

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE  
APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE PODA  
DEL CAMPUS DE LA 170 PARA LA PRODUCCIÓN DE  
BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS**

**Nicole Andrea Gomez Rodríguez  
Código: 41170**

**UNIVERSIDAD ECCI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTÁ, D.C.  
2021**

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO  
DE LOS RESIDUOS DE PODA DEL CAMPUS DE LA 170  
PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES  
SÓLIDOS**

**Nicole Andrea Gomez Rodríguez  
Código: 41170**

**Trabajo dirigido por: MSc. Ing. Laura Carolina Hernández Solórzano**

**UNIVERSIDAD ECCI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTÁ, D.C.  
2021**

## Contenido

<b>EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE PODA DEL CAMPUS DE LA 170 PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS</b> .....	1
<i>Dedicatoria</i> .....	5
<i>Agradecimientos</i> .....	6
<b>Resumen</b> .....	7
<i>Índice de figuras</i> .....	9
<i>Índice de tablas</i> .....	10
Introducción .....	11
Formulación del problema .....	14
Objetivo de investigación .....	14
• Objetivo principal .....	14
• Objetivos Específicos .....	14
Justificación y delimitación de la investigación .....	15
Marco de referencia de la investigación .....	17
a. Marco teórico .....	17
b. Marco Conceptual .....	19
c. Marco Legal .....	21
d. Marco Histórico .....	22
<b>CAPITULO I Caracterizar los residuos biomásicos recogidos en el campus como potencial materia prima para la producción de biocombustible sólidos.</b> .....	25
1.1. Metodología .....	27
1.1.1. Identificación de los puntos de recolección de la biomasa .....	27
1.1.2. Pruebas de caracterización de la biomasa .....	29
1.1.2.1. Molienda: .....	29
1.1.2.2. Densidad .....	29
1.1.2.3. Humedad: .....	30
1.1.2.4. Cenizas .....	32
1.1.2.5. Material Volátil .....	32
1.1.2.7. Granulometría .....	33
1.1.2.8. Capacidad de compresión .....	35
1.2. Resultados: .....	37
1.3. Análisis de resultados .....	41

<b>2. CAPITULO II Producción de los biocombustibles densificado a partir del residuo biomásico seleccionado</b> .....	42
2.1. Producción de biocombustibles.....	43
2.1.1. Parámetros de producción.....	43
2.1.2. Construcción de un prototipo de maquina densificadora.....	43
2.1.3. Elección de las condiciones de operación.....	45
2.2. Metodología.....	47
2.2.1. Diseño y fabricación sistema de densificación manual.....	47
2.2.2. Selección condiciones iniciales.....	53
2.2.2.1. Selección condiciones de aglutinante.....	55
2.2.2.2. Modificación de temperatura.....	56
2.2.3. Proceso de densificado.....	57
2.3. Resultados.....	59
2.4. Análisis de resultados.....	62
<b>3. Capitulo III Caracterizar el biocombustible producido y evaluar su calidad a partir de normativa vigente</b> .....	63
3.1 Metodología.....	63
3.1.1 Densidad.....	63
3.1.1 Relación de compresión.....	64
3.1.2 Humedad.....	64
3.1.3 Ceniza.....	65
3.1.4 Combustión.....	66
3.1.5 Resistencia al impacto (%Durabilidad).....	67
3.2 Resultados.....	68
3.3 Análisis de resultados.....	71
4. Conclusiones.....	72
5. Recomendaciones.....	73
1.4 Bibliografía.....	75

## *Dedicatoria*

### **A mis padres**

Fernando Gómez y Xiomara Rodríguez, por todo su apoyo incondicional, por siempre darme fuerzas y estar ahí para mí, por brindarme la mejor educación.

### **A mis hermanos**

Natalia Gómez y Diego Gómez, por escucharme cada vez que los necesitaba, apoyarme y darme fuerza en cada momento.

### **A mi pareja**

Camilo López por darme fuerza en los momentos en donde más lo necesitaba, escucharme, apoyarme y darme fortaleza, gracias por ser tan incondicional durante toda mi carrera, gracias por todo.

### **A mi tío**

Alexander Rodríguez Melo por escucharme y asesorarme cuando me encontraba perdida, por impulsarme a esforzarme y demostrarme que el apoyo lo puedes tener de quien menos lo esperas. Gracias

### **A mi abuela**

María Gómez, por ser una luz más en el camino, por siempre pensar en mí y preocuparse en cada detalle, gracias por ser un ejemplo de cariño y amor.

## *Agradecimientos*

Un agradecimiento especial al departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad ECCI por la disponibilidad de laboratorios y el aporte de recursos que permitieron completar este proceso. De igual manera quiero agradecer a cada uno de los docentes que participaron en mi formación académica como profesional.

Agradezco de manera profunda y sincera a la MSc. Ing. Laura Carolina Hernández Solórzano, por apoyarme y guiarme en todo el proceso de investigación. Su guía y esfuerzo en este trabajo me permitió llegar a donde estoy ahora. Gracias por demostrarme que la docencia es una labor muy importante y que la disposición de un profesor puede motivarnos a cumplir nuestros objetivos, sin importar cuan difíciles puedan llegarse a sentir.

A mi tío Alexander por la constante disposición durante mi proceso de investigación, por todo su apoyo brindado aun cuando no tenía mucha disponibilidad de tiempo. Gracias a su aporte de recursos que me permitió seguir adelante en este proyecto y poder confiar en mi capacidad como profesional de ingeniería ambiental.

Finalmente quiero agradecer a mi familia y a mi pareja, por siempre apoyarme a continuar con mi proceso educativo, por motivarme a seguir adelante sin importar las difíciles condiciones que tuvimos que soportar en este proceso de pandemia. Me enseñaron a luchar por mis logros y a darme cuenta de que todo es posible siempre que estés dispuesto a luchar por cumplirlo. Gracias infinitas.

# Resumen

El presente trabajo busca evaluar el potencial del material residual obtenido proceso de poda del campus de la Universidad ECCI para la producción de biocombustibles sólidos.

Se propuso la producción de biocombustibles sólidos debido a las características de los residuos generados en el campus, siendo principalmente residuos de tipo lignocelulósico de baja descomposición biológica.

El campus de la Universidad en su sede de la 170 cuenta con una planta de compostaje a la que llegan diferentes residuos propios del mantenimiento del campus, siendo principalmente residuos de podas y talas. Debido a su naturaleza este tipo de residuos se degradan lentamente, lo que genera un cuello de botella en las actividades mismas de la planta de compostaje, razón por la cual se propuso un segundo método de aprovechamiento que permitiera procesar y emplear más fácilmente los residuos.

El proyecto inició con la caracterización de tres puntos de muestreo para biomásas, esto con el objetivo de establecer en qué etapa podría tomarse el material y que permitiera ofrecer mejores propiedades para la producción de combustible, para esta caracterización se analizaron propiedades como humedad, ceniza, densidad y material volátil que son propiedades que se asocian a los procesos de combustión.

Debido a las condiciones de contingencia actuales presentadas por la pandemia, no fue posible contar con un equipo comercial de prensado, de modo que se optó por un equipo de prensado manual.

El material elegido en la primera etapa fue clasificado y sometido a pruebas de prensado de acuerdo a las condiciones identificadas en la literatura.

El material seleccionado (que para efectos de este trabajo recibió el nombre de muestra tres) fue sometido a un proceso de densificado, modificando tres propiedades importantes del proceso, temperatura, presión y uso de aglomerantes. En este caso, la temperatura elegida varió entre tres puntos: T. ambiente, 40°C y 80°C; la cantidad de aglutinante varió también entre tres puntos, sin aglomerante, 2% y 8%. Y la presión se estableció en dos rangos solamente, presión baja (1 Mpa) y presión alta (2,5 Mpa).

Los biocombustibles producidos fueron caracterizados a partir de los parámetros: contenido de ceniza, humedad y resistencia a la caída. Así mismo se realizó un análisis cualitativo de combustión. A partir de este estudio, fue posible identificar un grupo de combustibles que presentaron mejores características y potencial para ser empleados en la generación de energía.

