

Obtención de Comprimidos a Partir de Biomasa Residual de la Industria del Arroz

Juan Siddartha Cifuentes Mantilla

Edison Felipe Tole Rodriguez

Trabajo de Grado Presentado Como Requisito Para Optar El Título De:

Ingeniero Químico

Director:

Fredy Augusto Avellaneda Vargas

Ph.D. en Ingeniería Química

Universidad industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

A Dios

Por guiarme y señalarme el mejor camino a seguir en los momentos difíciles

A mis padres Juan Carlos y Marta

Quienes lucharon por mi bienestar y educación, apoyaron y respetaron cada una de mis decisiones.

Ustedes me dieron la vida y el privilegio de la educación.

A mi tío Luis Carlos

Por ser un pilar en la lucha por las metas de mi vida.

A Sara

Por ser un apoyo incondicional con su cariño, paciencia y sonrisas. Brindarme su amor en todo momento para seguir luchando por la meta deseada

Al director Fredy

Por su trabajo, paciencia y comprensión durante el desarrollo del proyecto.

Juan

A Dios

Por darme sabiduría y paciencia de concluir mi carrera profesional, por ayudarme a vencer los retos y dificultades que se presentaron en el camino.

A mi madre Aurora Rodriguez

Que siempre estuvo ahí en todo momento y me aconsejó a seguir en pie en lo que me proponía.
Este logro es de ella también.

Felipe

Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Marco Teórico.....	18
1.1 Comprimidos de Biomasa.....	18
1.2 Comprimidos de Biomasa en Colombia	19
1.3 Proceso de Obtención de Comprimidos de Biomasa	20
1.4 Cascarilla de Arroz	20
1.5 Aglomerantes	21
2. Metodología Experimental.....	23
2.1 Adquisición y Acondicionamiento de Materiales.....	23
2.2 Fabricación del Molde para los Comprimidos de Biomasa	25
2.3 Definición del Diseño de Experimentos	26
2.4 Caracterización de los Comprimidos de Biomasa	28
2.4.1 Dureza.	28
2.4.2 Poder calórico superior.	29
2.4.3 Termogravimetría (TGA).....	29
2.4.4 Prueba de Charpy	30

3. Resultados y Análisis.....	30
3.1 Dureza	31
3.2 Poder Calórico Superior.....	34
3.3 Termogravimetría	36
3.4 Prueba de Charpy.....	38
4. Conclusiones	40
5. Recomendaciones	42
Referencias Bibliográficas	43
Apéndices.....	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Metodología experimental.....	23
Figura 2. Cascarilla de arroz seleccionada como materia prima.	24
Figura 3. Molino de cuchillas.	24
Figura 4. Cascarilla de arroz acondicionada.	25
Figura 5. Molde para la fabricación de comprimidos de biomasa.	26
Figura 6. Durómetro short tipo D.	29
Figura 7. Bomba calorimétrica.	29
Figura 8. Balanza termogravimétrica TA Instruments TGA 2050.	30
Figura 9. Péndulo de Charpy.	30
Figura 10. Ensayo de dureza para los comprimidos de biomasa con glicerina.	32
Figura 11. Ensayo de dureza para los comprimidos de biomasa con almidón de yuca.	33
Figura 12. Comprimidos de biomasa obtenidos a temperatura de 120 °C.	34
Figura 13. Poder calórico superior para los comprimidos de biomasa con glicerina.	35
Figura 14. Poder calórico superior para los comprimidos de biomasa con almidón de yuca.	36
Figura 15. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa G2.	37
Figura 16. Composición de los comprimidos de biomasa con glicerina.	37
Figura 17. Composición de los comprimidos de biomasa con almidón de yuca.	38
Figura 18. Pérdida de rigidez para los comprimidos de biomasa con glicerina.	39
Figura 19. Fuerza de impacto para los comprimidos de biomasa con almidón de yuca.....	40

Figura 20. Cilindro del molde para la elaboración de briquetas.	48
Figura 21. Tapa del molde para la elaboración de briquetas.	49
Figura 22. Montaje del molde para la elaboración de briquetas.	49
Figura 23. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa G3.	50
Figura 24. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa G5.	50
Figura 25. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa G6.	51
Figura 26. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa G8.	51
Figura 27. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa G9.	52
Figura 28. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa A2.	52
Figura 29. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa A3.	53
Figura 30. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa A5.	53
Figura 31. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa A6.	54
Figura 32. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa A8.	54
Figura 33. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa A9.	55
Figura 34. Comprimido de biomasa obtenido a partir de cascarilla de arroz.	56

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Diseño de experimentos.....	28

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Diseño del Primer Molde	48
Apéndice B. Gráficas de termogravimetría	50
Apéndice C. Comprimido de Biomasa Obtenido a Partir de Cascarilla de Arroz	56

Resumen

Título: Obtención de Comprimidos a Partir de Biomasa Residual de la Industria del Arroz*

Autores: Juan Siddartha Cifuentes Mantilla, Edison Felipe Tole Rodríguez**

Palabras Clave: Comprimidos, cascarilla de arroz, almidón de yuca, glicerina, biocombustibles sólidos.

Descripción:

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo aprovechar la cascarilla residual de la industria arrocera para la obtención de comprimidos de biomasa, los cuales puedan servir como una alternativa para la generación de energía a partir de residuos orgánicos y contribuya a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Durante la elaboración de comprimidos de biomasa a partir de cascarilla de arroz se realizó un acondicionamiento previo de la biomasa residual, luego de lo cual se adicionó una fracción de agua y un agente aglomerante, este fue alternado entre glicerina y almidón de yuca. La mezcla fue introducida en un molde diseñado para aplicar una presión equivalente a 55 kgf/cm². El diseño de experimentos fue 3² donde las variables analizadas fueron la concentración de agente aglomerante, con valores de 10, 20 y 30 por ciento en peso, y la temperatura con valores de 120, 150 y 180 °C. La caracterización de los comprimidos de biomasa obtenidos se llevó a cabo mediante ensayos de dureza, calorimetría, termogravimetría y prueba de Charpy.

A partir del diseño de experimentos planteado fue posible elaborar un comprimido de biomasa a partir de la cascarilla de arroz con las condiciones de dureza, poder calórico superior y fuerza de impacto adecuadas para ser usado como alternativa en la generación de energía a partir de biocombustibles sólidos. Además de esto, el aumento de la concentración de agente aglomerante disminuyó el poder calórico superior de los comprimidos de biomasa a partir de cascarilla de arroz. Finalmente, el uso de glicerina como agente aglomerante en la elaboración de comprimidos de biomasa condujo a la absorción de agua del ambiente, lo cual afectó la consistencia y llevó a que los comprimidos se desmoronaran.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Fredy Augusto Avellaneda Vargas, Doctor en Ingeniería Química

Abstract

Title: Obtaining Tablets From Waste Biomass of Rice Industry*

Authors: Juan Siddartha Cifuentes Mantilla, Edison Felipe Tole Rodríguez**

Keywords: Tablets, rice shell, yucca starch, glycerin, solid biofuels.

Description:

The objective of this research work is to use the residual husk of the rice industry to obtain biomass tablets that can serve as an alternative for energy generation from organic waste and contribute to the reduction of greenhouse gas emissions.

During the preparation of biomass tablets from rice husk, a previous conditioning of the residual biomass was carried out, and then a fraction of water and a binder agent were added, which was varied between glycerin and cassava starch. The mixture was introduced into a mold designed to apply a pressure equivalent to 55 kgf/cm^2 . The design of experiments was 3^2 , where the variables analyzed were the concentration of binder agent, with values of 10, 20 and 30 percent by weight, and the temperature with values of 120, 150 and 180 °C. The characterization of the biomass tablets obtained was carried out by hardness, calorimetry, thermogravimetry and Charpy tests.

From the design of the proposed experiments, it was possible to produce a biomass tablet from the rice husk with the conditions of hardness, superior caloric power and impact force suitable to be used as an alternative in the generation of energy from solid biofuels. In addition to this, the increase in binder concentration decreased the superior caloric power of the biomass tablets from rice husks. Finally, the use of glycerin as a binding agent in the preparation of biomass tablets led to the absorption of water from the environment, which affected the consistency and led to the tablets collapsing.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Fredy Augusto Avellaneda Vargas, Doctor in Chemical Engineering.

Introducción

Durante las últimas décadas ha aumentado notablemente la cantidad de bosques que han sido remplazados por actividades agrícolas y ganaderas, lo cual ha llevado a que desaparezcan anualmente cerca de 16 millones de hectáreas de bosque tropical (Hierro, 2018). Este fenómeno de deforestación es causante de alrededor del 20 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), el cual ha sido identificado como un gas de efecto invernadero causante del calentamiento global y que también es generado por el uso de combustibles fósiles y otras actividades humanas (Schlegel, 2001).

El incremento de la temperatura del planeta ocasionado por las emisiones de gases de efecto invernadero ha generado una gran preocupación a nivel internacional, por lo cual las fuentes renovables de energía han surgido en el panorama actual para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y la energía nuclear, principalmente en cuatro mercados: generación de electricidad, aplicaciones térmicas, combustibles para transporte y suministro de energía en zonas rurales (André, De Castro, & Cerda, 2012).

Una de las fuentes de energía renovable que presenta mayor relevancia para la sustitución parcial de los combustibles fósiles es la biomasa, a partir de la cual se producen los denominados biocombustibles de segunda generación. Este tipo de combustibles pueden ser obtenidos a partir de diferentes tipos de biomasa, aprovechando los cultivos destinados exclusivamente a la generación de energía y los residuos orgánicos de las actividades agrícolas y forestales, entre otras

(Cárdenas, 2012). Además de esto, el uso de biomasa para la producción de combustibles tiene un alto impacto social y ambiental, ya que el cultivo de las fuentes de biomasa propicia el desarrollo rural a la vez que se aprovechan los residuos orgánicos que de otra forma podrían no tener un adecuado tratamiento y disposición final (Rincón & Silva, 2014).

Dentro de las diferentes fuentes de biomasa residuales que pueden ser aprovechadas para la producción de biocombustibles se destaca la cascarilla de arroz. En Colombia, la cascarilla de arroz es considerada un residuo agrícola, de la cual se producen más de 1.000 toneladas diarias (Piñeros Castro, 2011) que son quemadas al ambiente, contribuyendo a la emisión de CO₂ y al calentamiento global (Soto, 2003). Ante esta situación, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo aprovechar la cascarilla residual de la industria arrocera para la obtención de biocombustibles sólidos, denominados comprimidos de biomasa, que puedan servir como una alternativa para la generación de energía a partir de residuos orgánicos y contribuya a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para llevar a cabo la producción de los comprimidos de biomasa se realiza un tratamiento preliminar a la biomasa residual para reducir el tamaño de partícula, después de lo cual se adiciona una cantidad específica de agua y un agente aglomerante que permite ajustar la solidez del producto final. Esta mezcla se deposita en un molde donde se controlan las condiciones de presión, temperatura, concentración de biomasa y contenido de agua, con el fin de obtener un biocombustible sólido con adecuadas condiciones químicas, como el poder calórico superior, y mecánicas, como la dureza y la fuerza de impacto.

El uso de residuos agrícolas para la obtención de biocombustibles sólidos como una alternativa para el aprovechamiento de la biomasa ha sido evaluado en diferentes regiones del país. En Boyacá se han llevado a cabo estudios de perfectibilidad económica para la producción y comercialización de comprimidos provenientes del aserrín, generado durante el procesamiento de la madera, donde los resultados indicaron la posibilidad de desarrollar la venta masiva de estos biocombustibles para su uso en calefacción (Condia, 2013). Además de esto, en el departamento de Córdoba se lleva a cabo actualmente la optimización de las condiciones operativas necesarias para la producción de comprimidos a partir de residuos de maíz, ya que anualmente se producen alrededor de 45.000 toneladas de desechos que son quemados a cielo abierto. (Barranco, Fandiño, Ortega, González, & Gómez, 2016).

