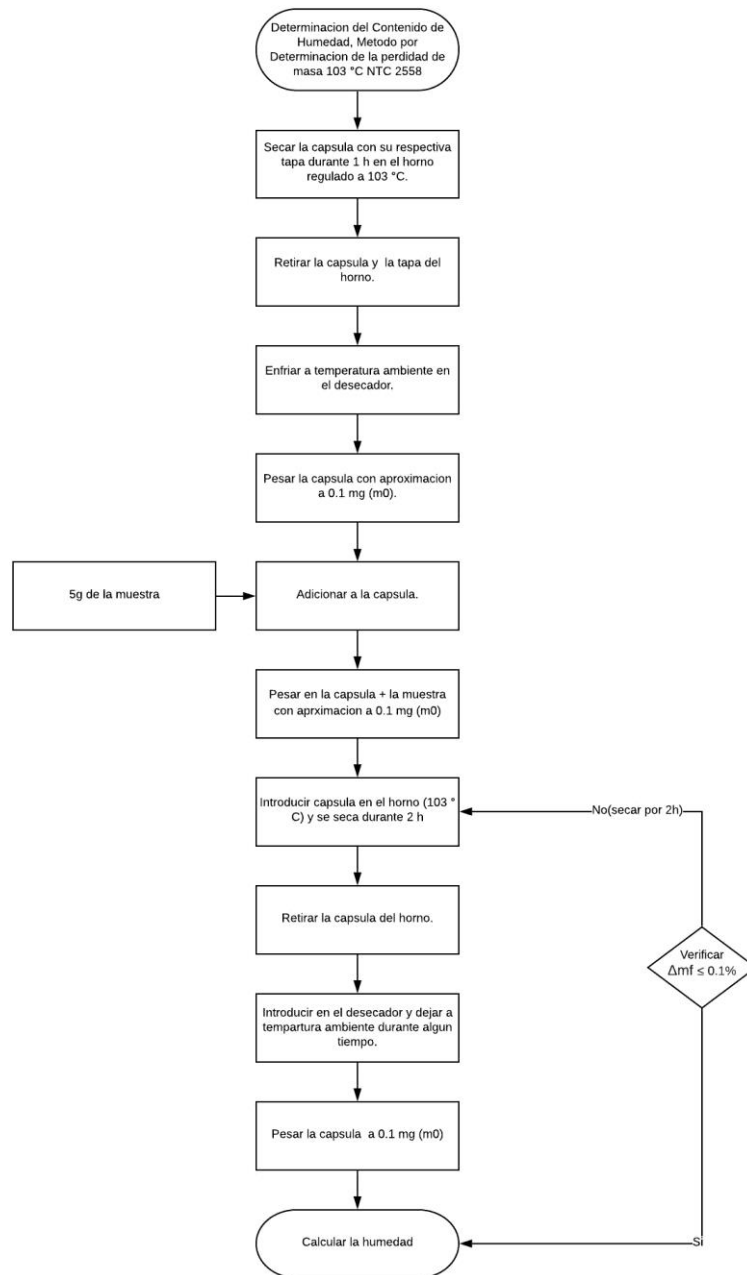
VASQUEZ, Erika; Metodología para la cartectiracion para com busyibles sólidos maderables del área metropolitana del Valle de Aburra” AMVA“, Colombia; [en línea]; 2006; Vol 59, No 2. p. 3557-3564; [Consultado 13 de Julio de 2019]; Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v59n2/a11v59n2.pdf>