*Palabras clave: Biocombustibles, densificado, materia prima.*





## Índice de figuras

Figura 1 Consumo mundial de energía. 2019. (REN21, 2020).....	11
Figura 2 Clasificación de la biomasa. Tomado de: (SENER, 2017).....	15
Figura 3 Producción de biocombustibles solidos a nivel mundial (Millones de toneladas)	22
Figura 4 Rutas de transformación de biomasa. Tomado de: (Kusch-Brandt, 2019) .....	26
Figura 5 Biomasa lignocelulósica (Chávez-Sifontes, 2019).....	27
Figura 6 Primer punto de recolección de biomasa (Muestra 1) .....	28
Figura 7 Segundo punto de recolección de biomasa (Muestra 2) .....	28
Figura 8 Tercer punto de recolección de biomasa (Muestra 3) .....	28
Figura 9 Molino marca corona .....	29
Figura 10 Gramera .....	30
Figura 11 Balanza analítica.....	31
Figura 12 Proceso de tamizaje .....	35
Figura 13 Prensa hidráulica manual.....	44
Figura 14 Maquina Briquetadora manual .....	44
Figura 15 Boceto sistema de palanca .....	45
Figura 16 Primer prototipo de densificación .....	48
Figura 17 Segundo prototipo.....	50
Figura 18 Prototipo 2 AUTOCAD .....	50
Figura 19 Báscula digital de mano .....	51
Figura 20 Prototipo 3 .....	52
Figura 21 Prototipo 3 AUTOCAD .....	53
Figura 22 Diseño de experimentos central.....	55
Figura 23 Diseño central compuesto.....	55
Figura 24 Control de temperatura de las muestras .....	57
Figura 25 Diseño de pruebas.....	58
Figura 26 Sin aglutinante y temperatura ambiente.....	59
Figura 27 2% Aglutinante y temperatura ambiente .....	59
Figura 28 8% Aglutinante y temperatura ambiente .....	59
Figura 29 8% Aglutinante y temperatura ambiente .....	60
Figura 30 8% aglutinante 40°C .....	60
Figura 31 80°C y 8% aglutinante .....	60
Figura 32 Sin aglutinante y temperatura ambiente.....	60
Figura 33 40°C y 2% aglutinante .....	60
Figura 34 8% aglutinante y 80°C .....	60
Figura 35 Balanza de humedad.....	64
Figura 36 Mufla.....	65
Figura 37 Desecador con muestras .....	66
Figura 38 Combustión densificados .....	67
Figura 39 Experimento primera caída .....	70
Figura 40 Experimento segunda caída .....	70
Figura 41 Caída 3, Experimento tercera caída.....	70

## *Índice de tablas*

Tabla 1 Normatividad aplicable a biocombustibles sólidos.....	21
Tabla 2 Referencias granulometría .....	34
Tabla 3 tamaño de abertura tamices.....	35
Tabla 4 Porcentaje de obtención del tamizaje.....	35
Tabla 5 Requerimientos de calidad de las briquetas .....	43
Tabla 6 Calculo de la presión interna del molde.....	51
Tabla 7 Condiciones de operación.....	54
Tabla 8 Cálculo de aglomerante .....	56

# Introducción

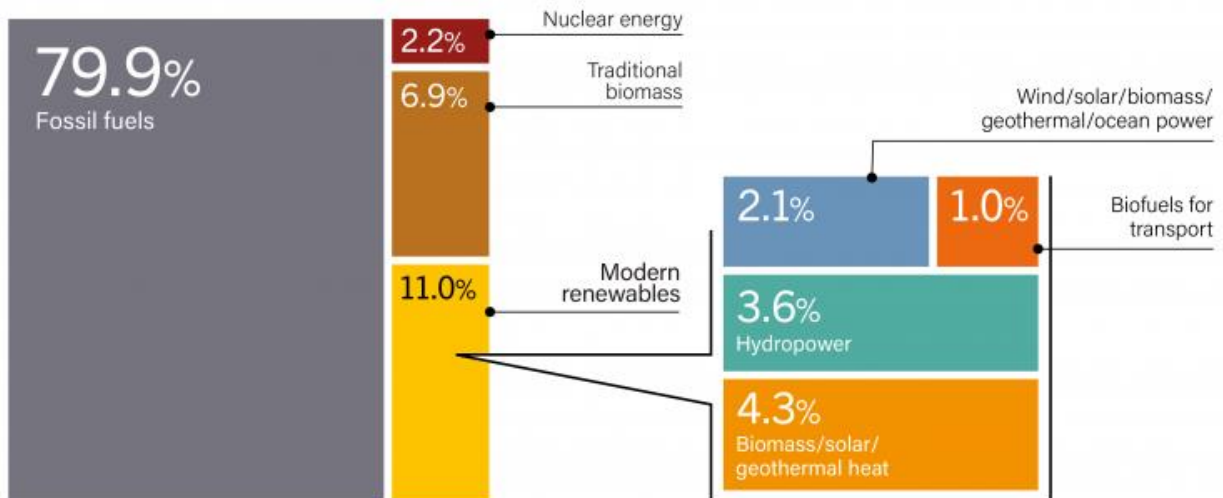
El uso de combustibles permite al ser humano suplir sus necesidades básicas, la demanda de este recurso se ha visto satisfecha a lo largo de los años, principalmente mediante el uso de combustibles fósiles. Con el paso del tiempo se han implementado tecnologías que permiten suplir la alta demanda energética, al utilizar fuentes de energía que generan menor impacto ambiental y que son de carácter renovable como la energía solar, geotérmica y mareomotriz.(Schallenberg et al., 2008)

En la actualidad, la utilización de combustibles fósiles se ha dificultado dado que estos no constituyen un recurso renovable por lo cual se ha hecho necesario apropiarse y desarrollar tecnologías que permitan producir energía mediante la transformación de las fuentes de energía renovable, biomasa, energía eólica, energía hidráulica, etc. sirviendo como reemplazo de los combustibles fósiles.

La utilización de energías renovables ha cobrado mayor importancia con el pasar de los años a través de tratados y convenios mundiales que promueven su desarrollo e implementación contribuyendo al consumo final de energía global. (Figura 1)

Para 2019 las energías renovables representaron un poco menos de un tercio de la energía utilizada a nivel mundial como se cita en el informe de estado global (Kusch-Brandt, 2019) acerca del propio uso de biocombustibles el estudio realizado por Kusch-Brandt, (2019) encontró que “en el 2017, la bioenergía moderna proporcionó aproximadamente el 5% del consumo final de energía global, casi la mitad de la contribución total de las energías renovables.” (p. 22)

Figura 1 Consumo mundial de energía. 2019. (REN21, 2020)



Debido a su versatilidad, el uso de biomasa para la producción energética ha cobrado mayor importancia con el pasar de los años, constituyendo en la actualidad cerca del 50% de la

energía renovable aprovechada en el mundo, principalmente ligada al área de transporte en la producción de biocombustibles. (REN21, 2020).

La participación de la bioenergía en el suministro total de energía primaria (TPES) se estimó cercano al 10%, en 1990. Entre los años 1990 y 2010 el suministro de bioenergía aumentó desde 907 hasta 1240 Millones de toneladas equivalentes de petróleo, como efecto de la creciente demanda de energía dando como resultado un incremento del 36,7% del suministro de bioenergía a nivel mundial. (World Energy Resources council conseil, 2013).

El medio más común para el aprovechamiento energético de la biomasa se desarrolla mediante combustión directa, para calefacción domestica e industrial. (World Energy Resources council conseil, 2013) La biomasa que es empleada de manera directa sin algún tipo de alteración es considerada biomasa tradicional (refiriéndose principalmente a la leña, el carbón vegetal y los residuos agrícolas), sin embargo, esta no es la manera más eficiente para emplear este recurso renovable, debido a factores como la humedad, densidad energética, forma irregular, generación de subproductos, entre otros. La producción de biocombustibles permite aprovechar de una manera mucho más eficiente las propiedades de la biomasa, razón por la cual el uso de biomasa tradicional se ha visto en declive a lo largo de los años, pasando de ser el 8,8% en el año 2006 a un 7,6% para el año 2017 y 6,9 en 2019- (Kusch-Brandt, 2019).

Para la producción de biocombustibles existen diferentes rutas de transformación que se adaptan a las variadas características de la biomasa empleada como materia prima. Entre estas existen rutas físicas (transformación mecánica), termoquímicas (la pirolisis, gasificación, termólisis y la combustión), químicas (esterificación, transesterificación) y biológicas (fermentación alcohólica o la metánica), dependiendo de la ruta elegida se obtendrá un biocombustible con características específicas.(Schallenberg et al., 2008).

Las transformaciones mecánicas permiten obtener biocombustibles sólidos, que pueden ser fácilmente aprovechables, dado que su utilización se lleva a cabo mediante combustión directa. Este tipo de biocombustibles evitan las desventajas que tiene la biomasa tradicional, son homogéneos, tienen baja humedad y alta densidad energética, que se logra mediante el prensado de material principalmente lignocelulósico. Su forma habitual es cilíndrica y según su capacidad calorífica puede utilizarse como fuente de energía.(Beltron et al., 2019).

Una de las grandes ventajas de los biocombustibles sólidos radica en permiten el uso y aprovechamiento de biomasa residual, que es biomasa considerada como “desecho”, al resultar de una cadena productiva previa. Empleando esta materia prima es posible generar un combustible aprovechable y renovable otorgando un beneficio a la generación energética y disminuyendo la carga de residuos de lenta degradación que llegan a los rellenos sanitarios. (Ríos et al., 2017).

En la sede ubicada en la calle 170 de la ciudad de Bogotá, la Universidad ECCI cuenta con campus que genera regularmente residuos lignocelulósicos producto de las podas y talas de las especies vegetales del predio, debido a sus características estos residuos no pueden ser fácilmente degradados y aprovechados por vías biológicas. En la actualidad la universidad desarrolla un proceso de compostaje donde se han almacenado estos residuos, sin embargo, debido su rica proporción en lignina y celulosa su degradación es lenta haciendo que se acumule el residuo o se deseche sin darle un aprovechamiento adecuado.

Como alternativa para la explotación de dicho residuo se propone la evaluación de potencial para la producción de biocombustibles sólidos densificados, para ello se requiere hacer el análisis de potencial energético del residuo, de modo que permita estimar la capacidad de ser empleado como materia prima para la producción de los biocombustibles comprobando su funcionalidad y los estándares de calidad solicitados para su uso.