1. Marco Teórico

1.1 Comprimidos de Biomasa

Los comprimidos son biocombustibles sólidos que se componen de material orgánico compactado, principalmente residuos de origen lignocelulósico como: cascarillas, aserrín, viruta, astillas, ramas, restos de poda y aclareos, entre otros (Hakkila, 2004). Generalmente, este tipo de biocombustibles son producidos mediante la compactación del material orgánico a altas presiones y temperaturas, las cuales promueven la auto-aglomeración de sus partículas (Lozano, 2006). Sin embargo, también es posible obtener comprimidos mediante la aplicación de presiones bajas o medias cuando se adiciona a la biomasa un agente aglomerante, el cual facilita el proceso de compactación (Lubwama & Yiga, Oct. 2017).

Los comprimidos de biomasa son considerados como una fuente de energía ecológica y renovable capaces de sustituir a la leña como combustible sólido gracias a las diferentes ventajas que presenta: baja humedad, por lo cual enciende rápido y fácilmente; alta densidad, ocupando un menor espacio; alta homogeneidad; fácil manipulación; menor cantidad de cenizas y ausencia de olores, humo y chispas (Valiente, 2017).

1.2 Comprimidos de Biomasa en Colombia

Las crisis económicas mundiales ocasionadas por la dependencia energética de los combustibles fósiles han generado un gran impacto social y económico, lo cual ha llevado a que desde la década de 1970 se adelanten estudios enfocados en el uso de fuentes alternativas para suplir los requerimientos energéticos (Condia, 2013). De esta forma, a principios de la década de 1980 se incrementó considerablemente el uso de los comprimidos de biomasa en países del hemisferio norte, como Suecia, Noruega, Estados Unidos y Canadá, y desde el año 2000 se ha esparcido por todo el mundo el uso de esta fuente de energía renovable para combatir los efectos adversos del cambio climático (Hakkila, 2004).

En Colombia, el uso de comprimidos de biomasa ha sido muy limitado debido a que el país aún cuenta con reservas considerables de combustibles fósiles, por lo cual no se ha dado suficiente atención a este tipo de biocombustibles sólidos (Riegelhaupt & Arias, 2009). Además de esto, en este momento no se cuenta con una planta dedicada a la producción de comprimidos de biomasa en el país, y la comercialización se lleva a cabo únicamente por páginas web (Condia, 2013). Sin embargo, Colombia es un país cuya economía depende ampliamente de las actividades agrícolas, por lo cual se generan una gran cantidad de residuos agroindustriales anualmente que no son aprovechados como fuentes de energía alternativas y que tienen un potencial económico como materia prima para la obtención de biocombustibles sólidos (Peñaranda Gonzalez, 2017).

1.3 Proceso de Obtención de Comprimidos de Biomasa

Los comprimidos de biomasa se obtienen a partir de una materia prima lignocelulósica, generalmente un residuo agroindustrial. Inicialmente, la materia prima es procesada para reducir el tamaño de las partículas y mejorar la cohesión del producto final, clasificando la biomasa de acuerdo con el tamaño de partícula en picada (250 – 50 mm), partida (50 – 8 mm) o pulverizada (< 8 mm) (Holmer, Richardson, & Bjorheden, 2002). Después de ser procesada, la materia prima es mezclada con agua y compactada a presión y temperatura constante dentro de un molde empleando una prensa hidráulica o neumática, lo cual da como resultado una superficie lisa de apariencia brillante en los comprimidos de biomasa (Velázquez, 2006). Sin embargo, existen casos en que las propiedades de los residuos orgánicos no permiten obtener un producto final de consistencia adecuada, por lo cual se hace necesario el uso de agentes aglomerantes (Rodrigues G. , Helmer, Devens, Fonseca, & Simonelli, 2017).

1.4 Cascarilla de Arroz

El arroz es uno de los alimentos de mayor consumo a nivel nacional e internacional, el cual es producido y procesado a gran escala por la industria arrocera para suplir la demanda mundial, generando así una elevada cantidad de residuos, principalmente la cascarilla (Rahaman, 2017). La cascarilla de arroz presenta un bajo contenido de humedad y es relativamente resistente a las condiciones medioambientales, por lo cual no se degrada con facilidad. Además de esto, su poder calórico es semejante al de la madera, por lo cual puede ser empleado como un sustituto para la generación de energía y mitigar el fenómeno de deforestación (Aguilar, 2009).

Aunque la composición química de la cascarilla del arroz puede variar de acuerdo con la región donde se cultiva el arroz, generalmente este residuo posee una elevada fracción de dióxido de silicio (SiO_2) que el cuerpo humano no puede procesar, haciendo imposible el consumo humano (Vargas, Alvarado, Vega-Baudrit, & Porras, 2013).

En Colombia el área sembrada de arroz superó las 160.000 hectáreas en 2018, a partir de las cuales se obtuvo una producción nacional cercana a 2 millones de toneladas de arroz generando alrededor de 400.000 toneladas de cascarilla de arroz (DANE, 2019), las cuales no son aprovechadas como fuente energética. En el caso de la región oriental del país, compuesta por Santander y Norte de Santander, el área sembrada de arroz corresponde al 11 % del área total del país (DANE, 2019), lo cual equivaldría a una producción de cascarilla cercana a 40.000 toneladas (Piñeros Castro, 2011).

1.5 Aglomerantes

Los aglomerantes son sustancias añadidas a la mezcla de residuos orgánicos y agua para facilitar la obtención de una masa aglutinada que permite obtener comprimidos de biomasa de adecuada consistencia cuando es compactada. La selección del tipo de aglomerante y su concentración en la mezcla que se va a compactar, se realiza teniendo en cuenta las propiedades fisicoquímicas de la materia prima, de tal forma que no altere el poder calórico del producto final (Rey, 2015). Dentro de los aglomerantes usados con mayor frecuencia se destacan los almidones y los aglomerantes industriales.

Los almidones son considerados agentes aglomerantes naturales obtenidos a partir de alimentos como la yuca, la papa y el maíz, entre otros. Este tipo de sustancias son ampliamente utilizadas para la elaboración de comprimidos de biomasa ya que presentan diferentes propiedades como: alta pureza, fácil hinchamiento y solubilización, desarrollo de viscosidad considerable y baja tendencia a regresar a su forma inicial. Además de esto, los almidones presentan un costo relativamente bajo en el mercado, por lo cual han sido utilizados durante los últimos años para aumentar la eficiencia económica del proceso de producción de comprimidos de biomasa (Marroquín, 2010).

Por su parte, los aglomerantes industriales son sustancias obtenidas como residuos de otros procesos productivos, entre los cuales se destacan la glicerina resultante durante la obtención de biodiesel y las escorias y líquidos alcalinos generados en la industria siderúrgica (Mymrin, 1998). La glicerina obtenida como residuo de la producción de biodiesel es uno de los aglomerantes más utilizados a nivel industrial debido a su composición química, en la cual se destaca un contenido de glicerol superior al 80 % en peso, lo cual favorece su implementación como agente aglomerante durante la fabricación de comprimidos de biomasa (Duque & Cardona, 2010).

2. Metodología Experimental

La metodología desarrollada en la presente investigación se presenta en la Figura 1.

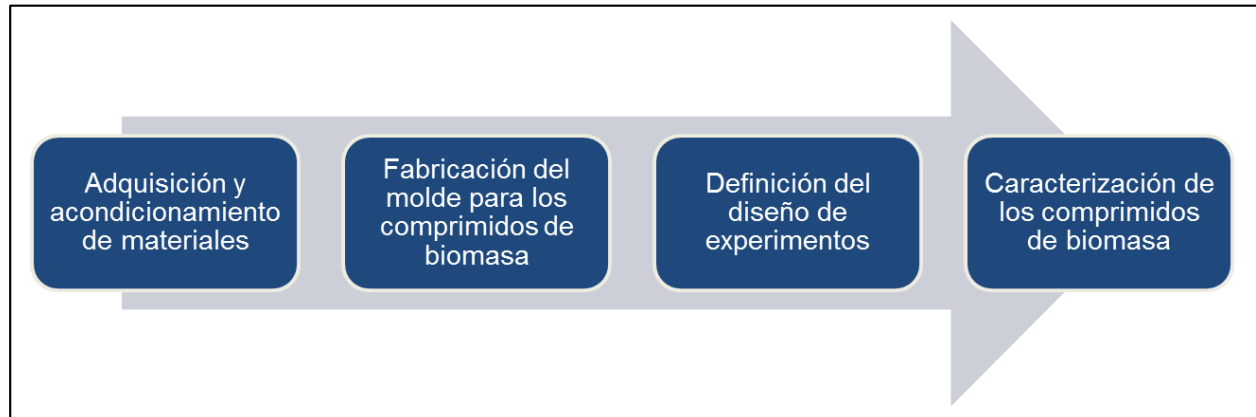


Figura 1. Metodología experimental.

2.1 Adquisición y Acondicionamiento de Materiales

El residuo agroindustrial utilizado como materia prima para la elaboración de comprimidos de biomasa fue la cascarilla de arroz que se muestra en la Figura 2, el cual fue comprado en las industrias arroceras ubicadas en el sector norte de la ciudad de Bucaramanga con un valor de 800 COP/kg. La cascarilla de arroz debe ser acondicionada previamente debido a que el tamaño de las partículas es relativamente grande, lo cual dificulta el proceso de compactación y puede afectar las propiedades mecánicas del producto final (Bhattarai, Sapkota, & Ghimire, 2016). De esta forma, la cascarilla de arroz fue procesada empleando un molino de cuchillas que se observa en la Figura

3, el cual permitió obtener partículas con un tamaño menor o igual a 2 mm como se muestra en la Figura 4.

Además de esto se empleó un aglomerante natural y un aglomerante industrial para determinar la influencia de la naturaleza del aglomerante sobre las propiedades mecánicas y químicas del comprimido de biomasa final. Como aglomerante natural se seleccionó el almidón de yuca, el cual fue adquirido en la plaza central de mercado con un valor de 5.000 COP/kg, mientras que el aglomerante industrial seleccionado fue la glicerina, adquirida como subproducto del proceso de elaboración de biodiesel llevado a cabo por un productor del departamento de Santander.

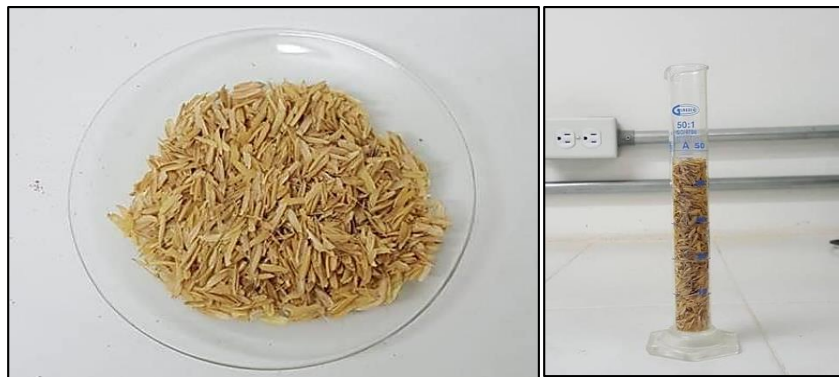


Figura 1. Cascarilla de arroz seleccionada como materia prima.



Figura 3. Molino de cuchillas.