# ANEXOS

## ANEXO A.

### DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS MATERIAS PRIMAS.

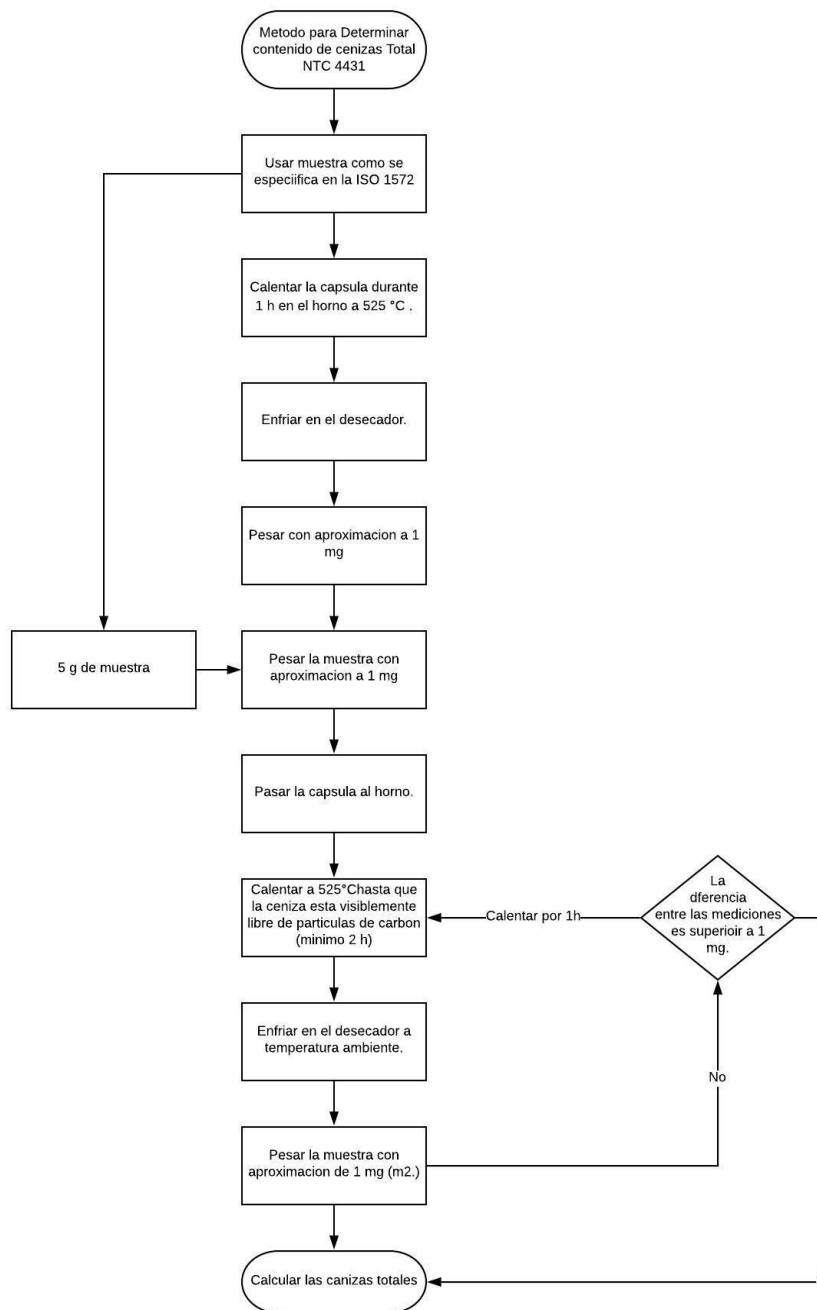
Figura 35. Diagrama de flujo para determinación del contenido de humedad.