## Formulación del problema

¿Es viable la producción de biocombustible sólidos a partir de residuos biomásicos generados en la actividad de poda en el campus de la 170 de la universidad ECCI?

## Objetivo de investigación

A continuación, se presentan los objetivos del desarrollo del presente proyecto de investigación.

- Objetivo principal

Evaluar el potencial de los residuos biomásicos generados por la actividad de poda realizada en el campus de la 170 de la universidad ECCI empleado como materia prima para la producción de biocombustible sólidos.

- Objetivos Específicos

- Caracterizar los residuos biomásicos recogidos en el campus de la 170 como potencial materia prima para la producción de biocombustible sólidos densificados.
- Producir biocombustibles sólidos densificados a partir de residuos biomásicos
- Caracterizar los biocombustibles producidos y evaluar su calidad a partir de normativa vigente

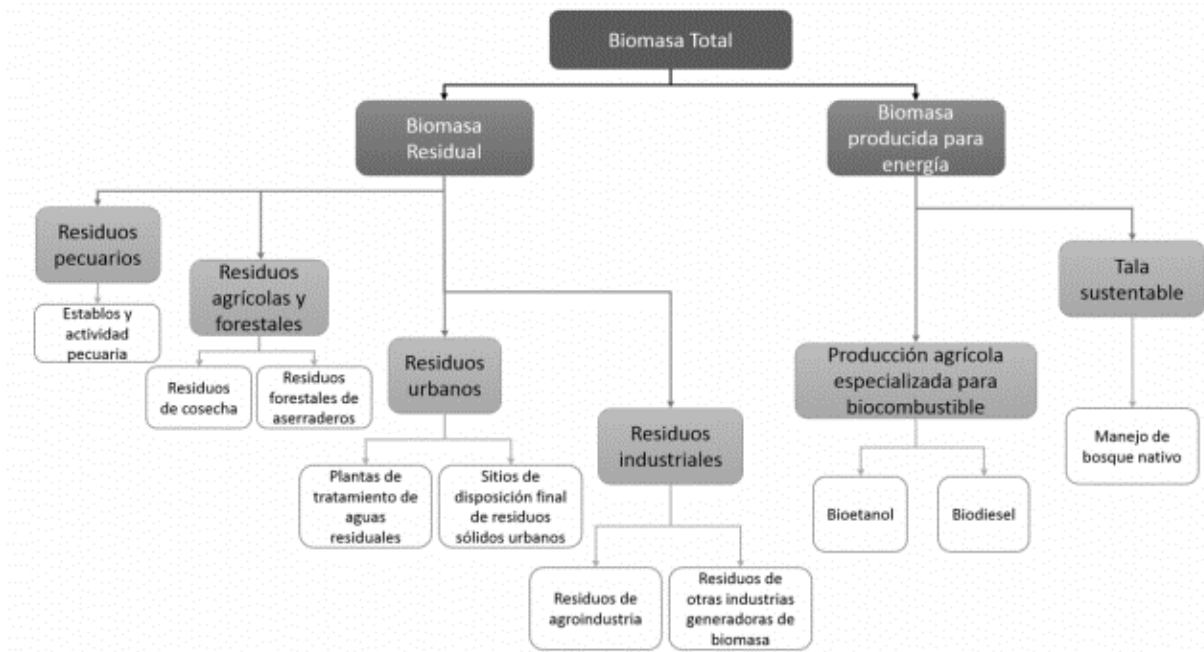
## Justificación y delimitación de la investigación

Una de las mayores problemáticas del ser humano es la obtención de combustibles para su transformación en calor, electricidad o movimiento (transporte), esto se ha logrado principalmente mediante la combustión de hidrocarburos de origen fósil (petróleo y sus derivados, carbón y gas natural). Debido a la alta demanda de este recurso y su naturaleza no renovable, el ser humano se ha forzado a innovar en la manera de generar energía y producir combustibles, que además generen bajo impacto ambiental y permitan mitigar los efectos negativos producto del uso de combustibles fósiles.

La biomasa es una materia prima altamente atractiva para la generación de energía, un ejemplo de esto se presentó en el reporte del Consejo Mundial de Energía para el año 2016, que indicó que la producción de biomasa a nivel global fue de 65 exajoules (EJ) aproximadamente, lo que equivale a 18 millones de gigawatts/hora; esto valer por el 14% del consumo de energía primaria para ese año (Kusch-Brandt, 2019).

La biomasa residual (Figura 2) se refiere a un recurso biomásico generado a partir de procesos productivos previos, por ejemplo, el bagazo producto de la producción de azúcar de caña, de modo que cualquier biomasa que sea subproducto de un proceso productivo o de alguna actividad agrícola podrá ser considerada como residual. Debido a sus características, su uso energético se encuentra asociado a procesos de transformación.

Figura 2 Clasificación de la biomasa. Tomado de: (SENER, 2017)



Al emplear biomasa residual para la producción de biocombustibles “se contribuye a disminuir las concentraciones de CO<sub>2</sub>, óxidos de azufre y nitrógeno causantes del “efecto invernadero” y el cambio climático” (Berastegui Barranco et al., 2017) siendo así más atractivo para el cuidado del medio ambiente al generar una reducción de emisiones CO<sub>2</sub> en comparación con la combustión de biomasa tradicional en un 50%, además posee bajas concentraciones de azufre y nitrógeno entre 0,004-0,007% y 0,05-0,16% (Berastegui Barranco et al., 2017).

Con la producción de biocombustibles sólidos es posible dar un aprovechamiento a la biomasa residual generada al interior del campus de la 170 de la Universidad ECCI, generando un producto energético de alto interés comercial, de bajo impacto ambiental que puede ser empleado para la generación de calor.

El presente proyecto busca la evaluación del potencial asociado a la biomasa residual generada en el campus de la universidad ECCI para ser empleada como materia prima en la producción de biocombustibles sólidos.



## Marco de referencia de la investigación

### a. Marco teórico

Actualmente, los hidrocarburos constituyen la principal fuente de energía a nivel mundial, su gradual reemplazo permite evidenciar como en los diferentes países se han buscado alternativas energéticas, por ejemplo, el uso de biocombustibles.

Los primeros biocombustibles generados, fueron de carácter convencional siguiendo rutas sencillas de transformación, principalmente fermentación de azúcares, este tipo de biocombustibles tuvo como principal materia prima la proveniente de cultivos alimenticios (maíz y caña de azúcar). La apropiación de cultivos para la generación energética constituyó entonces una amenaza para el suministro alimenticio de gran parte de la población, por lo cual fue necesario establecer estrategias de aprovechamiento que no implicaran este tipo de conflictos. (Cortés-Sánchez et al., 2019).

La principal estrategia desarrollada, permitió la producción de biocombustibles de segunda generación, producidos principalmente a partir de biomasa lignocelulósica generada a partir de procesos industriales, esta biomasa involucró residuos forestales, agrícolas y desechos urbanos. El aprovechamiento de este tipo de biomasa, incluyó entonces el desarrollo de nuevas tecnologías para su procesamiento y rutas de transformación. (Cortés-Sánchez et al., 2019).

La biomasa residual como materia prima para la producción de biocombustibles, fue considerada como un recurso viable energética y económicamente porque genera ganancia por la venta del biocombustible obtenido, además que disminuye la generación y disposición de residuos a rellenos sanitarios, presenta servicios ambientales como fijación de carbono durante el crecimiento de la planta y reduce la dependencia energía de combustibles fósiles (gas y petróleo) (Hector et al., 2019).

En el caso de los biocombustibles sólidos como dice (Ríos et al., 2017) se tratan de materias orgánicas que son obtenidos mediante procesos mecánicos como lo es la compactación, astillado y trituración, su uso es principalmente la obtención de energía térmica y eléctrica, permitiendo así atender la alta tasa de demanda del consumo energético, aprovechando principalmente biomasa residual de procesos forestales o/y agrícolas. Su presentación puede darse como leñas, astillas, briquetas, pellets y aserrín dependiendo la técnica de obtención que se esté utilizando.

El consumo de biocombustibles sólidos permite alcanzar una combustión completa, este proceso disminuye la generación de sílice aluminio, hierro y calcio que son componentes principales de la ceniza, debido a que la generación por combustión de los biocombustibles puede llegar a generar desde un 2% de ceniza comparada con la ceniza generada durante la combustión de la leña que puede llegar a ser de un 10% o más, también hay que tener en cuenta que la humedad de la leña puede alcanzar un valor cercano al 40% del peso del

combustible mientras que la humedad que pueden llegar a poseer un biocombustible sólido puede ser de un 8%, esta característica mejora la combustión haciendo que sea más lenta permitiendo una mayor duración. (Rincón & González, 2014).

Un ejemplo de esto es la investigación para la obtención de pellets a base de Eucalipto y residuos de café (Hector et al., 2019) que evalúa el potencial de los biocombustibles y busca cumplir los estándares alemanes para la comercialización, en este trabajo se analizaron las características fisicoquímicas de la biomasa y se realizó una comparación de diferentes proporciones de materiales para observar como el resultado final podría variar en los parámetros de energía y así poder definir el de mejor calidad, demostrando como los residuos de café pueden ser utilizados para mejorar las características de los pellets y disminuir la proporción de uso de Eucalipto.