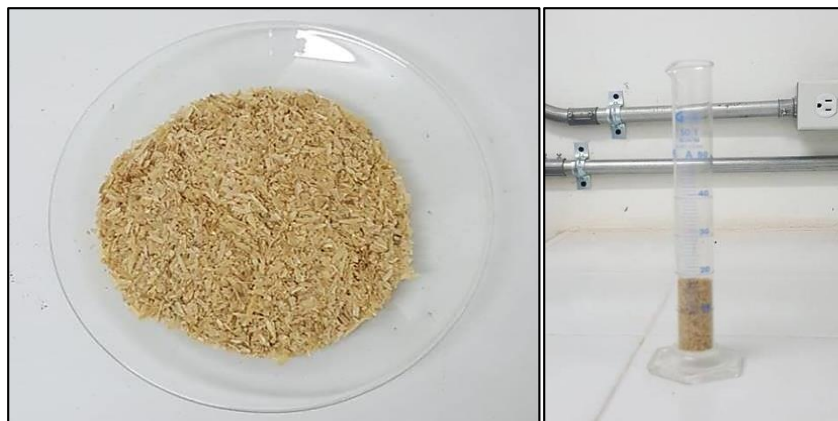


Figura 4. Cascarilla de arroz acondicionada.

2.2 Fabricación del Molde para los Comprimidos de Biomasa

Inicialmente se llevó a cabo la fabricación de un molde como el que se describe en el Anexo A, para la obtención de comprimidos de biomasa en forma de cilindros con dimensiones 5 cm de largo y 2,95 cm de diámetro, también conocidos como briquetas. Sin embargo, en las pruebas preliminares que se realizaron con este molde se observó que la geometría del diseño no permitía que se ejerciera suficiente presión sobre la mezcla, por lo cual no se logró una correcta compactación.

Por esta razón, se llevó a cabo la fabricación de un segundo molde como se muestra en la Figura 5, con el cual fue posible aplicar la presión necesaria sobre la mezcla y obtener comprimidos de biomasa. Este molde correspondió a un cilindro hueco con diámetro externo de 8 cm, diámetro interno de 7,5 cm y altura de 5 cm, el cual fue ubicado entre dos tapas que mantuvieron la mezcla al interior del molde. El cilindro fue elaborado en acero AISI – 4140, el cual es un material altamente resistente a los esfuerzos mecánicos y, por lo tanto, fue un material adecuado para la

fabricación del molde de los comprimidos de biomasa. Por su parte, las tapas fueron fabricadas en aluminio, el cual también resiste la presión aplicada y permite una rápida transferencia de calor, reduciendo el tiempo de presurización y la energía eléctrica requerida para calentar el sistema.

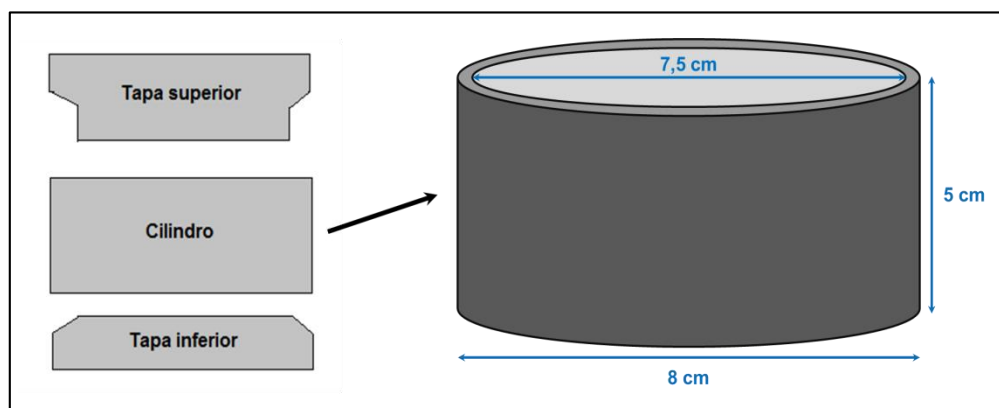


Figura 2. Molde para la fabricación de comprimidos de biomasa.

2.3 Definición del Diseño de Experimentos

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica y la experiencia de los operarios del Laboratorio de Procesos ubicado en la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander se establecieron las variables y parámetros del diseño experimental para la obtención de comprimidos de biomasa a partir de cascarilla de arroz. De esta forma, se establecieron la temperatura y la concentración de aglomerante como variables del diseño, mientras que la presión, el tiempo de compresión y el contenido de agua se mantuvieron constantes.

En el caso de la presión se ha identificado que los comprimidos de biomasa requieren de una presión mínima de 30 kgf/cm^2 para ser compactados (Lubwama & Yiga, Oct. 2017). Por esta razón, se llevaron a cabo pruebas preliminares para identificar la presión necesaria para el sistema

de la presente investigación, la cual fue de 55 kgf/cm² y, por lo tanto, se estableció éste como el valor constante. Igualmente, el tiempo de compresión fue evaluado a partir de 30 minutos sin obtener una compactación adecuada hasta alcanzar 180 minutos (3 horas), valor que está en concordancia con los resultados obtenidos en otras investigaciones (Raudah & Zulkifli, 2017).

Por su parte, para el contenido de agua se llevaron a cabo inicialmente pruebas preliminares sin adición de agua a la mezcla, ya que al hacerle la prueba de humedad a la cascarilla de arroz arrojó un contenido de agua de 8.4 por ciento en peso. Sin embargo, bajo estas condiciones la cohesión de la mezcla no fue suficiente para obtener un comprimido de biomasa compacto, por lo cual se llevó a cabo la adición progresiva de agua hasta establecer el valor de 20 por ciento en peso como una cantidad de agua adicionada adecuada para la compactación de la mezcla.

Una vez establecidos los valores constantes para estos parámetros se definió el diseño de experimentos de tipo 3² que se muestra en la Tabla 1 para cada uno de los aglomerantes, estableciendo tres niveles para las dos variables: temperatura y porcentaje de aglomerante, para un total de 18 pruebas experimentales. Inicialmente se llevaron a cabo ensayos a baja temperatura, desde ambiente hasta 80 °C, con el fin de reducir el consumo de energía eléctrica durante el proceso, lo cual reduce el margen de eficiencia económica. Sin embargo, a estas condiciones se observó que no fue posible obtener comprimidos de biomasa compactos, razón por la cual se establecieron valores superiores 100 °C, de acuerdo con los resultados reportados para la elaboración de comprimidos a partir de otros residuos agrícolas (Lozano, 2006) (Barranco, Fandiño, Ortega, González, & Gómez, 2016). Por el contrario, aunque la revisión bibliográfica reporta la obtención de comprimidos de biomasa a partir de cascarilla de arroz con contenidos de

aglomerante entre 1 y 10 por ciento en peso (Rahaman, 2017), en las pruebas preliminares no fue posible alcanzar un adecuado grado de compactación, por lo cual se establecieron valores superiores a 10 por ciento en peso para la presente investigación.

Tabla 1.

Diseño de experimentos.

Aglomerante	Almidón de yuca								
Nomenclatura	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
Aglomerante [% peso]	10	10	10	20	20	20	30	30	30
Temperatura [°C]	120	150	180	120	150	180	120	150	180

Aglomerante	Glicerina								
Nomenclatura	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
Aglomerante [% peso]	10	10	10	20	20	20	30	30	30
Temperatura [°C]	120	150	180	120	150	180	120	150	180

2.4 Caracterización de los Comprimidos de Biomasa

La caracterización de los comprimidos de biomasa obtenidos a partir de cascarilla de arroz se llevó a cabo empleando las 4 técnicas de caracterización, de las cuales las pruebas de poder calórico superior e impacto son los principales criterios para la selección del mejor comprimido, las pruebas de termogravimetría y dureza son pautas complementarios para ratificar los criterios principales de selección. Dicha caracterización fue desarrollada en la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.

2.4.1 Dureza. Esta prueba se llevó a cabo para determinar la resistencia al rayado de los comprimidos de biomasa obtenidos, empleando un durómetro short tipo D digital como el que se observa en la Figura 6 con precisión de 2 grados de dureza shore D, ángulo del cuerpo de penetración de 30 ° y profundidad máxima de penetración de 2,5 mm.

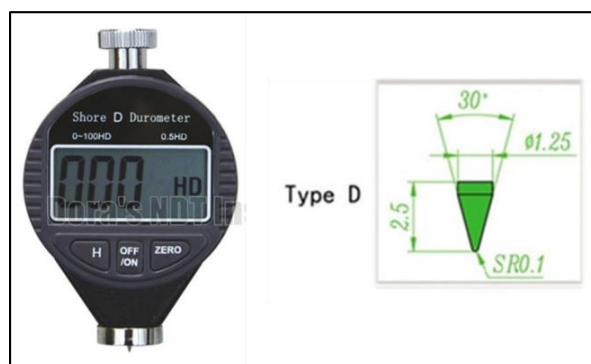


Figura 3. Durómetro short tipo D.

2.4.2 Poder calórico superior. El poder calórico superior se determinó en una bomba calorimétrica que se observa en la Figura 7, y corresponde a la cantidad total de calor por unidad de masa desprendido en la combustión completa de un combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado y, por consiguiente, se tiene en cuenta el calor desprendido en este cambio de fase.



Figura 4. Bomba calorimétrica.

2.4.3 Termogravimetría (TGA). El análisis de termogravimetría se llevó a cabo en una balanza TA Instruments TGA 2050 que se muestra en la Figura 8, con exactitud de $\pm 0,1$ % en peso durante 200 minutos, con el fin de analizar la descomposición térmica de los comprimidos

de biomasa y determinar su contenido de humedad, volátiles, carbono fijo y cenizas (Park & Yoon, 2013).



Figura 5. Balanza termogravimétrica TA Instruments TGA 2050.

2.4.4 Prueba de Charpy. Este ensayo se llevó a cabo empleando un péndulo de Charpy que se muestra en la Figura 9, a través del cual se determinó la fuerza de impacto necesaria para quebrar el material, en unidades de Newton, ya que los comprimidos de biomasa deben tener alta resistencia al impacto para no romperse durante su almacenamiento y transporte (Schuurmans, 2018).

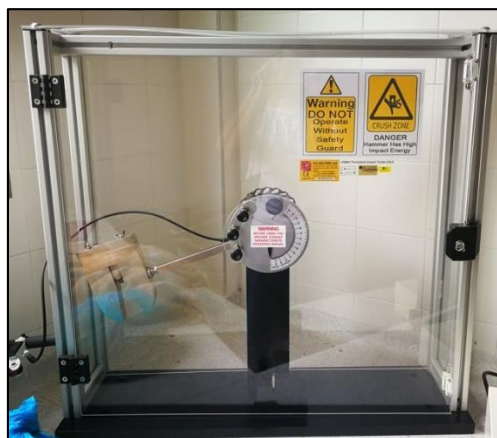


Figura 6. Péndulo de Charpy.

3. Resultados y Análisis

3.1 Dureza

Las mediciones de dureza se llevaron a cabo en 5 puntos diferentes de la superficie de los comprimidos de biomasa obtenidos a partir de la cascarilla de arroz, con el fin de obtener un valor promedio representativo. Así, en la Figura 10 se presentan los valores de dureza medidos para los comprimidos de biomasa obtenidos con la adición de glicerina, donde se observa que el aumento del contenido de aglomerante conduce a la reducción de la dureza del producto final para las temperaturas de 120 °C (G1, G4, G7) y 180 °C (G3, G6, G9), lo cual está asociado a la tendencia higroscópica de la glicerina que ocasiona el deterioro del material (Lozano, 2006). Igualmente, a concentraciones de aglomerante de 10 y 20 por ciento en peso, el aumento de la temperatura tiende a aumentar la dureza del material debido a que el calor transferido a la mezcla favorece la aglomeración de las partículas y reduce la cantidad de poros, permitiendo que el material sea más compacto y tenga una mayor resistencia al rayado (Marroquín, 2010).

Sin embargo el comportamiento a 30 por ciento de aglomerante en peso es errático debido a las propiedades de la glicerina anteriormente mencionada y los problemas de homogeneidad del material, generan que a 150 °C(G8) sea la de mayor dureza, ya que a esta temperatura se logra que el material tenga la mejor cohesividad sin perder sus propiedades.