Fuente: elaboración propia

## DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETERMINACION DEL CONTENIDO DE CENIZAS DE LAS MATERIAS PRIMAS.

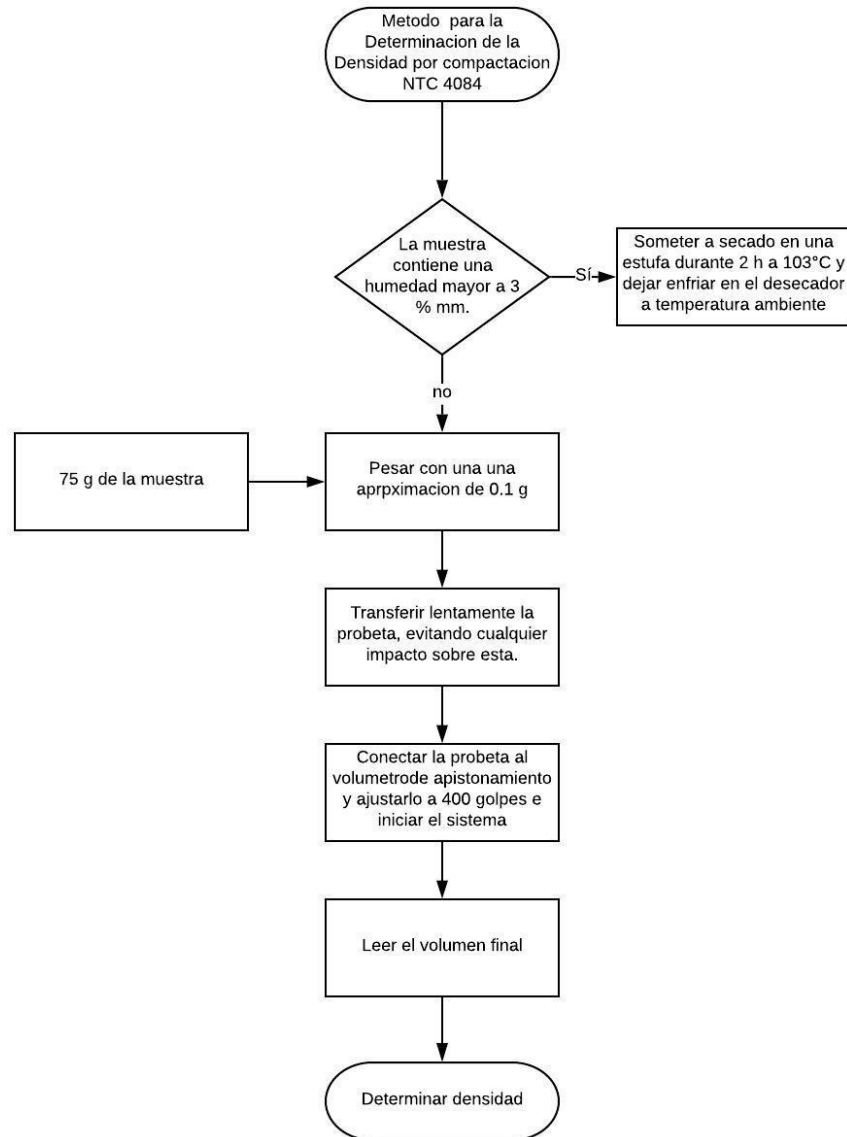
**Figura 36.** Diagrama de flujo para la determinación del contenido de cenizas.



**Fuente:** elaboración propia

## DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE LAS MATERIAS PRIMAS.

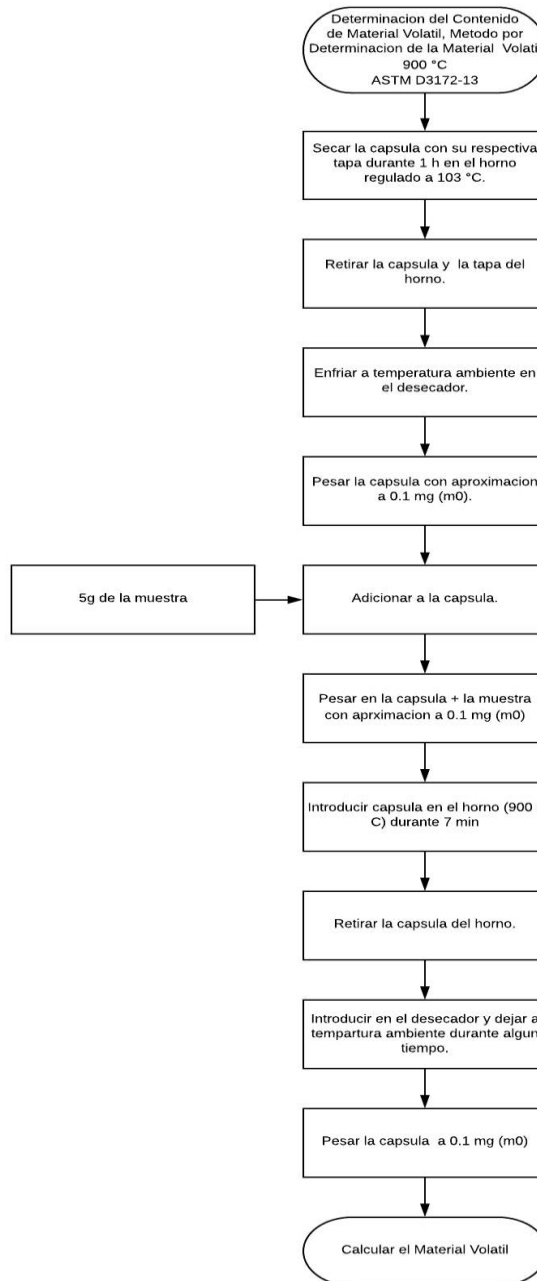
**Figura 37.** Determinación de la densidad por compactación