Asimismo, el estudio de material biomásicos lignocelulósicos como lo es la cáscara de maní y el tallo de maíz (Beltron et al., 2019) que según los resultados obtenidos demuestra que la combinación de material lignocelulósico mejoró las condiciones de combustión de los biocombustibles y que una combinación 25:75 permitió mejorar las propiedades caloríficas y disminuir la generación de ceniza, demostrando su uso eficiente para el uso de calderas y sistemas de calefacción, demostrando como la biomasa con contenido lignocelulósico permite un buen resultado como biocombustible ya que las propiedades caloríficas aumentan al realizar una densificación de estos residuos.

## b. Marco Conceptual

- **Biomasa:** Cualquier material de origen biológico, excluyendo los combustibles fósiles o la turba, que contenga una reserva química de energía (originalmente recibida del sol) y que está disponible para la conversión de una lata gama de portadores de energía (Kusch-Brandt, 2019).
- **Biocombustibles:** En la actualidad se ha aceptado este término para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se origina a partir de la materia prima orgánica formada por vía biológica.

Existen cuatro tipos de biocombustibles siendo clasificados en las siguientes categorías (Ríos et al., 2017)

**-Primera generación:** Son aquellos provenientes de la biomasa directamente, principalmente de cultivos que son dirigidos a la alimentación humana.

**-Segunda generación:** Son producidos por medio de materias primas que no son fuentes alimenticias, o bien son desechos agroindustriales.

**-Tercera generación:** Estos proceden de la biomasa obtenida de especies no comestibles, tales como las microalgas.

**-Cuarta generación:** Se producen a partir de bacterias genéticamente modificadas; en este caso se emplea CO<sub>2</sub> o alguna otra fuente de carbono para la obtención del producto.

- **Biocombustibles sólidos:** Son carburantes compuestos por materia orgánica, de origen vegetal o animal, susceptibles de utilizarse en aplicaciones energéticas; éstos son obtenidos mediante procesos físicos, tales como compactación, astillado o trituración.(Ríos et al., 2017).
- **Celulosa:** Componente de las fibras de madera, es un polímero lineal de  $\beta$ -D-Glucosa con un peso molecular mayoritario de las paredes celulares de aproximadamente 500.000. Las moléculas individuales de glucosa están unidas por enlaces  $\beta$ -(1,4). (Garzón, 2018).
- **Hemicelulosa:** Está constituida por polímeros de unidades de anhidro azúcares unidas por enlaces glucosídicos, formadas por más de un tipo de azúcar (hexosas o pentosas), y además presentan ramificaciones y sustituciones. Su papel es suministrar la unión entre la lignina y la celulosa (Garzón, 2018).
- **Lignina:** Es la tercera fracción mayoritaria de la biomasa lignocelulósica. Se trata de un polímero tridimensional amorfo formado por la polimerización deshidrogenativa de unidades de fenilpropano ligadas por diferentes tipos de enlaces que se alternan de manera desordenada (Garzón, 2018).

- **Energía de biomasa:** Energía derivada de la combustión de combustibles de biomasa sólidos, líquidos y gaseosos en sistemas de conversión de alta eficiencia, que van desde pequeños electrodomésticos hasta plantas de conversión industrial a gran escala. Las aplicaciones modernas incluyen generación de calor y electricidad, calor y electricidad combinados. (Callejas & Quezada, 2009).
- **Poder calorífico:** Es la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una unidad de combustible y los productos de la combustión se enfrían a la temperatura ambiente (Guzmán & Pastrana, 2016).
- **Pellets de Biomasa:** Combustible de biomasa sólida producido al comprimir biomasa seca pulverizada, como residuos de madera y residuos agrícolas. Los pellets son típicamente de forma cilíndrica con un diámetro de alrededor de 10 milímetros y una longitud de 30-50 milímetros. Los pellets son fáciles de manejar, almacenar y transportar, y se utilizan como combustible para aplicaciones de calefacción y cocina, así como para la generación de electricidad y CHP. (Hernandez, 2011).

c. Marco Legal

A continuación, en la Tabla 1 se nombrarán la normatividad aplicable para esta investigación la cual ha presentado cambios y se ha ajustado a las nuevas condiciones globales, adoptando un comportamiento dinámico que permita al país adaptarse a las nueva condiciones internas y externas que puedan permitir un mejor desarrollo al país.

*Tabla 1 Normatividad aplicable a biocombustibles sólidos*

<b>TIPO</b>	<b>NÚMERO</b>	<b>AÑO</b>	<b>CONTENIDO</b>
<b>Ley</b>	<b>1715</b>	<b>2014</b>	Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético Nacional. Promueve el desarrollo de la utilización de las fuentes no convencionales de energía principalmente, aquella de carácter renovable
<b>Ley</b>	<b>697</b>	<b>2001</b>	Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones
<b>Conpes</b>	<b>3510</b>	<b>2008</b>	Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia.
<b>Resolución</b>	<b>180919</b>	<b>2010</b>	Por la cual se adopta el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, PROURE, se definen sus objetivos, subprogramas y se adoptan otras disposiciones al respecto.

#### d. Marco Histórico

El uso de biocombustibles inició en el siglo XIX al emplear aceites vegetales como posible combustible de motores de combustión interna, esto sucedió con el Dr. Rudolf Diesel en el año 1895 cuando desarrolló el primer motor diésel, cuyo prototipo estaba siendo desarrollado con aceites vegetales de maní. (Callejas & Quezada, 2009).

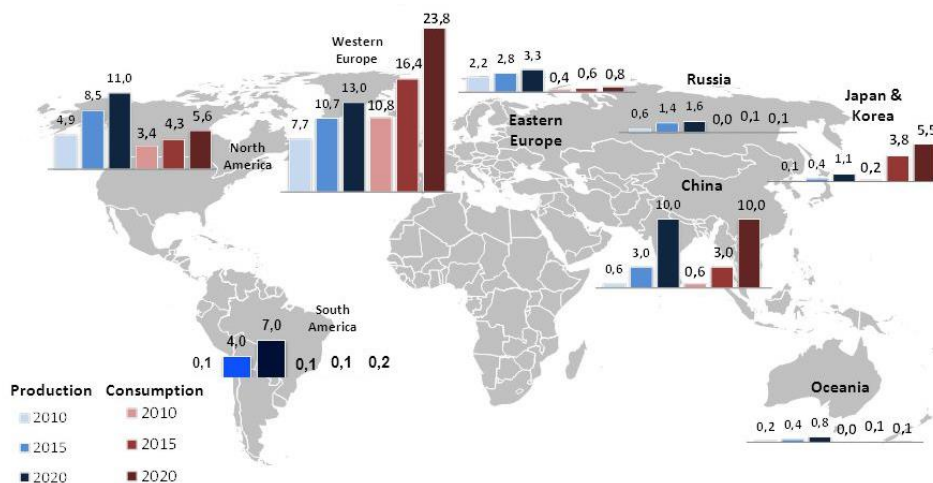
Durante el año 1908, Henry Ford hizo su primer diseño de automóvil que pudiera utilizar el etanol como combustible, dicho alcohol puede obtenerse de manera biológica por fermentación de azúcares.(Callejas & Quezada, 2009).

Durante los principios de los años veinte la empresa Standard Oil empezó a emplear el 25% de etanol a base de maíz en gasolina, pero debido a los altos costos del maíz, el almacenamiento y el transporte hicieron que se abandonara el proyecto debido a los bajos costos que manejaba la gasolina en ese tiempo y su facilidad de disponibilidad. Hasta 1938 se utilizó biocombustible en el transporte público en la línea de ómnibus Bruselas-Lovaina en el curso de la Segunda Guerra Mundial por parte de los alemanes para poder transportar sus tropas.(Callejas & Quezada, 2009).

Los biocombustibles sólidos se emplean en el sector doméstico e industrial para la generación de calor y producción de energía eléctrica como sustitución de combustibles fósiles en cocinas, hornos, chimeneas o calderas.

Estados Unidos fue el mayor productor y exportador de pellets de madera en 2018 y tenía la capacidad de producir 10,6 millones de toneladas (11,9 millones de toneladas cortas) anualmente en 83 plantas operativas al final del año. La producción real de EE. UU en 2018 fue de 7,3 millones de toneladas (8,2 millones de toneladas cortas) (Kusch-Brandt, 2019)(Figura 3).