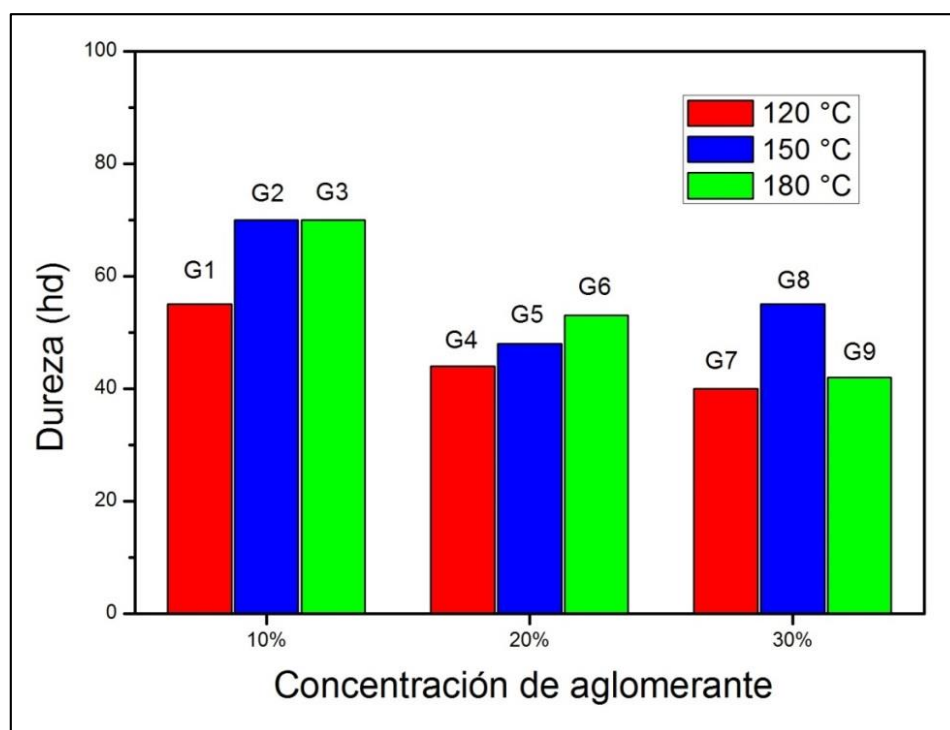


Figura 7. Ensayo de dureza para los comprimidos de biomasa con glicerina.

Por su parte, en la Figura 11 se presentan los resultados de dureza de los comprimidos de biomasa obtenidos empleando almidón de yuca como aglomerante. Observamos que al mantener el porcentaje de aglomerante en 10 porciento, el comprimido que fue compactado a la temperatura de 180°C (A3) obtuvo la mayor dureza. Si se realiza un aumento en el porcentaje de aglomerante independiente de la temperatura, el porcentaje de dureza desciende (A4, A5, A6, A7 y A8); se consideró que esto ocurre debido a que el porcentaje de humedad presente en la cascarilla de arroz y el porcentaje de agua agregado no logran la homogenización completa con la cantidad de aglomerante que posee la mezcla, por tal motivo se genera una fluctuación en la uniformidad de la mezcla. Para el comprimido A9, el aumento en el porcentaje de dureza ocurre al ejercer presión y llegar a la temperatura de 180°C debido la descomposición térmica del material, lo que generó

perdidas de aglomerante por la parte superior del molde, esto causo que el contenido de aglutinante fuera menor al inicialmente agregado.

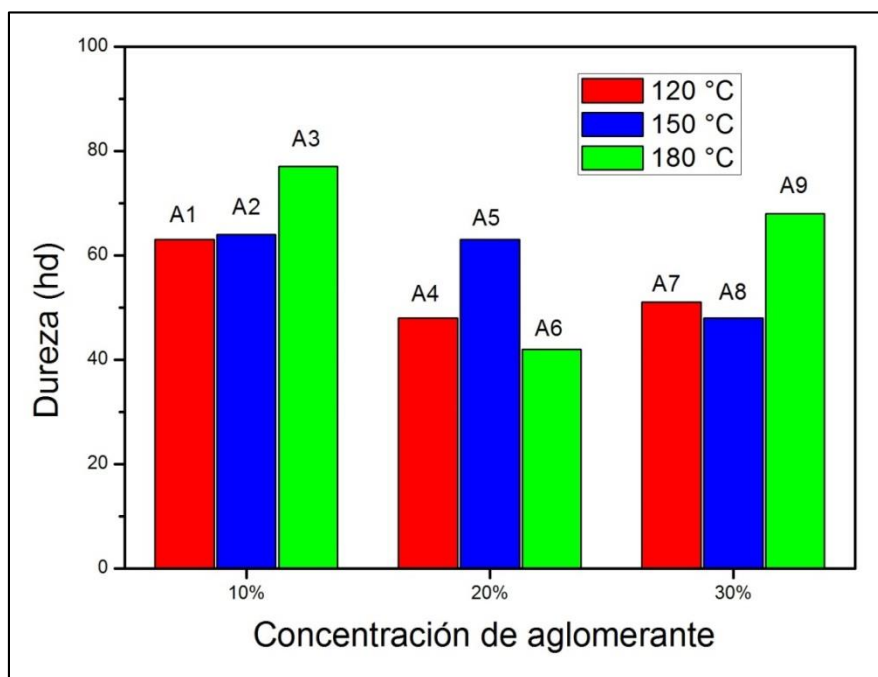


Figura 8. Ensayo de dureza para los comprimidos de biomasa con almidón de yuca.

Además de los resultados de la dureza medidos para los comprimidos de biomasa elaborados a partir de cascarilla de arroz, se observó que los productos obtenidos a temperatura de 120 °C para los dos agentes aglomerantes (G1, G4, G7, A1, A4, A7) presentaron un alto grado de deterioro como se muestra en la Figura 12, por los cual fueron descartados para los siguientes ensayos de caracterización.



Figura 9. Comprimidos de biomasa obtenidos a temperatura de 120 °C.

3.2 Poder Calórico Superior

La medición del poder calórico superior se llevó a cabo para determinar su potencial para sustituir a la madera como combustible sólido. Así, en la Figura 13 se presentan los valores obtenidos para los comprimidos de biomasa fabricados a partir de cascarilla de arroz con glicerina como aglomerante, donde se observa que la temperatura de a la cual se lleva a cabo la compactación no tiene una influencia significativa sobre el poder calórico superior de los comprimidos. Por su parte, el aumento del contenido de aglomerante conlleva a una pequeña reducción del poder calórico superior asociada a las propiedades higroscópicas de la glicerina, que promueve la absorción de humedad del ambiente (Lozano, 2006).

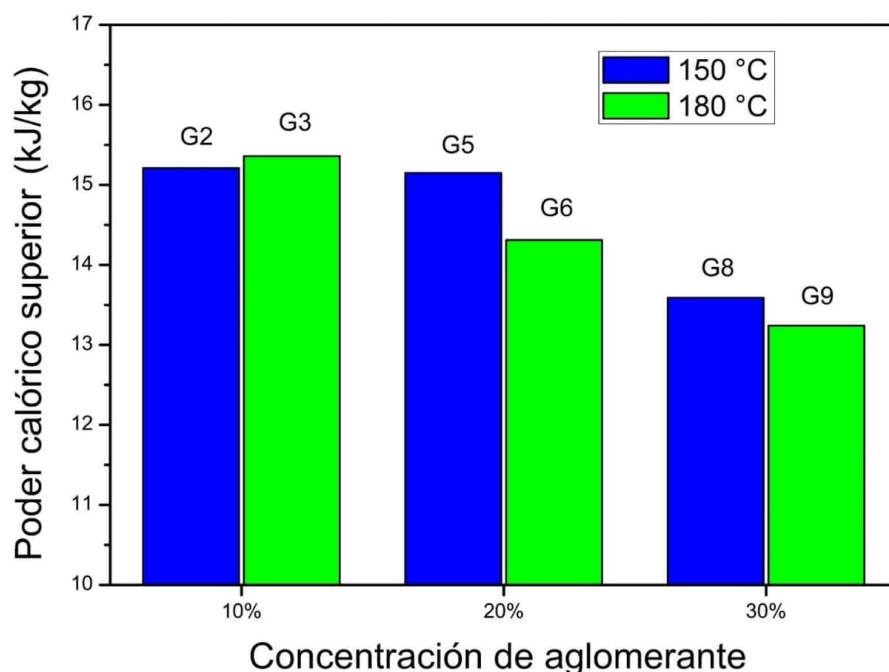


Figura 10. Poder calórico superior para los comprimidos de biomasa con glicerina.

Por su parte, el poder calórico superior de los comprimidos de biomasa elaborados con almidón de yuca como aglomerante tiende a aumentar con la temperatura de compactación, debido a que la mayor temperatura favorece al aumento de la cohesión entre la cascarilla de arroz y el almidón de yuca y permite que la mezcla compactada no absorba humedad del ambiente, evitando la disminución de su poder calórico superior (Rodrigues G. , Helmer, Devens, Fonseca, & Simonelli, 2017). Por el contrario, el aumento del contenido de aglomerante no afecta significativamente el poder calórico superior de los comprimidos de biomasa obtenidos a 150 °C. Al hacer la comparación con los comprimidos elaborados a partir de aserrín, los cuales poseen un poder calórico superior alrededor de los 19 KJ/kg (Gallipoliti, Martina, Corace, Aeberhardt, & García, 2017) y al observar que los comprimidos obtenidos a partir de cascarilla de arroz poseen un poder calórico superior redondeado de 15 KJ/ kg. Se puede afirmar, que a pesar de tener una diferencia

entre sus poderes calóricos, esta está cerca del material más usado como fuente de energía en la industria. Esto genera que la cascarilla de arroz pueda tener un valor agregado como biocombustible sólido.

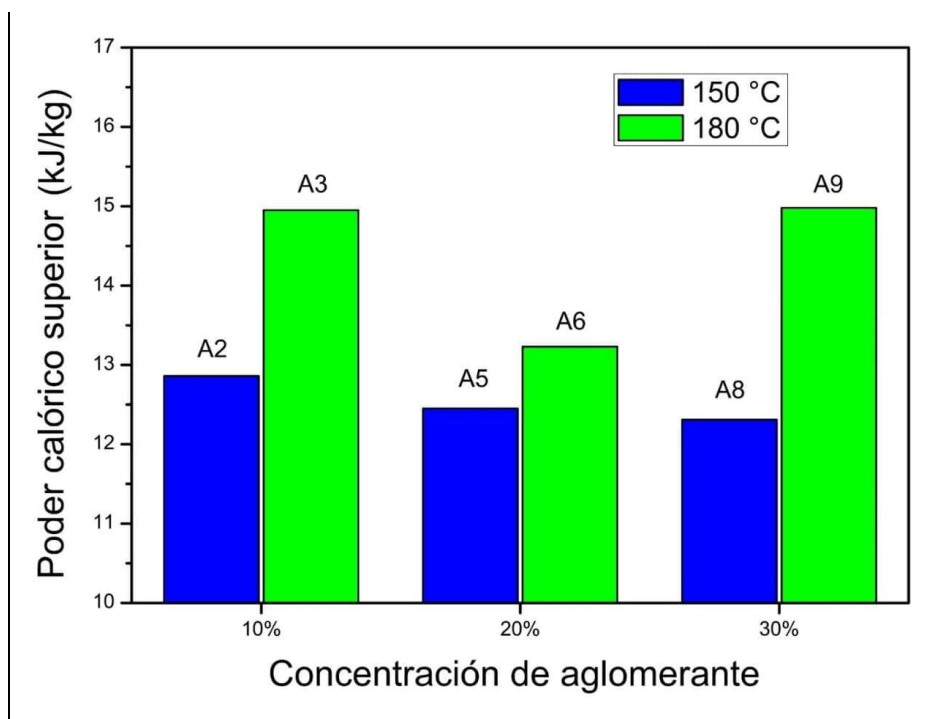


Figura 11. Poder calórico superior para los comprimidos de biomasa con almidón de yuca.