**Fuente:** elaboración propia

## DIAGRAMAS DE FLUJO PARA DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS MATERIAS PRIMAS.

**Figura 38.** Determinación del contenido de materia volátil



**Fuente:** elaboración propia

## ANEXO B.

### NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2060

Norma técnica colombiana NTC 2060, usada para la caracterización de las materias primas y de las briquetas de borra de café y almidón de yuca elaboradas.

**NORMA TÉCNICA  
COLOMBIANA**

**NTC  
2060**

1997-11-04

**BRIQUETAS COMBUSTIBLES PARA USO DOMÉSTICO**



E: FUEL BRIQUETES FOR HOUSEHOLS USE

CORRESPONDENCIA:

DESCRIPTORES: carbón, briketa, combustible sólido.

I.C.B.: 75.160.10

Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)  
Número 14397 Bogotá, D.C. - Tel. 6794666 - Fax 6291436

Prohibida su reproducción

Primera actualización  
Enero 2005-12-11

## PRÓLOGO

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, **ICONTEC**, es el organismo nacional de normalización, según el Decreto 2269 de 1993.

**ICONTEC** es una entidad de carácter privado, sin ánimo de lucro, cuya Misión es fundamental para brindar soporte y desarrollo al productor y protección al consumidor. Colabora con el sector gubernamental y apoya al sector privado del país, para lograr ventajas competitivas en los mercados interno y externo.

La representación de todos los sectores involucrados en el proceso de Normalización Técnica está garantizada por los Comités Técnicos y el periodo de Consulta Pública, este último caracterizado por la participación del público en general.

La NTC 2060 (Primera actualización) fue ratificada por el Consejo Directivo de 1987-11-04.

Esta norma está sujeta a ser actualizada permanentemente con el objeto de que responda en todo momento a las necesidades y exigencias actuales.

A continuación se relacionan las empresas que colaboraron en el estudio de esta norma a través de su participación en el Comité Técnico C35.1 Carbón.

ACERÍAS PAZ DEL RÍO S.A.  
ANÁLISIS INDUSTRIALES  
CARBOCOL  
CEMENTOS SAMPER  
ECOPEPETROL

E.E.E.B.  
INGEOMINAS  
PRODECO  
S.G.S. COLOMBIA S.A.  
TECSOL LTDA.

**ICONTEC** cuenta con un Centro de Información que pone a disposición de los interesados normas internacionales, regionales y nacionales.

**DIRECCIÓN DE NORMALIZACIÓN**



## **BRIQUETAS COMBUSTIBLES PARA USO DOMÉSTICO**

### **1. OBJETO**

Esta norma tiene por objeto establecer los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben someterse las briquetas combustibles para uso doméstico.

### **2. DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN**

#### **2.1 DEFINICIONES**

Para los efectos de esta norma se establecen las siguientes:

**2.1.1** Briqueta: mezcla sólida combustible de sustancias aglomeradas de forma y tamaño adecuado para uso doméstico.

**2.1.2** Remesa: cantidad de producto objeto de un envío comercial.

**2.1.3** Lote: cantidad definida de la remesa que se presume tiene las mismas características, sobre la cual se va a juzgar su calidad.