Figura 3 Producción de biocombustibles sólidos a nivel mundial (Millones de toneladas)



Fuente 1(Rodrigues, 2012)

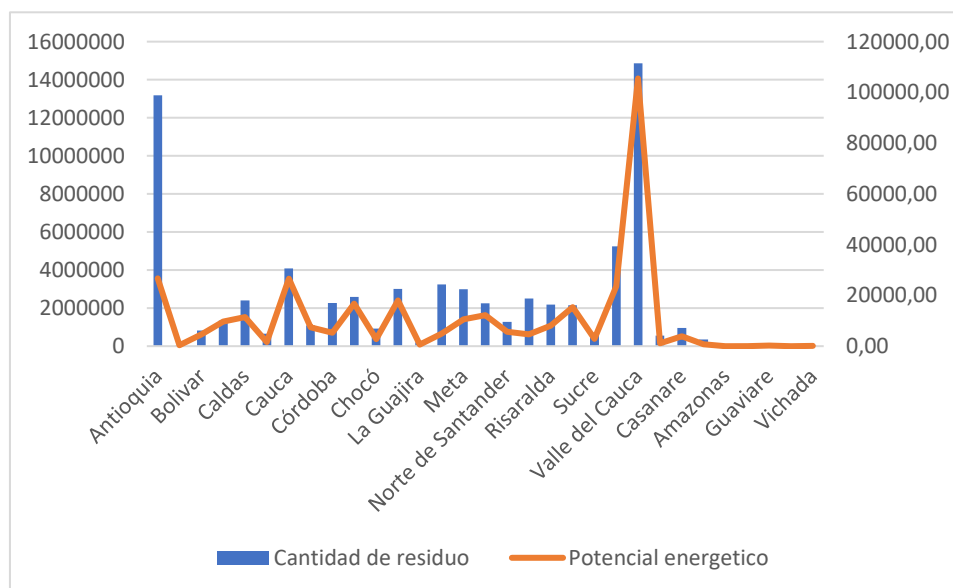
Latinoamérica por su posicionamiento sobre la línea ecuatorial, biodiversidad de especies y capacidad de uso de tierra con objetivos agrícolas permite un amplio beneficio en la obtención de materia prima para la generación de biocombustibles, a pesar de esto, solo hasta ahora se están abriendo mercados para biocombustibles sólidos. (Sánchez, 2015).

En 2018, se puso en marcha una nueva planta de biomasa en Oaxaca México propiedad del Grupo Piasa que se alimenta con residuos de caña de azúcar, suministrando 50 MW de electricidad y vapor a un ingenio azucarero y a plantas embotelladoras cercanas, con el excedente de energía entregado a la red.

Para el año 2016, en Argentina se puso en marcha el Programa energético RenovAr que buscaba aumentar la generación de electricidad renovable, en este caso el principal productor de maní ProdeMan inició la operación comercial de su instalación de bioenergía de 10 MW, que emplea cerca de 50000 toneladas/ anuales de residuos de cáscara de maní para generar energía. (Durango & Oquendo, 2016).

En cuanto a los biocombustibles sólidos en Colombia, se ha observado a lo largo de los años que por su gran capacidad agrícola hay una alta generación de residuos que no son aprovechables como se observa en la tabla.

Tabla 2 Potencial energético departamental de la biomasa residual del sector agrícola



Fuente 2 Ministerio de Agricultura (2006) Anuario Estadístico

Un ejemplo más es la tesis de (Barranco et al., 2017) el departamento del córdoba en el 2011 se contaba con un aproximado de 45.000 toneladas de residuo de maíz al año los cuales no se aprovechaban. Esto se debe a que en este departamento se contaba con un total de 103.007 hectáreas de tierra dedicadas al cultivo, de las que 43.979 hectáreas son utilizadas para la siembra de maíz con una producción anual aproximada de 154.273 toneladas de maíz, cubriendo un 14% del total de la producción nacional (DANE, 2011).

Estos cultivos generan residuos y son principalmente incinerados a cielo abierto como opción de disposición final generando contaminación al ambiente y que además no genera valor agregado para el campesino, es por eso que actualmente se empiezan a realizar estudios sobre el aprovechamiento de estos por medio de prensado de material como lo demostró el estudio de elaboración de biocombustible sólido a base de tusa de maíz, aglomerante de yuca y carbón mineral (Berastegui Barranco et al., 2017) comprobando que es posible aprovechar los residuos que genera la agricultura, aún más si estos poseen propiedades beneficiosos en materia de energía calorífica permitiendo sustituir la tala de árboles y el uso de hidrocarburos, demostrando así que Colombia posee una gran capacidad para investigar acerca de la obtención de biocombustibles sólidos a partir de biomasa que en la actualidad se consideran residuos.



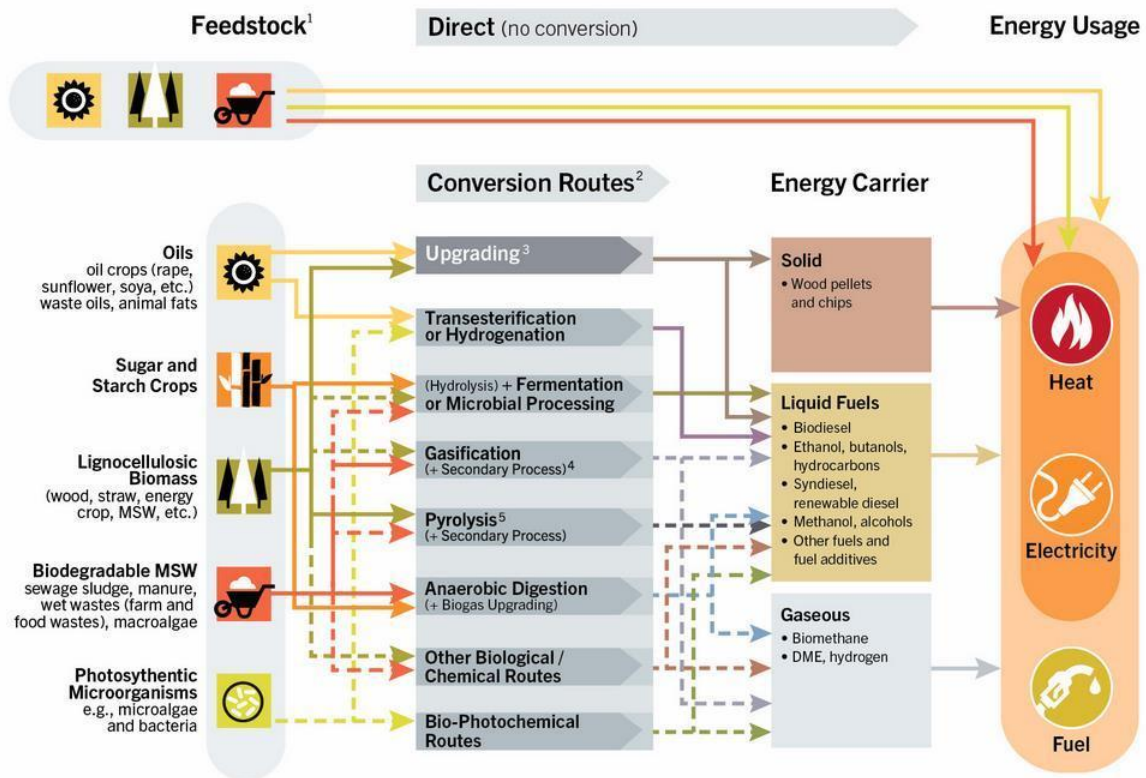
## CAPITULO I Caracterizar los residuos biomásicos recogidos en el campus como potencial materia prima para la producción de biocombustible sólidos.

La biomasa es cualquier material de origen orgánico no fósil que puede ser fuente energética. Esta puede clasificarse en: biomasa primaria, que es la materia orgánica formada por procesos de fotosíntesis principalmente residuos agrícolas y forestales. Biomasa secundaria, que se obtiene de individuos heterótrofos que usan en su alimentación la biomasa primaria, la constituye los desechos o carnes de estos individuos. La biomasa terciaria se produce de los individuos principalmente carnívoros que consumen la biomasa secundaria es decir los herbívoros, también se obtiene de sus desechos o su carne. La biomasa residual por otra parte es aquella que extrae de procesos agrícolas y forestales de actividades de aprovechamiento del ser humano. Finalmente, cuando se realiza el proceso de cultivo con la única finalidad de obtención de biomaterial aprovechable se le conoce como cultivos energéticos. (Callejas & Quezada, 2009).

Es posible generar energía mediante la transformación de biomasa en la producción de biocombustibles, estos pueden ser sólidos, líquidos y gaseosos, su estado final de aprovechamiento depende de la ruta que se siga para emplear sus propiedades y su potencial de utilización, como se ve en la Figura 4.

Las propiedades de los biocombustibles producidos dependen de la materia prima que los compone, pueden llegar a ser leñosos, herbáceos, frutales, de biomasa acuática, combinaciones y mezclas, cada combinación depende principalmente de las propiedades de humedad, ceniza, poder calorífico y facilidad de acceso a la materia prima. La elección de la materia prima es función de la ruta de transformación y su utilización final (Ríos et al., 2017).