3.3 Termogravimetría

El análisis de termogravimetría (TGA) se llevó a cabo para determinar la descomposición térmica de los comprimidos de biomasa fabricados a partir de cascarilla de arroz y determinar su contenido de humedad, volátiles, carbono fijo y cenizas. Así, en la Figura 15 se presenta el resultado obtenido para la muestra G2, mientras que los resultados obtenidos para las demás muestras se presentan en el Anexo B.

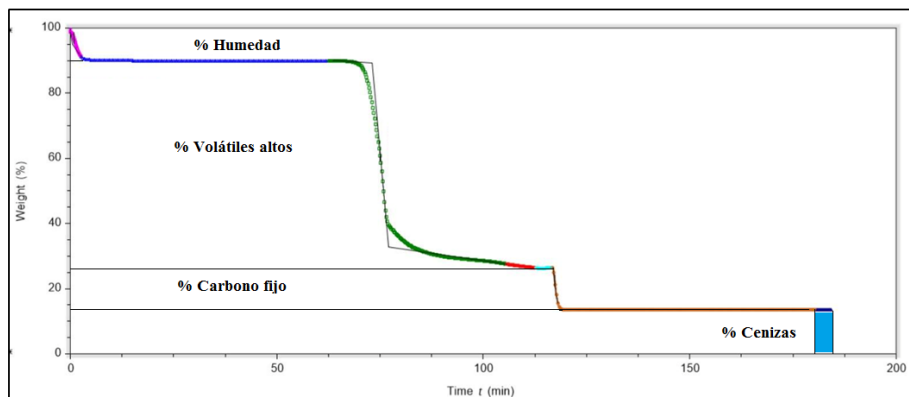


Figura 12. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa G2.

La composición porcentual de humedad, volátiles, carbono fijo y cenizas para los comprimidos de biomasa fabricados con glicerina como aglomerante se presenta en la Figura 16, donde es posible observar un cambio mínimo en todos sus parámetros, lo que nos lleva a afirmar que los comprimidos con glicerina tienden a tener un tiempo similar de quemado a diferentes condiciones. Basándonos en el parámetro más relevante para las nuevas energías no contaminantes, podemos afirmar que según la prueba termogravimetría para los comprimidos con glicerina el mejor comprimido para el ambiente es G2 ya que es el que posee menor producción de cenizas.

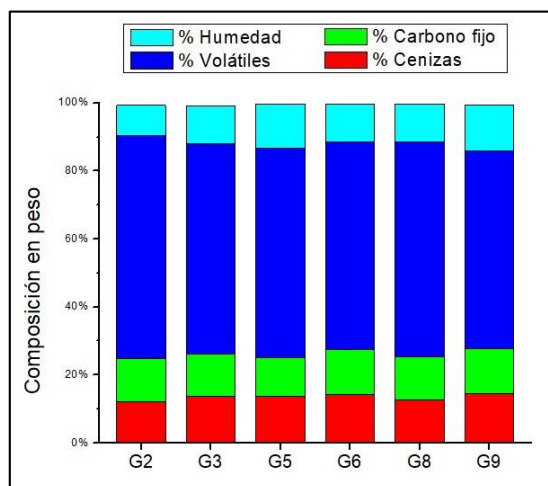


Figura 13. Composición de los comprimidos de biomasa con glicerina.

Por su parte, la composición porcentual de los comprimidos de biomasa fabricados con almidón de yuca como aglomerante se presenta en la Figura 17, observamos los diferentes parámetros como el carbono fijo, este parámetro nos dice cuanto por ciento del comprimido se va quemar con mayor velocidad generando un poder calórico mayor. Se puede visualizar a los dos comprimidos con % de volátiles más alto A3 y A9, sin embargo, el comprimido más aceptable según la prueba de Termogravimetría (TGA), es A9 ya que posee una menor producción de cenizas, lo que lo hace un material con mayor beneficio para el medio ambiente.

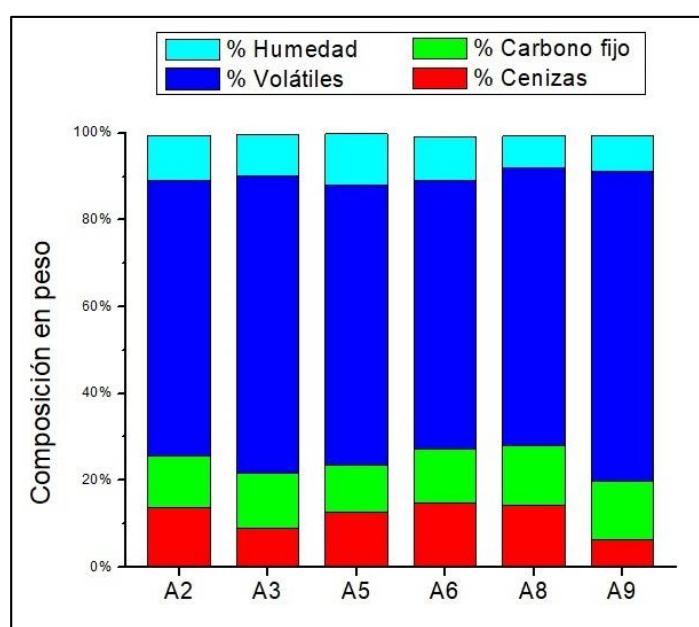


Figura 14. Composición de los comprimidos de biomasa con almidón de yuca.

3.4 Prueba de Charpy

El ensayo de Charpy se llevó a cabo para determinar la fuerza de impacto necesaria para quebrar los comprimidos de biomasa fabricados a partir de cascarilla de arroz. Sin Embargo, los comprimidos de biomasa elaborados con glicerina como agente aglomerante que se muestran en la Figura 18 sufrieron la pérdida de su consistencia tras dos semanas de fabricación debido a la

absorción del agua del ambiente, lo cual afectó sus propiedades mecánicas y se desmoronaron. Por esta razón, los comprimidos de biomasa elaborados con glicerina no se analizaron mediante la prueba de Charpy, ya que el material montado en el equipo no presentó la rigidez necesaria para ser golpeado por el péndulo.



Figura 15. Pérdida de rigidez para los comprimidos de biomasa con glicerina.

Por su parte, los resultados de fuerza de impacto medidos para los comprimidos de biomasa con almidón de yuca se presentan en la Figura 19, donde se observa que a temperatura de 150 °C la fuerza de impacto disminuye a medida que se aumenta el contenido de aglomerante en el material, ya que al existir un exceso de aglutinante no se logra una cohesión total entre todos los componentes del comprimido, lo que conlleva a no existir una homogeneidad en material generando una pérdida de dureza. El comprimido A3 posee la mayor tolerancia a la fractura, esto es debido a la temperatura y al no presentar exceso de aglomerante logran una unión entre aglomerante y cascarilla es más sólida. Autores como Rodrigues et. (2017) muestran resultados satisfactorios y similares utilizando el almidón al 10 por ciento y obteniendo la fuerza de impacto sobre los 10 (N). Para concluir la Figura 19 nos muestra que la temperatura la cual el material tiene

mayor compactación es la de 180°C utilizando un máximo de 10 por ciento de aglomerante en peso total de la mezcla.

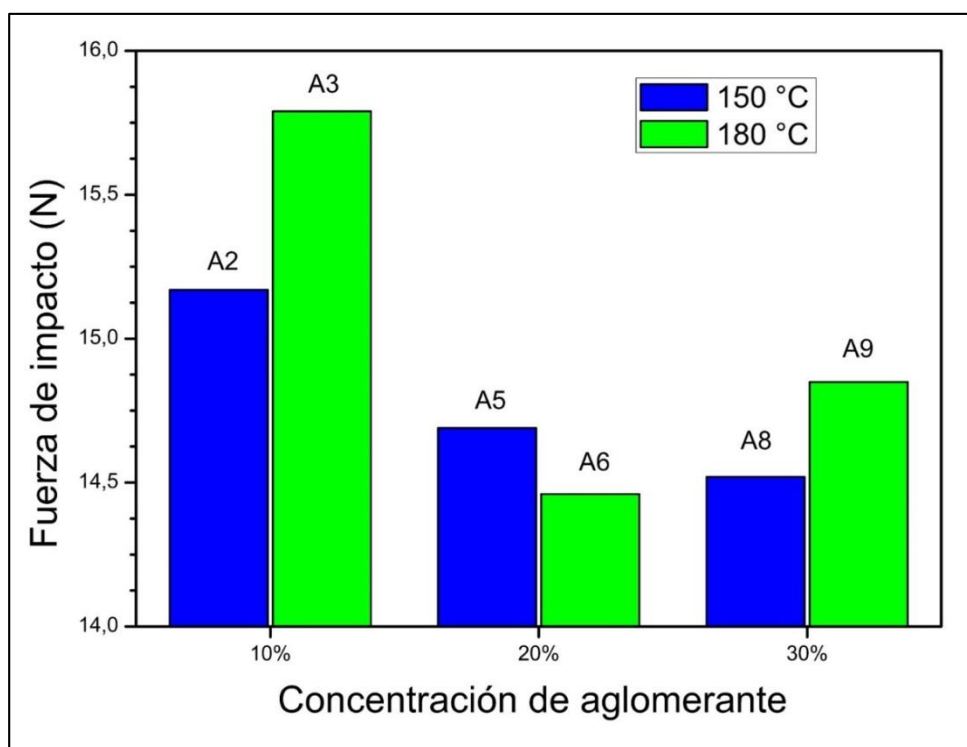


Figura 16. Fuerza de impacto para los comprimidos de biomasa con almidón de yuca.

Después de realizar la caracterización completa de los comprimidos de biomasa, se puede evidenciar que las muestras que contienen almidón como aglomerante a un 10 por ciento en peso, presentan la mejor combinación de las evaluadas en este trabajo. Aunque los comprimidos A2 y A3 sobresalen por sus características similares, el comprimido A3 presentan los mejores rangos en las pruebas de caracterización. Debido a los costos en servicios industriales y gastos energéticos producidos por el comprimido A3, se decide tomar el comprimido A2 como el mejor comprimido que se presenta en el anexo C, puesto que este tendrá un costo menor a la hora de su elaboración, ya que la temperatura a la cual es fabricado es 30 °C menor que la del comprimido A3.

4. Conclusiones

El aumento de la concentración de agente aglomerante disminuye el poder calórico superior y la dureza de los comprimidos de biomasa a partir de cascarilla de arroz debido a que el exceso presente en el porcentaje de aglomerante dificulta la cohesión y homogenización entre los componentes, disminuyendo así su poder calorífico.

En el análisis próximo de termogravimetría llevado a cabo para los comprimidos de biomasa obtenidos a partir de cascarilla de arroz indicó cuales produjeron menor cantidad de cenizas, estos son los más recomendables debido a su menor impacto ambiental al producir menos material particulado en caso de ser usados como biocombustibles sólidos en una combustión.

Se puede apreciar que el uso de glicerina como agente aglomerante en la elaboración de comprimidos de biomasa a partir de cascarilla de arroz no es factible debido a la absorción de agua del ambiente, lo cual afecta negativamente la consistencia y hace que los comprimidos pierdan su compactación.

5. Recomendaciones

Analizar el efecto que produce la sinergia de la mezcla de almidón de yuca y glicerina en diferentes proporciones como agentes aglomerantes en la elaboración de comprimidos de biomasa a partir de cascarilla de arroz.