**2.1.4** Unidad de muestreo: número de unidades de distintos lugares de un lote.

**2.1.5** Muestra global: cantidad total de muestra formada por la mezcla de las unidades de muestreo.

**2.1.6** Muestra reducida: cantidad de producto obtenido por reducción de la muestra global y que es representativa del lote.

**2.1.7** Muestra para análisis: cantidad representativa de la muestra global, o reducida, que se destina para análisis.

#### **2.2 CLASIFICACIÓN**

**2.2.1** Tipo 1. Briquetas provenientes de carbón mineral.

**2.2.2** Tipo 2. Briquetas provenientes de otro tipo de combustible.

**3. CONDICIONES GENERALES**

**3.1** Las briquetas deben poseer un tamaño mayor o igual a 3 cm en su dimensión mínima, deben ser de fácil encendido y presentar una combustión limpia, además no deben deteriorarse durante su transporte y manejo ni en condiciones normales de almacenamiento.

**3.2** El tamaño, el poder calorífico y las características físicas y mecánicas de las briquetas deben ser uniformes.

**3.3** El aglutinante de las briquetas debe ser un producto que posea características aglomerantes, siempre que no sea tóxico ni produzca gases tóxicos o irritantes durante su combustión en cantidad superior a la permisible (véase el numeral 8.2).

**3.4** El iniciador se debe fabricar con un material de encendido instantáneo que no sea tóxico ni emita gases tóxicos o irritantes durante su combustión en cantidad superior a la permisible, que no ahume las briquetas y debe cumplir con los requisitos indicados en la respectiva norma de producto (véase el numeral 9.1.2).

**4. REQUISITOS**

**4.1** Las briquetas cumplirán los requisitos indicados en la Tabla 1.

**Tabla 1. Requisitos de las briquetas**

<b>Propiedad</b>	<b>Tipo 1</b>	<b>Tipo 2</b>
Poder calorífico, en KJ/kg, mínimo	21 000 (véase la Nota 1)	12 500 (véase la Nota 1)
Cenizas, en % m/m, máximo	30	30
Carbono fijo, % en masa, mínimo	50	-
Material volátil, en % máximo, m/m	15	15
Humedad, en % máximo (véase la Nota 2)	2,5	2,5
Contenido de azufre, en %, m/m, máximo.	1,0	1,0

Notas:

- 1) Aproximadamente 5 000 kilocalorías/kg y 3 000 kilocalorías/kg
- 2) Este requisito se controla en la etapa final de distribución

**4.2** Además de los anteriores, cumplirán los siguientes requisitos:

**4.2.1** Resistencia al aplastamiento. Cuando las briquetas se sometan al ensayo indicado, en el numeral, 6.7, el promedio ponderado de la carga de aplastamiento (Rm) corresponderá de acuerdo con la masa de la briqueta, a los valores indicados en la Tabla 2.

**Tabla 2. Requisitos de resistencia al aplastamiento**

Masa de cada briqueta en g/briqueta	Rm, mínimo en N (kgf)
60 ó más	784,31 (80)
40	588,23 (60)
30	490,19 (50)
20	392,15 (40)

**4.2.2** Medida de la resistencia a la abrasión y al impacto. Cuando las briquetas se ensayen de acuerdo con lo indicado en el numeral 6.8, menos del 35 % de la masa de las briquetas podrá pasar por la malla de barras.

**4.2.3** Emisión de humo y hollín. Cuando la briqueta se ensaye de acuerdo con lo indicado en el numeral 6.9, no aparecerá ningún hilo de humo negrozco antes de transcurrir 90 s.

**4.2.4** Facilidad de encendido. Cuando las briquetas se ensayen de acuerdo con lo indicado en el numeral 6.10, permanecerán encendidas después de 10 min de haber retirado los iniciadores y continuarán su combustión durante un período mínimo de 90 min.

## **5. TOMA DE MUESTRAS Y RECEPCIÓN DEL PRODUCTO**

### **5.1 TOMA DE MUESTRAS**

**5.1.1** El muestreo se efectuará de tal manera que las unidades de muestreo sean representativas de las características de todo el lote. Una vez efectuado el muestreo, los excedentes de la muestra se devolverán al propietario del lote en remesa.