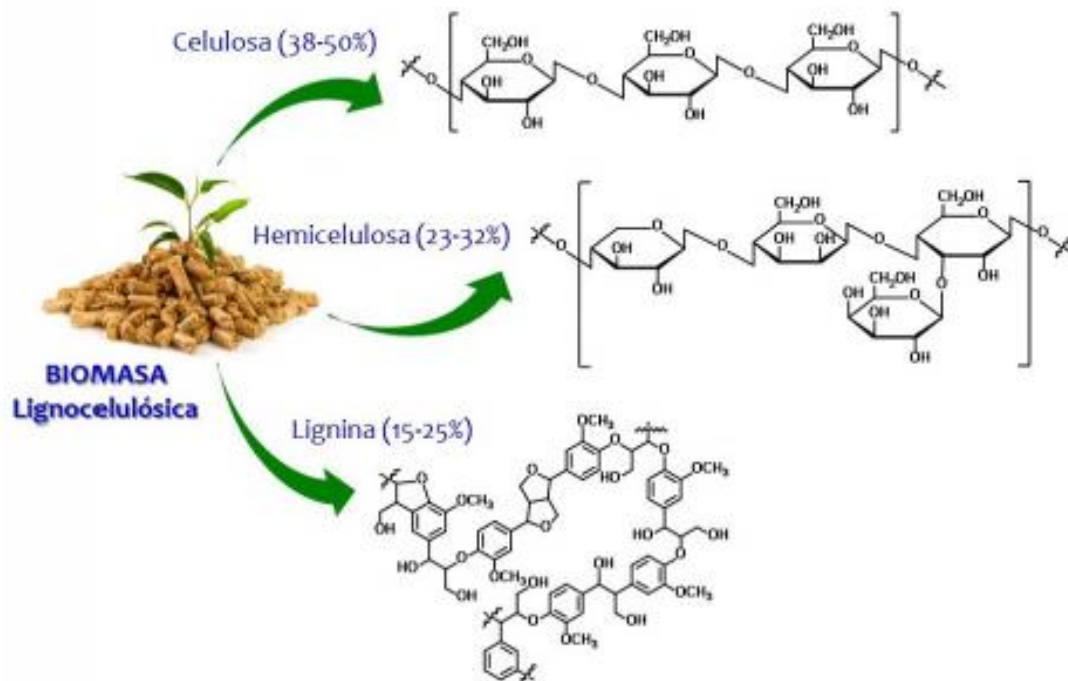
Figura 4 Rutas de transformación de biomasa. Tomado de: (Kusch-Brandt, 2019)



Los biocombustibles sólidos, liberan su energía durante el proceso de combustión, se producen principalmente mediante biomasa residual lignocelulósica a través de procesos de prensado (Sánchez, 2015). Por otra parte, los biocombustibles líquidos como el biodiesel, etanol, alcoholes o combustibles de aceites vegetales pueden obtenerse mediante rutas químicas y bioquímicas a través de la transesterificación, fermentación y pirolisis, la ruta de transformación para cada material dependerá principalmente de las características propias de la biomasa empleada. Finalmente, los biocombustibles gaseosos incluyen al biogás, que es una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano producido por la descomposición anaerobia de residuos biomásicos; otro biocombustible gaseoso es el gas de síntesis generado por el proceso de gasificación de biomásas y el gas de pirolisis que conforman una mezcla de gases combustibles principalmente de monóxido de carbono e hidrógeno. (Kusch-Brandt, 2019).

Para el desarrollo del primer capítulo de este proyecto se propone realizar la caracterización de los residuos biomásicos generados en el campus de la 170. Inicialmente se considera la naturaleza de los residuos recolectados, principalmente podas y residuos maderables, que pueden ser clasificados como biomasa lignocelulósica. Este tipo de biomasa está compuesta principalmente por polímeros de carbohidratos (celulosa, hemicelulosa) y la lignina, un polímero aromático. (Figura 5).

Figura 5 Biomasa lignocelulósica (Chávez-Sifontes, 2019)



Debido a su compleja estructura molecular, la biomasa lignocelulósica sufre una degradación lenta lo que hace difícil su aprovechamiento mediante vías biológicas de transformación, por lo cual se sugieren transformaciones químicas, termoquímicas o mecánicas. Siendo estas últimas rutas de transformación las más empleadas dada su facilidad, costos y versatilidad.

A continuación, se presenta la metodología empleada para caracterizar la biomasa recolectada en el campus de la 170.

## 1.1. Metodología

A continuación, se realiza una breve descripción de la metodología empleada para realizar la caracterización de la biomasa empleada como materia prima para la producción de biocombustibles densificados

### 1.1.1. Identificación de los puntos de recolección de la biomasa

Durante el recorrido en la zona de compostaje del campus se identificaron tres puntos potenciales de obtención de material, que poseían material aprovechable para la densificación. Cada uno de los cuales presentaba diferentes procesos físicos y químicos que podían afectar el proceso de densificado.

El primer punto de recolección correspondió al material podado en el campus, compuesto principalmente por pastos, hojas y ramas de los árboles, como se muestra en la Figura 6, este material no posee un ambiente controlado debido a que se ve directamente afectado por procesos climáticos: agua, lluvia, sol, vectores entre otros.

El segundo punto de recolección evaluado correspondía a una de las primeras etapas de compostaje como se muestra en la Figura 7, en este caso el material contaba con un ambiente controlado de temperatura y humedad y presentaba una descomposición por actividad microbiana y oxigenación manual de la pila de compostaje, estaba compuesto principalmente por material lignocelulósico, ramas y madera y tenía un aspecto cercano al aserrín.

Por último, el tercer punto de recolección considerado correspondía al material final que se obtiene después del proceso de compostaje como se muestra en la Figura 8, este material pasa previamente por un proceso de reducción de tamaño y secado para finalmente ser almacenado. Es necesario aclarar que en esta planta de compostaje el proceso de descomposición no se logra de forma completa, razón por la cual el material obtenido en esta última etapa es cercano al aserrín con bajo contenido de humedad.

*Figura 6 Primer punto de recolección de biomasa (Muestra 1)*



*Figura 7 Segundo punto de recolección de biomasa (Muestra 2)*



*Figura 8 Tercer punto de recolección de biomasa (Muestra 3)*



### 1.1.2. Pruebas de caracterización de la biomasa

A continuación, se presentan las pruebas realizadas a cada punto de recolección. Es necesario aclarar que cada muestra se realizó por triplicado:

#### 1.1.2.1. Molienda:

Se realizó el proceso de molienda de las muestras recolectadas mediante un molino tradicional manual marca Corona (Figura 9), con el objetivo de disminuir el tamaño de las partículas de biomasa.

De acuerdo a (Barranco et al., 2017), el tamaño de partícula debe ser reducido para obtener materia prima uniforme con mayor superficie de contacto durante el proceso de compactación que permita aumentar la densidad y durabilidad del producto final.

Durante esta etapa se recolectaron aproximadamente 1000 gramos biomasa de cada uno de las tres muestras seleccionados anteriormente. La muestra se dividió en dos, una parte fue molida de manera manual y almacenada mientras que la otra parte se mantuvo sin modificar.

*Figura 9 Molino marca corona*



#### 1.1.2.2. Densidad

Posteriormente se determinó la densidad de las muestras de biomasa empleando la metodología descrita en el método estándar para la densidad aparente de los combustibles de biomasa en partículas densificadas (ASTM, 2014). El objetivo de esta medición fue establecer las condiciones previas a la compresión del material para posteriormente calcular un índice de compactación.

De acuerdo con la metodología descrita por la (ASTM, 2014) para la determinación de densidad, se fabrica un cubo con medidas conocidas para establecer rápidamente el volumen, en este caso se utilizó un cubo con 5 cm de longitud de cada lado lo que conlleva a un volumen de 125 cm<sup>3</sup>. Adicionalmente, se midió la masa contenida en el cubo mediante una balanza gramera marca Traveler TA3001 con capacidad máxima de 3000 gramos y legibilidad de 0,1 gramos como se muestra en la Figura 10.

Figura 10 Gramera



La densidad se calcula mediante la Ecuación 1:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$\rho$  = Densidad

$m$  = Masa

$v$  = Volumen

1.1.2.3. Humedad:

Para la determinación de la humedad se realiza el procedimiento descrito en el estándar ASTM E871 – 82 (ASTM, 2013a). La humedad es un parámetro que, de acuerdo a (Guzmán & Pastrana, 2016), puede afectar el proceso de densificación y en la combustión de la biomasa. Según el trabajo de (Choquecota, 2014) un parámetro que puede afectar la materia prima para la densificación es el nivel de humedad ya que este afecta directamente

el poder calorífico de los biocombustibles fabricados, aún más cuando hay utilización de aglomerantes para su fabricación. En caso de que la materia prima no cuente con las condiciones de humedad definidas por la literatura, deberá ser sometida a procesos de secado antes de ser densificada.

La humedad actúa como agente de unión, pero también puede llegar a fracturar el material si se presente en grandes cantidades. De acuerdo con su trabajo, al estudiar diferentes materiales maderables se identificó que un rango óptimo de humedad para la materia prima que se encuentra entre 5-12% principalmente en materiales leñosos. (Barranco et al., 2017).

Para la determinación de esta propiedad se realizó un secado previo de los crisoles durante media hora a 103°C empleando una mufla de calentamiento, se colocó 50 g de la muestra en el recipiente, se pesó el recipiente con la muestra en una balanza analítica de la línea SYNERGY LAB (Figura 11) con capacidad máxima de 220 gramos y una legibilidad de 0,1 gramos y este peso se registró como peso seco.

Figura 11 Balanza analítica



Posteriormente se ingresó la muestra y el recipiente a la mufla durante 16 horas a 103 °C, al finalizar se dejó secar la muestra en un desecador durante 10 minutos e inmediatamente se tomó el peso, registrándose como “peso seco”. La densidad se calcula mediante la Ecuación 2:

$$CH = \left[ \frac{(Pi - Pf)}{(Pi - Pc)} \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

**CH** = **Contenido de Humedad (%)**

**Pc** = **Peso Contenedor (g)**

**Pi** = **Peso inicial y contenedor (g)**

**Pf** = **Peso secado en estufa y contenedor (g)**

#### 1.1.2.4 Cenizas

Para la determinación de cenizas se aplicó el método estándar ASTM E1534 – 93 (ASTM, 2013b). El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material seco.