Evaluar en futuros trabajos el comportamiento de estos comprimidos en una caldera industrial.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar, J. S. (2009). Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz.
- André, F., De Castro, L., & Cerda, E. (2012). Las energías renovables en el ámbito internacional. Cuaderno económicos, 83, 11-36.
- Barranco, C. B., Fandiño, J. M., Ortega, J. P., González, Y. E., & Gómez, R. D. (18 de abril de 2016). Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tusa de maíz,. 643.
- Bhattarai, P., Sapkota, R., & Ghimire, R. (2016). Effects of binder and charcoal particle size on the physical and thermal properties of beehive briquettes. Proceedings of IOE Graduate Conference, 57–63.
- Cárdenas, V. (2012). Biorefinerías para la producción de biocombustibles de segunda generación. Recuperado el 2018, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27803/tesisUPV9008>.
- Cdi. (1993). Briquettes à base de déchets végétaux. Les Guides du CDI.
- Condia, B. N. (2013). Plan de negocios para la creación de una empresa dedicada a la produccion y comercializacion de pellets y briquetas de aserrín. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Damien, A. (2010). La biomasa: Fundamentos, Tecnologías y Aplicaciones.
- DANE. (2019). Encuesta nacional de arroz mecanizado. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Bogotá.
- Duque, P. J., & Cardona, A. C. (2010). Análisis de la refinación de glicerina obtenida como coproducto en la producción de biodiésel. Colombia.

- Enciso, E., Colomer, R., & Regato, P. (2015). Thermal Biomass for Lebanon.
- Gallipoliti, V., Martina, P., Corace, J., Aeberhardt, R., & García, E. S. (2017). Fabricacion de briquetas con aserrin blanco de pino. analisis inmediato y obtencion de su poder calorifico.
- Hakkila, P. (2004). Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood Energy Technology Programme 1999 – 2003. Final Report. Technology Programme Report 6/2004.
- Hierro, L. (27 de junio de 2018). El pais. Recuperado el 10 de Febrero de 2018, de https://elpais.com/elpais/2018/06/26/planeta_futuro/1530040354_449192.html
- Holmer, M., Richardson, & Bjorheden, R. (2002). Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice. Kluwer Academic Publishers.
- Idae. (2007). Biomasa: Maquinaria agrícola y forestal.
- IDAE. (2008). Energía de la biomasa. Manuales de Energía Renovables. Madrid, España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Lebanon, U. (2012). National Bioenergy Strategy Report for Lebanon. CEDRO Program.
- Lozano, V. M. (2006). Fabricación de briquetas de cáscara de almendra.
- Lubwama, M., & Yiga, V. (Oct. 2017). Development of groundnut shells and bagasse briquettes as sustainable fuel sources for domestic cooking applications in Uganda.
- Marroquín, E. S. (2010). Evaluación del efecto de la temperatura y el tiempo de calentamiento en la capacidad aglutinante de dos tipos de almidones para la formulación de comprimidos orales.
- Mymrin, V. (1998). Empleo de residuos industriales siderúrgicos como materiales aglomerantes en construcción .

- Ortíz, L., Tejada, A., & Piñeiro, G. (2013). Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. *Revista CIS-Madera*.
- Park, W.-H., & Yoon, K.-B. (2013). Optimization of pyrolysis properties using TGA and cone calorimeter test.
- Penélope. (13 de Mayo de 2014). twenergy. Recuperado el 13 de enero de 2019, de twenergy: <https://twenergy.com/a/como-fabricar-briquetas-1236>
- Peñaranda Gonzalez, L. V. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. Recuperado el diciembre de 2018, de <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2040/2251>
- Piñeros Castro, Y. (2011). Aplicación de tecnologías para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá.
- Rahaman, S. A. (2017). Research article: Characterization of cold densified rice straw briquettes and the potential use of sawdust as binder.
- Raudah, & Zulkifli. (2017). Optimization of binder addition and particle size for densification of coffee husks briquettes using response surface methodology.
- Rey, J. A. (2015). docplayer. Recuperado el enero de 2019, de <https://docplayer.es/5525831-Capitulo-iv-aglutinantes.html>
- Riegelhaupt, E., & Arias, C. (2009). Oportunidades y desafíos para la producción de biocombustibles en América Latina. . Bogor, Indonesia: CIFOR.
- Rincón, M., & Silva, L. (2014). Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. Bogotá, Colombia: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía.

- Rodrigues, G., Helmer, G., Devens, M., Fonseca, P., & Simonelli, G. (2017). Produção de briquetes para queima utilizando finos da produção de carvão vegetal e glicerina. holos, 331.
- Rodrigues, G., Helmer, L., Devens, M., Fonseca, P., & Simonelli, G. (2017). Produção de briquetes para queima utilizando finos da produção de carvão vegetal e glicerina. holos, 333.
- Schlegel, B. (Octubre de 2001). Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Simposio Internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia.
- Schuermans, J. (2018). Design and Dynamic Force Verification of Instrumented Charpy Strikers for the Tinius Olsen Pendulum Impact Tester. En P. B.-2. 100 Barr Harbor Drive.
- Solano, D., Vinyes, P., & Arranz, P. (2016). Biomass briquetting process. Líbano: UNDP-CEDRO.
- Soto, V. (11 de Febrero de 2003). El tiempo . Recuperado el 18 de enero de 2019, de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-972709>
- Valiente, M. M. (2017). <http://recursosbiblio.url.edu.gt>. Obtenido de <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjrkd/2017/02/02/Valiente-Astrid.pdf>
- Valverde, A., Sarria, I. J., & . Monteagudo, Y. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la.
- Vargas, J., Alvarado, P., Vega-Baudrit, J., & Porras, M. (2013). Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. 99.
- Velázquez, M. B. (2006). Aprovechamiento de los residuos forestales para uso energético. Universidad Politécnica de Valencia.

Apéndices

Apéndice A. Diseño del Primer Molde

El primer molde es diseñado para la obtención de comprimidos de biomasa en forma de cilindros con dimensiones 5 cm de largo y 2,95 cm de diámetro denominados briquetas, de acuerdo con la distancia máxima que existe entre las dos placas de la prensa vulcanizadora. El molde que se muestra en la Figura 20 consiste en un cilindro de 12 cm de diámetro y 12 cm de altura con 4 orificios cilíndricos pasantes simétricos donde se ubica la mezcla, cada uno con diámetro de 3 cm. Por su parte, la tapa que se muestra en la Figura 21 corresponde a un disco de 12 cm de diámetro y 1 cm de espesor con 4 varillas concéntricas de diámetro 2,95 cm y altura de 7 cm, cada una encaja de las cuales encaja en los orificios correspondientes del cilindro. Una vez ubicada la tapa, cada uno de los compartimientos donde se ubica la mezcla corresponde a un cilindro de 5 cm de largo y 2,95 cm de diámetro como se muestra en la Figura 22.

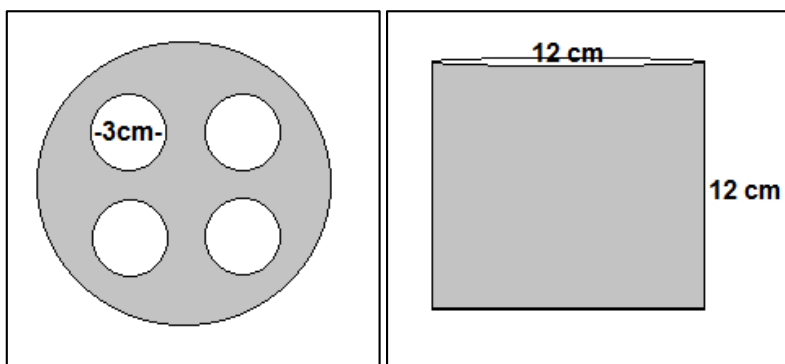


Figura 17. Cilindro del molde para la elaboración de briquetas.

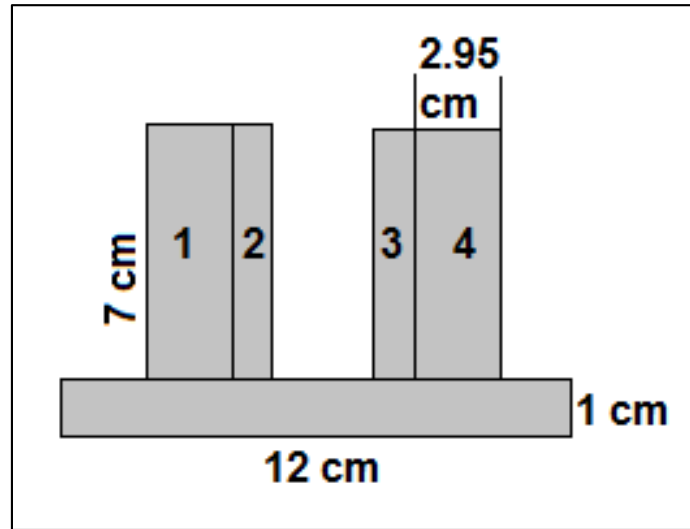


Figura 18. Tapa del molde para la elaboración de briquetas.

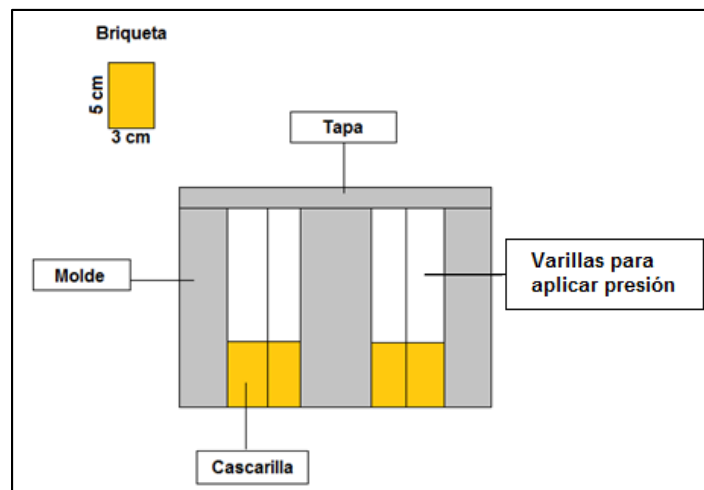


Figura 19. Montaje del molde para la elaboración de briquetas.

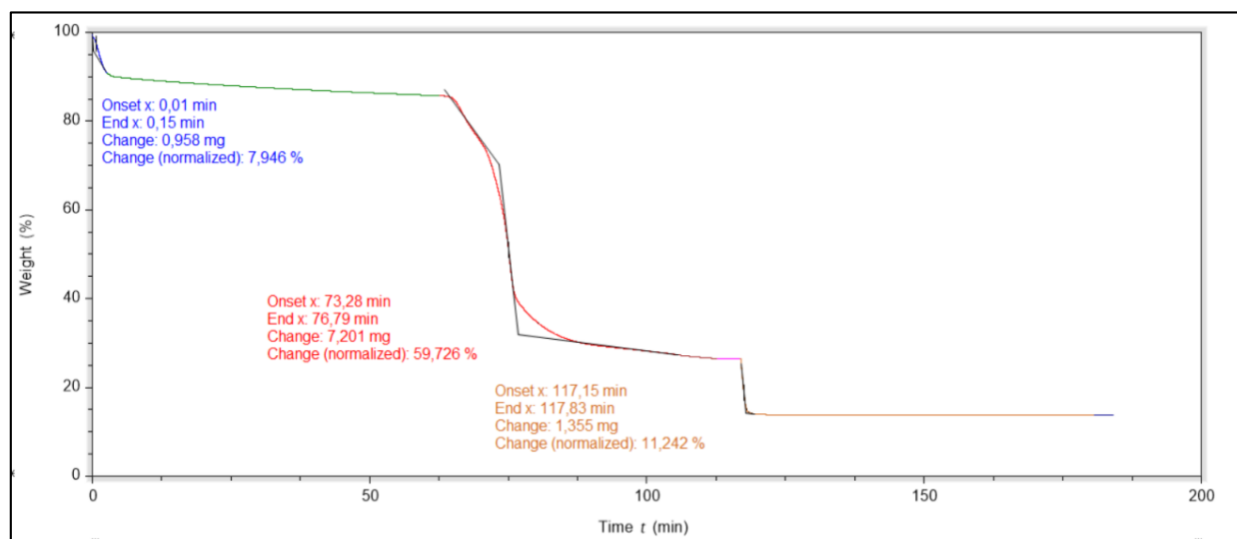
Apéndice B. Gráficas de termogravimetría

Figura 20. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa G3.