**5.1.2** Preparación del lote para muestreo. El lote se preparará de tal forma que las muestras puedan tomarse sin obstáculos ni demora. El muestreador será debidamente autorizado y si es necesario, tomará las muestras en presencia de las partes interesadas.

**5.1.3** Extracción de las unidades de muestreo. Las unidades de muestreo se tomarán de diferentes sitios y niveles de cada lote y al azar de acuerdo con lo indicado en la Tabla 3.

**Tabla 3. Determinación del tamaño de la muestra para briquetas empacadas**

Número de empaques comerciales similares que constituyen el lote	Número de empaques o muestras (cada una constituye una unidad de muestreo) que deben tomarse
1 a 10	1
11 a 50	3
51 a 100	5
101 a 300	7
301 a 500	9
501 a 1 000	10
más de 1 000	15 (mínimo)

**5.1.4** La muestra global se obtiene reuniendo o mezclando las unidades de muestreo; la muestra reducida se obtiene a partir de la muestra global, por cuarteo.

**5.1.5** El tamaño de la muestra para ensayo será de 15 kg.

**5.1.6** Las muestras para ensayo se empacarán y sellarán debidamente.

**5.1.7** Las muestras se marcarán en forma legible e indeleble de la siguiente forma: designación del producto, lugar del muestreo, fecha y hora del muestreo, tamaño del lote y de la muestra para análisis, marca de identificación para el lote y para la muestra.

## **5.2 ACEPTACIÓN O RECHAZO**

Si la muestra ensayada no cumple con uno de los requisitos indicados en esta norma, se rechazará el lote. En caso de discrepancia en los resultados, se repetirán los ensayos sobre la muestra reservada para tales efectos, cualquier resultado no satisfactorio en este segundo caso será motivo para rechazar el lote.

## **6. ENSAYOS**

### **6.1 DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO**

Se efectúa de acuerdo con la NTC 2128.

### **6.2 DETERMINACIÓN DE CENIZAS**

Se efectúa de acuerdo con lo indicado en la NTC 1859.

### **6.3 DETERMINACIÓN DEL CARBONO FIJO**

El carbono se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de carbono fijo} = 100 - (A + B + C)$$

Donde:

*A* = contenido de humedad, en % (véase el numeral 6.5).

*B* = contenido de cenizas, en % (véase el numeral 6.2).

*C* = contenido de materia volátil, en %, (véase el numeral 6.4)

### **6.4 DETERMINACIÓN DE LA MATERIA VOLÁTIL**

Se efectúa de acuerdo con lo indicado en la NTC 2018.

### **6.5 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD**

Se efectúa de acuerdo con lo indicado en la NTC 1872.

### **6.6 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AZUFRE**

Véase el numeral 9.1.1

---

---

La briqueta fría se coloca entre dos superficies planas de acero de 10 cm x 10 cm y se le aplica la carga de compresión a una velocidad de 5 kilos por segundo y se lee para cada briqueta la fuerza de compresión en el momento de aplastamiento. Para cada ensayo se deben emplear de 50 a 100 briquetas de la misma masa y se calcula el promedio ponderado de la carga de aplastamiento ( $R_n$ ), el valor obtenido debe corresponder con lo indicado en la Tabla 2. El 90 % de las briquetas deben tener una resistencia individual mayor de 0,75  $R_m$ .

## **6.8 DETERMINACIÓN DE LA MEDIDA DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN Y AL IMPACTO**

**6.8.1** Se carga el tambor (véase la Figura 1) con 5 kg de briquetas enteras y se hace girar durante dos minutos a 25 r/min, luego se recoge todo el material que se encuentra dentro del tambor y se pasa por una malla de barras de 10 mm de diámetro espaciadas a 15 mm. El ensayo se efectúa por duplicado.

**6.8.2** En caso de briquetas de más de 90 mm en su dimensión mayor, se emplea un tambor similar, pero con 1 m de largo, y se cargan 50 kg de briquetas, todas las demás condiciones del ensayo son iguales.