Para biocombustibles densificados se observa una disminución de la generación de cenizas en comparación con la leña consumida de forma directa, encontrándose entre 8%-10% de generación de cenizas para los biocombustibles y un contenido de cenizas superior al 10% para la leña.(Rincón & González, 2014).

El contenido de cenizas puede afectar el proceso de combustión, de acuerdo con el trabajo de Vargas Lazo, 2018, las cenizas contienen material inorgánico que puede llegar a actuar como catalizador propiciando reacciones químicas de procesos termoquímicos y en este caso su acumulación retardaría el proceso de combustión del material si se presenta en grandes cantidades. (Vargas Lazo, 2018).

En la metodología empleada se utilizan 2 gramos de la muestra, previamente secada, molida y tamizada en una malla No. 40 (tamaño nominal 425- $\mu$ m) la cual se coloca en un crisol previamente tarado.

Para un correcto procedimiento fue necesario calentar la mufla a una temperatura de 600°C dejando el material por 30 minutos, después de pasado el crisol con la ceniza se llevó a un desecador por otros 30 minutos, con el objetivo de que su temperatura bajara lo suficiente para así tomar los datos del peso final de la muestra.

Las cenizas fueron calculadas mediante la Ecuación 3:

$$Ceniza = \left[ \frac{(Pz - Pc)}{(Pm - Pc)} \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

***Ceniza*** = Contenido de ceniza (%)

***Pc*** = Peso crisol (g)

***Pm*** = Peso muestra y crisol

***Pz*** = Peso muestra final y crisol

#### 1.1.2.5. Material Volátil



Este procedimiento se realizó siguiendo el método estándar ASTM E872 – 82 (ASTM, 2013c) ASTM E872 – 82 para determinar el porcentaje de material volátil.

De acuerdo con Rincón, 2014, el contenido de material volátil de un combustible puede afectar el rendimiento de los procesos de combustión. Es considerado un buen porcentaje de material volátil aquel que sea mayor al 50% ya que demuestra que los biocombustibles arden con facilidad. (Rincón & González, 2014).

El procedimiento inicia como en los métodos anteriores al registrar el peso de los crisoles que previamente tuvieron la humedad controlada, se pesó aproximadamente 1 g de muestra y se depositó en el crisol, registrándose el peso inicial,  $W_i$ .

El crisol con la muestra se coloca directamente en el horno, que se mantendrá a una temperatura media de 950 ° C durante siete minutos, pasado este tiempo se retiró el crisol del horno y, sin mover la tapa, se dejó enfriar en un desecador durante quince minutos. Tan pronto como se enfría el crisol se registra el peso final,  $W_f$ .

El valor del peso perdido se halla mediante la Ecuación 4:

$$\text{Perdida de peso } \% = 100 \times \left[ \frac{(W_i - W_f)}{(W_i - W_c)} \right] = A \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$W_c =$  *Peso del crisol*

$W_i =$  *Peso crisol y muestra (g)*

$W_f =$  *Peso Final (g)*

Así el porcentaje de material volátil se calcula sustituyendo el valor de pérdida de peso en la Ecuación 5:

$$\text{Material Volatil } \% = A - CH \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$A =$  *Perdida de peso %*

$CH =$  *Contenido de Humedad %*

#### 1.1.2.7. Granulometría

Para la determinación de granulometría se siguió el procedimiento descrito en el método estándar ASTM E 1288 – 89 (ASTM, 1994), como se indicó en la sección de molienda, es necesario realizar una reducción de tamaño y una selección específica del tamaño de la partícula a manejar.

Se realizó una revisión bibliográfica (ver Tabla 3) que permitió establecer el rango de tamaño de partícula empleado por otros autores para la fabricación de biocombustibles, encontrándose un rango de tamaño entre 0,5 y 7 mm. De acuerdo con los trabajos este rango es apropiado para la producción de biocombustibles densificados ya que mejoran las propiedades de cohesión y compactación del material.

Tabla 3 Referencias granulometría

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Fecha</b>	<b>Tamaño de partícula elegido</b>
Estudio de factibilidad para la fabricación de pellets a partir de material lignocelulósico proveniente de palma de aceite (Rincón & González, 2014)	-Rincón, Sahra Nathalie -González, Yuri Alexandra	2014	0,297 mm - 1,19 mm
Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tusa de maíz, bioaglomerante de yuca y carbón mineral del departamento de Córdoba (Berastegui Barranco et al., 2017)	-Barranco Cristian -Rodríguez Juan -Jorge Fandiño -Doria Yahir -Vazques Rafael	2017	< 3 mm
Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas (Fernández-Puratich et al., 2014)	-Fernández-Puratich, Harald -Oliver Vicente, Jose -Valiente, Mireya -Verdú, Salvador	2014	0,5 mm – 5 mm
Estudio de la producción de pellets a partir de borra de café (Vargas Lazo, 2018)	-Angelica María Vargas Lazo	2018	0,5-0,7 mm
Características y propiedades de pellets de biomasa torrefaccionada de Gmelina Arborea y Dipterix panamensis a diferentes tiempos (Gaitán-Álvarez & Moya, 2016)	-Gaitán Álvarez, Johanna -Moya, Roger	2016	1 - 3 mm
Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de la mezcla de dos biommas residuales, un aglomerante a base de yuca y carbón mineral propios del departamento de Cordoba. (Guzmán & Pastrana, 2016)	-Guzman Macea, J.H -Navaez Pastrana, M.	2016	< 3 mm

A partir de los resultados obtenidos de la tabla anterior se estableció un rango aceptable para el tamaño de partícula de la materia prima elegida entre 4 mm y 0,062 mm (Tabla 4), para ello se seleccionaron las mallas 5 mesh, 10 mesh, 35 mesh, 60 mesh, 120 mesh y 230 mesh, después de organizarlas de manera descendente se cargaron 250 g en el tamiz superior de 5 mesh. Al colocar el peso indicado de muestra se ubicó una tapa hermética sobre el tamiz superior y se posicionó en una tamizadora eléctrica marca Gylson (Figura 12).

Figura 12 Proceso de tamizaje



Tabla 4 tamaño de abertura tamices

Tamaño de malla	Tamaño nominal abertura
MESH 5	4 mm
MESH 10	2 mm
MESH 35	0,5 mm
MESH 60	0,25 mm
MESH 120	0,125 mm
MESH 230	0,062 mm

Los tamices se agitaron durante 2 min a 150 rotaciones / min, al pasar el tiempo se retiraron los tamices y se cepilló el fondo de cada tamiz para recuperar material. Luego se retiró la pila de tamices del agitador y se realizó el pesaje del material retenido en cada malla.

Para calcular el material retenido en cada malla a partir del peso del material sobre los tamices, y expresarse como porcentajes del peso se utilizó la Tabla 5 obtenida de la ASTM E 1288 – 89, la cual permitió un mayor orden de los datos obtenidos.

Tabla 5 Porcentaje de obtención del tamizaje

Retenido en el tamiz	Pasando el tamiz	Por ciento
2,36 mm (No. 8)	...	...
1,18 mm (número 16)	2,36 mm (No. 8)	...
600 µm (No. 30)	1,18 mm (número 16)	...
300 µm (No. 50)	600 µm (No. 30)	...
150 µm (No. 100)	300 µm (No. 50)	...
75 µm (No. 200)	150 µm (No. 100)	...
...	75 µm (No. 200)	...

Fuente 3 Standard Test Method for The Durability of Biomass Pellets ASTM E 1288 – 89

#### 1.1.2.8. Capacidad de compresión

La capacidad de compresión es una propiedad que se calcula en los combustibles densificados y se encuentra directamente relacionada con la potencia empleada por los

equipos de densificación. Se calcula como la relación entre la densidad del material densificado y la densidad del material sin densificar, como se presenta en la Ecuación 6.

***Relación de compresión***

$$= \frac{\textit{Densidad del producto densificado}}{\textit{Densidad de la materia prima}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Mientras mayor sea la relación de compresión del material, mayor energía será requerida para su procesamiento.

En este caso es evidente que para realizar este cálculo se requiere contar con un material previamente densificado, sin embargo, se decidió realizar una revisión bibliográfica previa para considerar las condiciones de densificación y las características del equipo de compresión.

De acuerdo con (Reggie, n.d.) los sistemas de densificación de pasturas requiere de parámetros muy específicos para funcionar correctamente, lo que hace necesario que la maquinaria requiera ajustes frecuentes, esto se debe a la falta de lignina y la necesidad de triturar el material finamente para mejorar las condiciones de densificación lo que dificulta el proceso de densificación del césped.