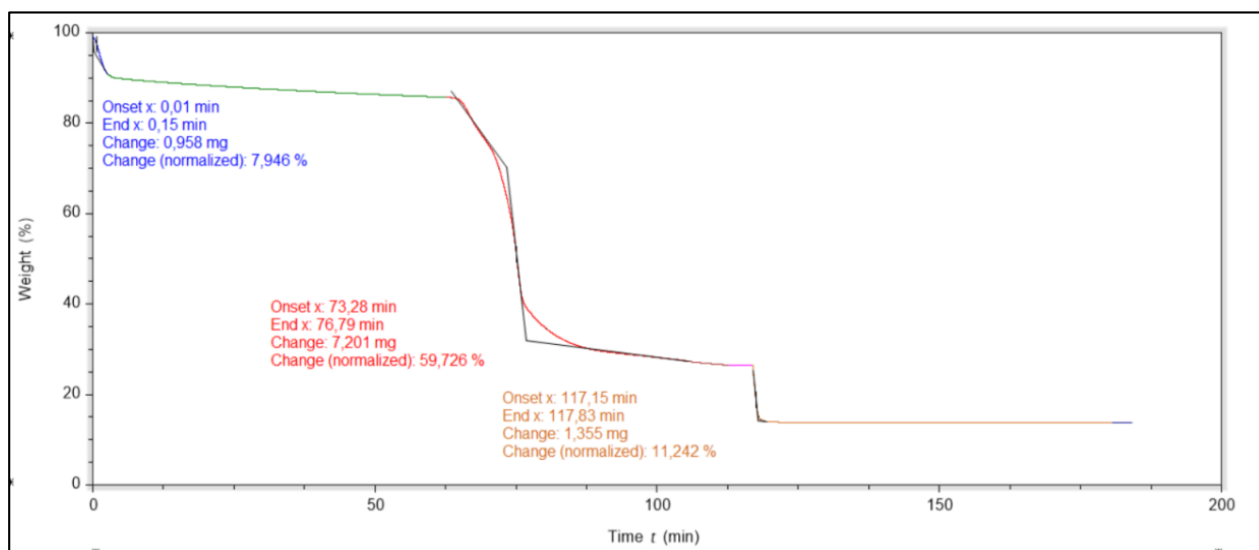


Figura 21. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa G5.

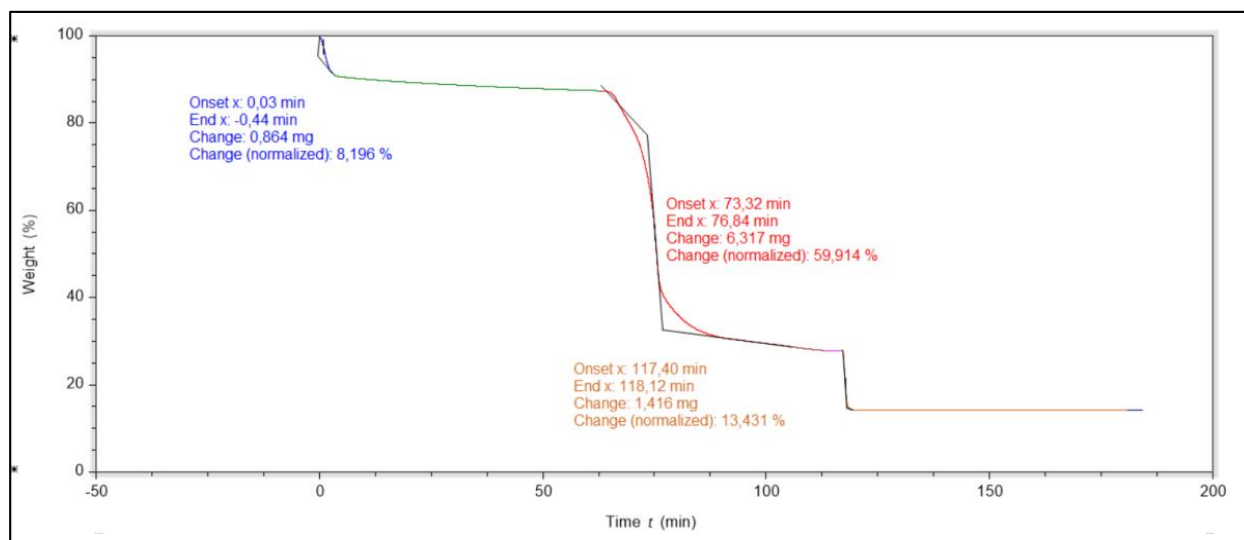


Figura 22. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa G6.

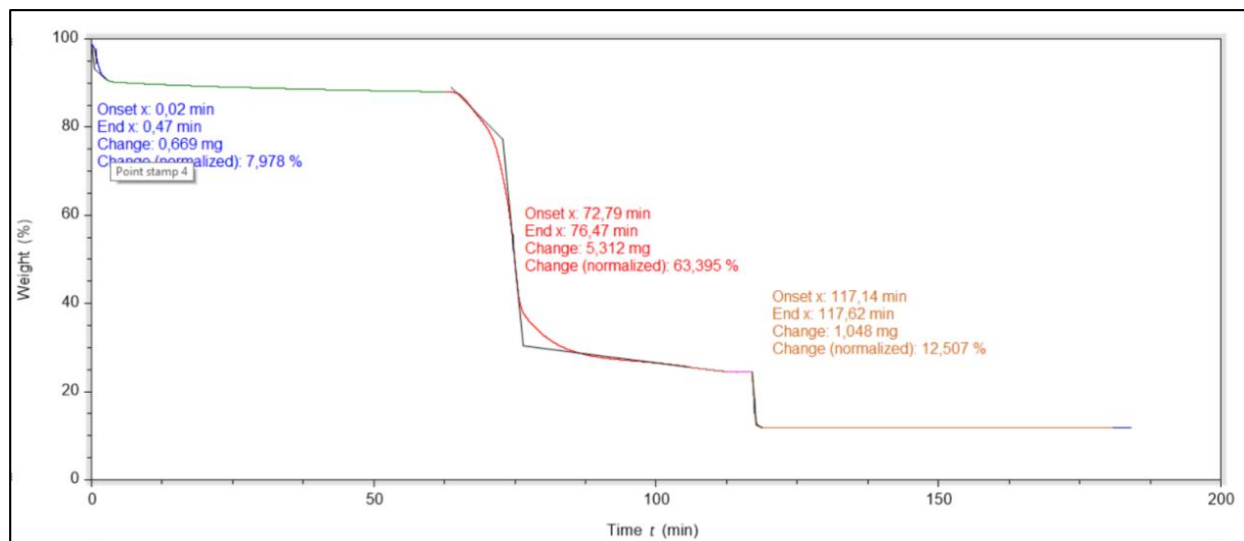


Figura 23. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa G8.

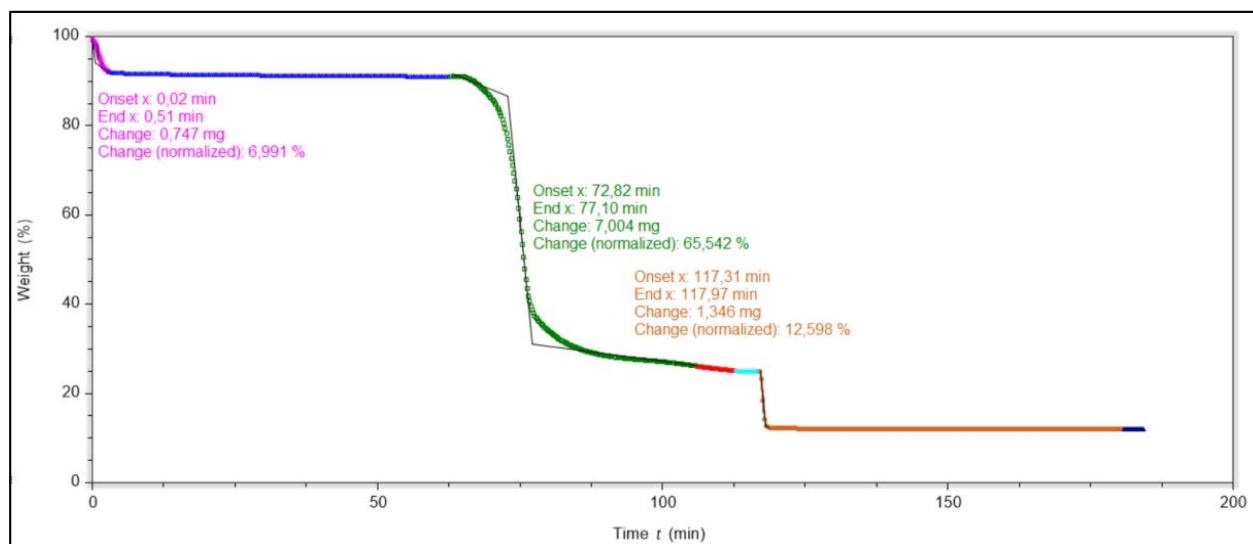


Figura 24. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa G9.

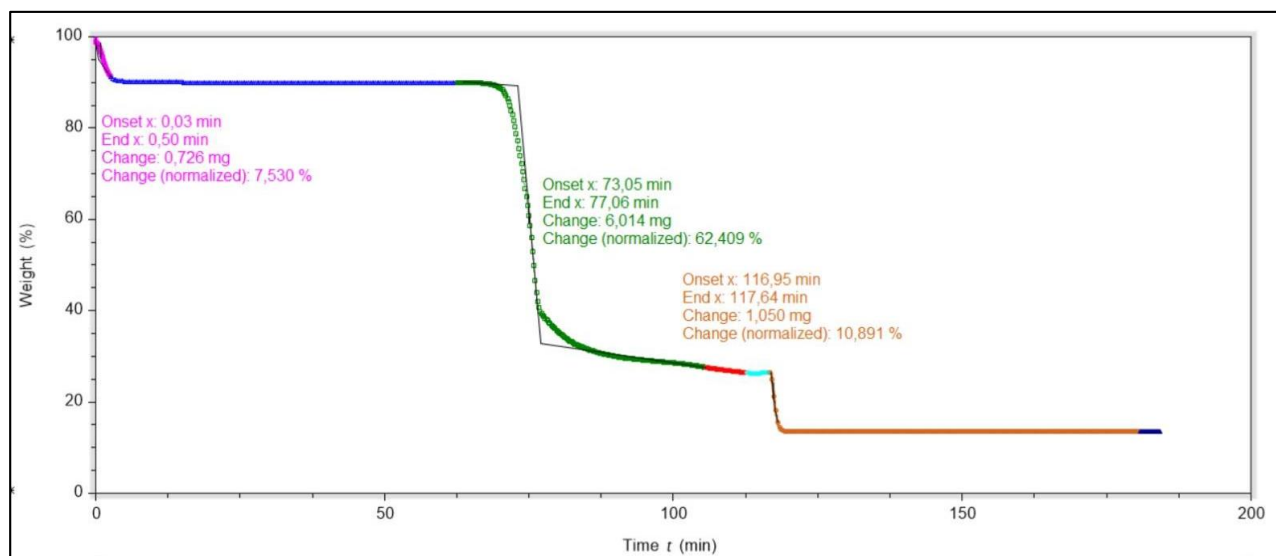


Figura 25. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa A2.