*Nota.* La norma ASTM D440 contempla un método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión y al impacto, sin embargo, no se incluye en esta norma como método alterno hasta tanto no se establezca el valor del requisito correspondiente.

## **6.9 EMISIÓN DE HUMOS Y HOLLÍN**

Se coloca una briqueta en un horno de mufla previamente calentado a 950 °C se deja la puerta del horno abierta y se observa la briqueta. Se repite el ensayo con 20 briquetas y se pasa con el 90 % de resultados aceptables.

## **6.10 FACILIDAD DE ENCENDIDO**

### **6.10.1 Aparatos**

- a) Estufa estándar u otra equivalente (véase la Figura 2), cargada con las briquetas bajo ensayo.
- b) Iniciadores que cumplan con lo especificado en el numeral 3.4.

### **6.10.2 Procedimiento**

- a) Se precalienta la estufa a 20 °C mediante la combustión de dos iniciadores durante cinco minutos.
- b) Se emplean tres iniciadores en cada hogar, se encienden y se colocan dentro del compartimiento para cenizas, uno junto al otro (formando un triángulo), cuidando que la llama esté ubicada en el centro de la rejilla del hogar y se cierra la compuerta de la estufa.
- c) Se dejan transcurrir 20 min a 25 min y se retiran los iniciadores.

- d) Se observa si las briquetas permanecen encendidas después de 10 min de haber retirado los iniciadores.
- e) Se contabiliza el tiempo de combustión total de las briquetas bajo ensayo.

## **7. EMPAQUE Y ROTULADO**

### **7.1 EMPAQUE**

Las briquetas se empacarán en bolsas de material adecuado que permitan conservar la calidad del producto, así como su manejo hasta su destino final.

### **7.2 ROTULADO**

En el rótulo deberán aparecer como mínimo las siguientes indicaciones:

**7.2.1** Nombre del producto.

**7.2.2** Nombre y marca del fabricante o distribuidor.

**7.2.3** Masa neta en unidades del Sistema Internacional.

**7.2.4** Poder calorífico en Kcal/kg (KJ/kg).

**7.2.5** La siguiente leyenda en letra clara y legible: "Estas briquetas solo se pueden emplear en cocinas o fogones provistos de chimenea al exterior y en lugares convenientemente ventilados. La chimenea debe someterse a limpieza periódica para evitar taponamiento".

**7.2.6** La frase "Industria Colombiana".

## **8. PRECAUCIONES**

**8.1** En la fabricación de las briquetas no se deben emplear sustancias aglutinantes u otros aditivos que sean tóxicos o que por combustión produzcan gases tóxicos o irritantes en cantidad superior a la permisible.

**8.2** Los valores límites de los gases tóxicos o irritantes serán los establecidos en las prescripciones legales vigentes.

**9. APÉNDICE****9.1 INDICACIONES COMPLEMENTARIAS**

**9.1.1** Hasta tanto no se adopte la NTC para la determinación indicada en el numeral 6.6, se recomienda seguir el procedimiento indicado en la norma ASTM D 3177.

**9.1.2** Mientras no se adopte la NTC para los iniciadores, estos deberán cumplir con las características indicadas en la Tabla 4.

**Tabla 4. Características de los iniciadores**

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Altura de llama, mín, en cm	2,5
Poder calorífico, mín, en KJ/kg (Cal/g).	27209(6 500)
Tiempo de combustión, mín. en minutos*	25

\* Véase el numeral 8.2

**9.2 NORMAS QUE DEBEN CONSULTARSE**

NTC 1859, Minerales. Determinación de cenizas.

NTC 1872, Carbón. Determinación de la humedad total.

NTC 2018, Carbón. Determinación de la materia volátil.

NTC 2128, Carbón. Determinación del poder calorífico. Método de la bomba calorimétrica y cálculo del poder calorífico neto.

**9.3 DOCUMENTO DE REFERENCIA**

Literatura técnica suministrada por los miembros del Comité.