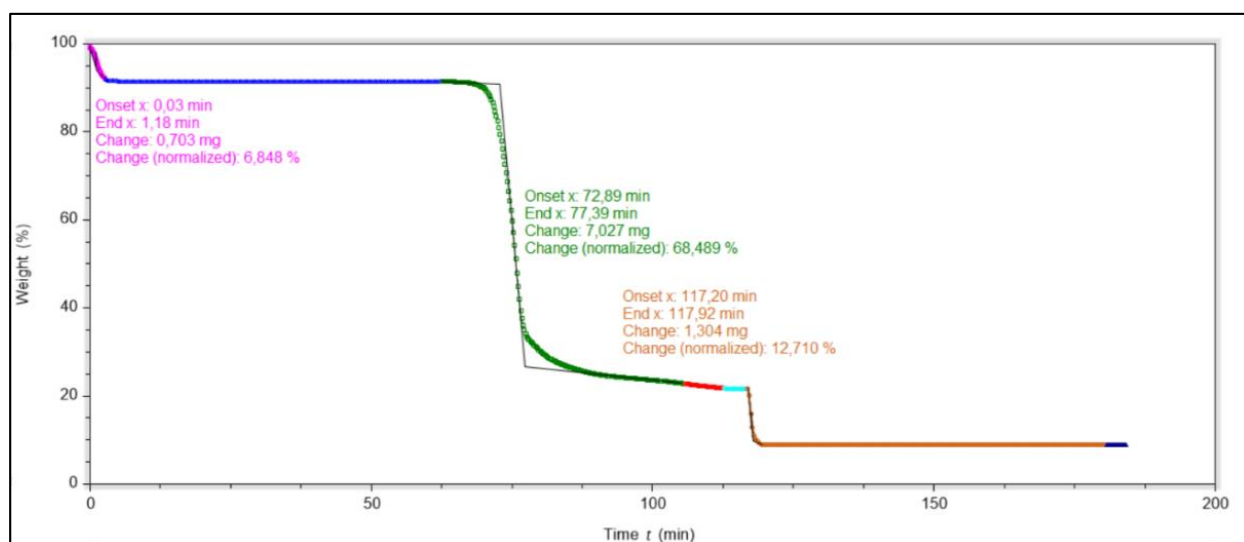


Figura 26. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa A3.

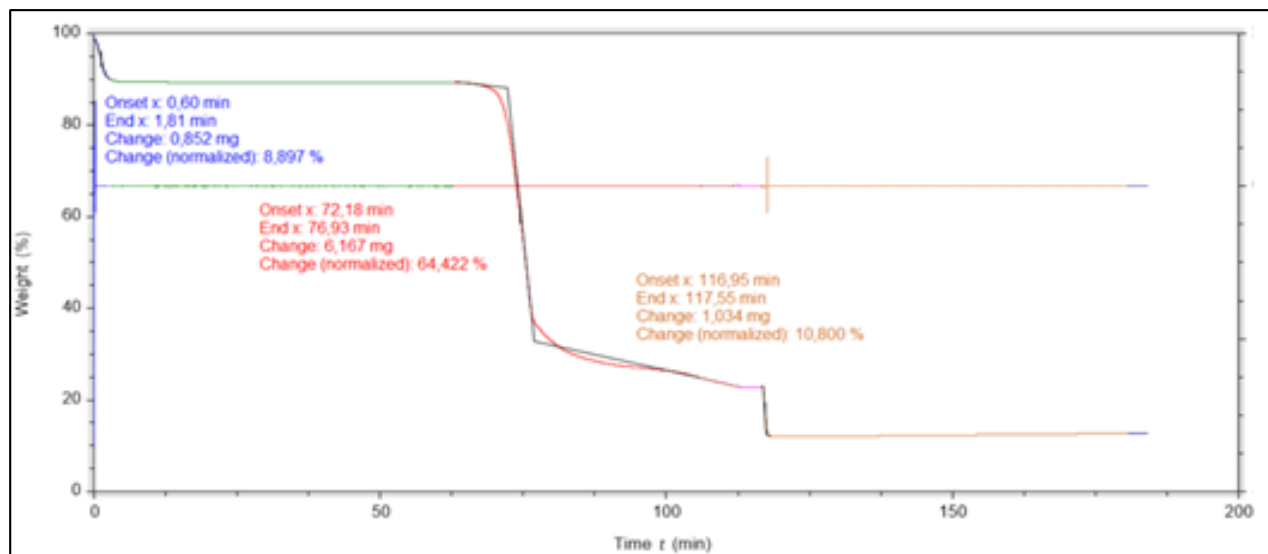


Figura 27. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa A5.

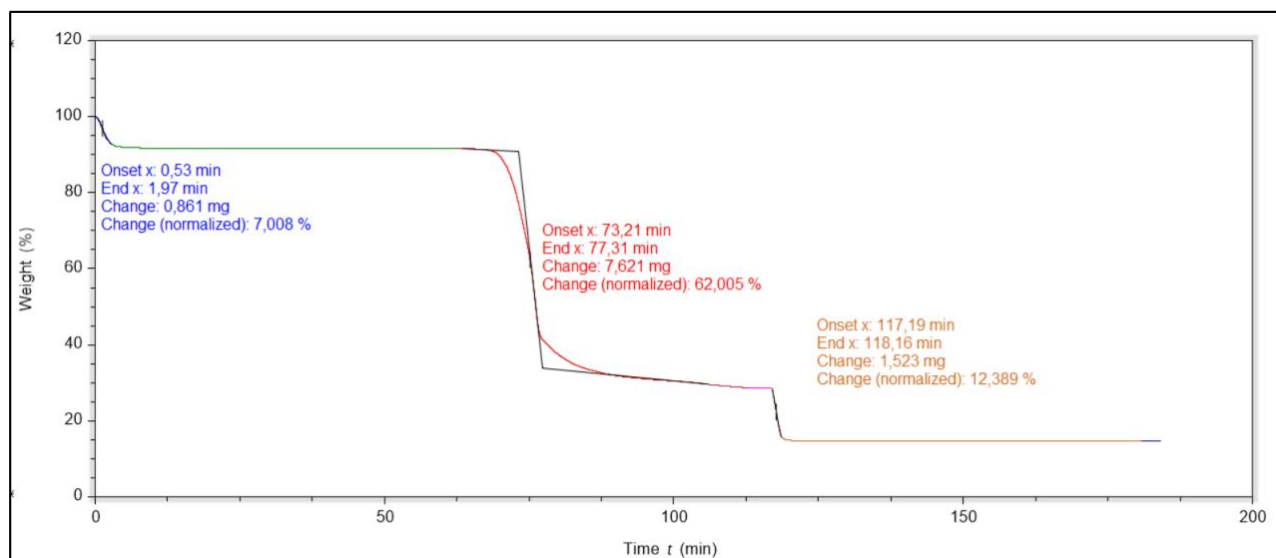


Figura 28. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa A6.

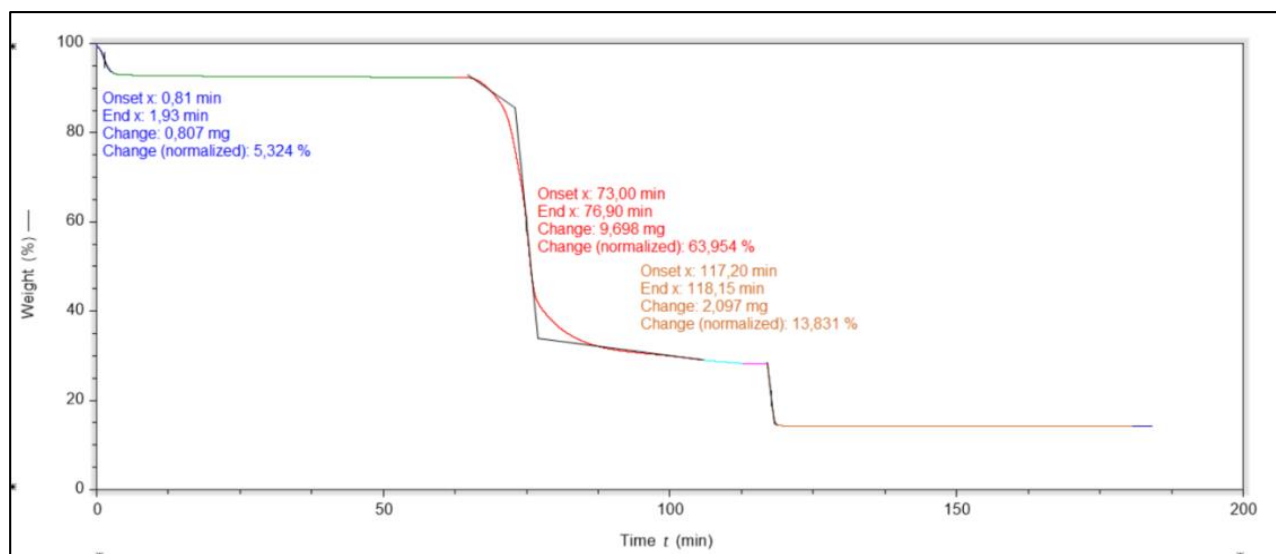


Figura 29. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa A8.

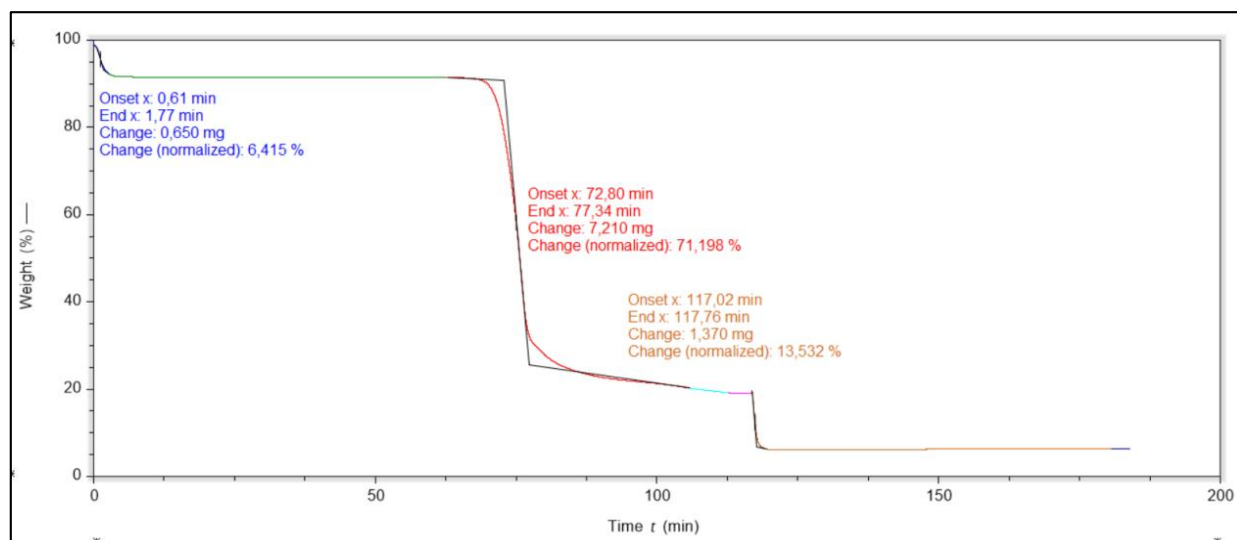


Figura 30. Análisis de termogravimetría para el comprimido de biomasa A9.

Apéndice C. Comprimido de Biomasa Obtenido a Partir de Cascarilla de Arroz

El comprimido de biomasa obtenido a partir de cascarilla de arroz que se presenta en la Figura 34 fue elaborado con los siguientes parámetros:

Presión de compresión: 55 kgf/cm².

Tiempo de compresión: 180 minutos.

Contenido de agua adicionada: 20 % en peso.

Contenido de aglomerante: 10 % en peso.

Temperatura: 150 °C.



Figura 31. Comprimido de biomasa obtenido a partir de cascarilla de arroz.