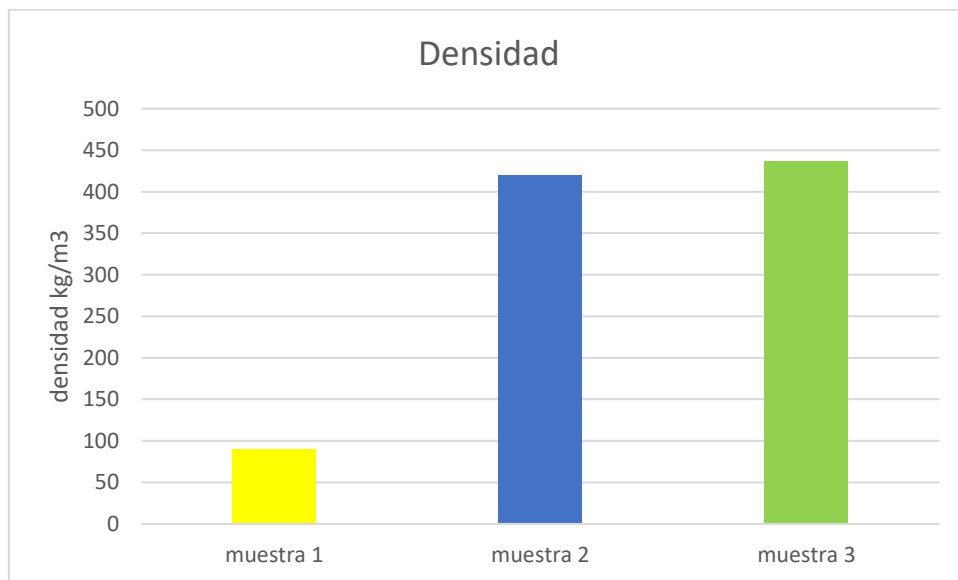
## 1.2. Resultados:

**Densidad:** En la Gráfica 1, se presentan los resultados de la densidad tomada de las muestras recolectadas.

La densidad de la muestra uno es considerablemente baja en comparación con las otras dos muestras, esto se debe a que su composición es principalmente pasto y la densidad de este material es considerablemente baja, en términos de producción de combustibles sólidos, es necesario procesar gran cantidad de material para que se obtengan biocombustibles sólidos, lo que implica a la vez un mayor consumo energético al momento de densificar el material.

En procesos comerciales el aprovechamiento de pastos para la generación energética o de piensos incluye el uso de pastos gigantes o tipo elefante que hacen mucho más rentable su producción. La muestra tres tiene una mayor densidad, lo que implicaría un consumo energético menor para la producción del biocombustible.

Gráfica 1 Datos de densidad



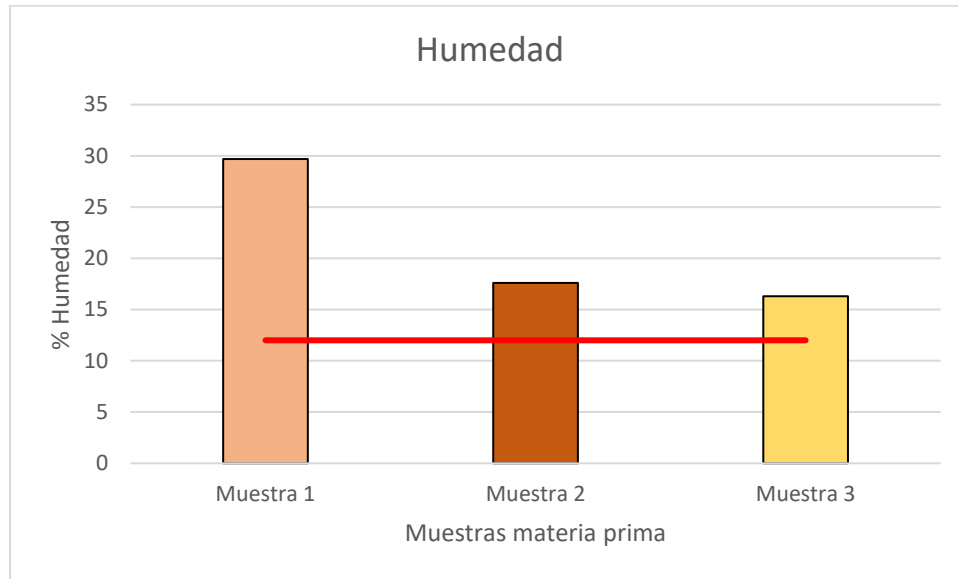
- **Humedad:**

Se obtuvo que el nivel de humedad en la muestra uno, es el más alto de todos, esto se debe a que esta muestra se encuentra directamente afectada por las condiciones climáticas, fue recolectada en un espacio abierto al ambiente, además durante la recolección de la muestra, esta se vio alterada por los fenómenos de lluvia en la ciudad.

Por otro lado, las otras dos muestras que se encuentran en un ambiente controlado conservan una humedad similar entre 16,3% y 17,6%, rebasando la humedad óptima que se describe en la bibliografía estudiada cercana al 12%. En este caso la

muestra tres posee menos humedad, lo que implicaría menos energía para lograr su secado.

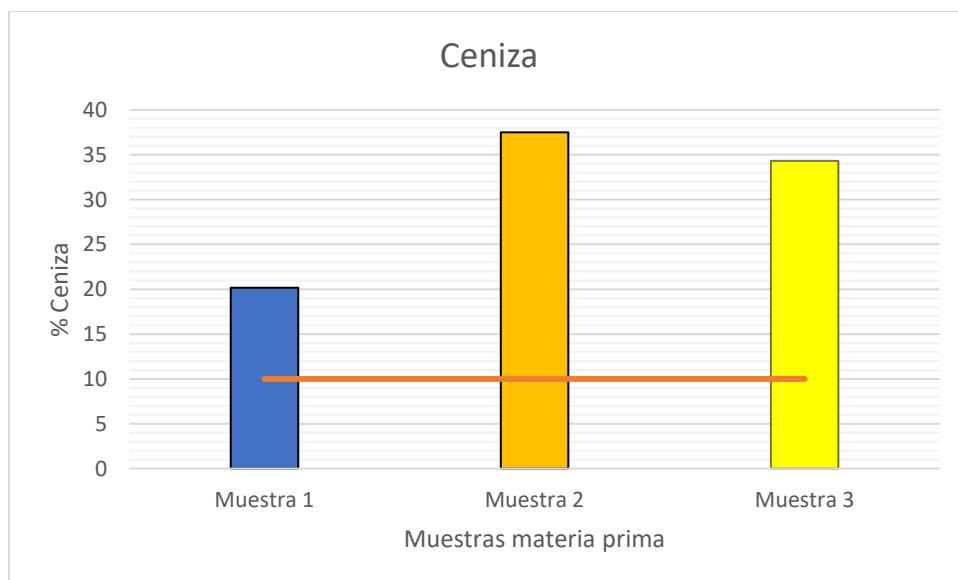
Gráfica 2 Humedad en la materia prima



- Ceniza:

En todas las muestras estudiadas el contenido de cenizas fue alto, ya que todas las muestras superan un 10% de su contenido total de cenizas que es el valor límite establecido al ser el valor promedio que se tiene al quemar la leña, aun así, se marca una tendencia menor en las muestras número uno y tres, haciéndolas las más favorable para continuar con el proceso de densificación.

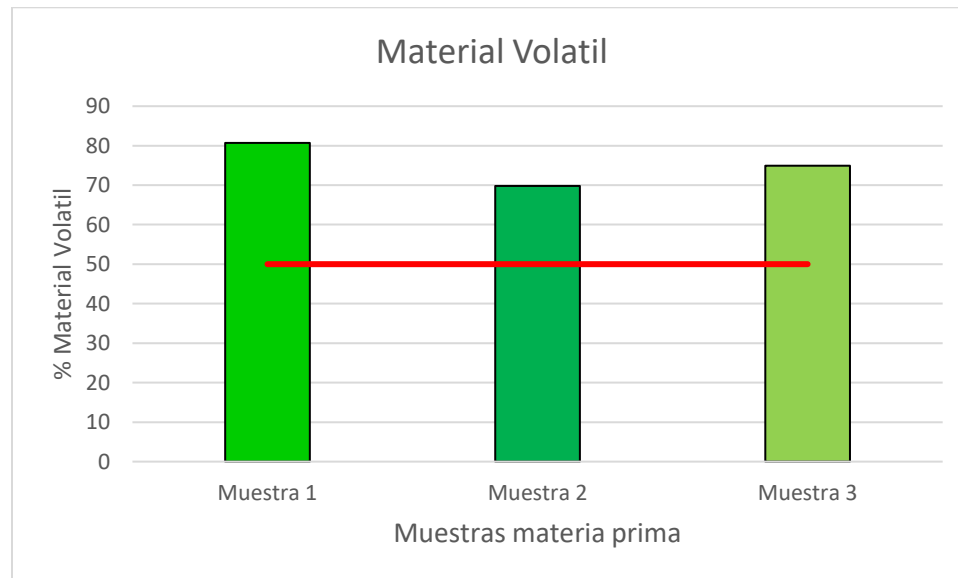
Gráfica 3 Porcentaje de ceniza



- **Material Volátil**

La muestra uno posee un rango superior al 50% de material volátil, lo cual es deseable en la fabricación de combustibles al demostrar que más de la mitad de su contenido se volatiliza mejorando así las propiedades de combustión, este resultado se debe principalmente a las propiedades de la biomasa debido a su composición alta en materia orgánica, sin embargo, no puede olvidarse que posee un alto contenido de humedad lo que dificulta el proceso de densificado de esta materia prima.

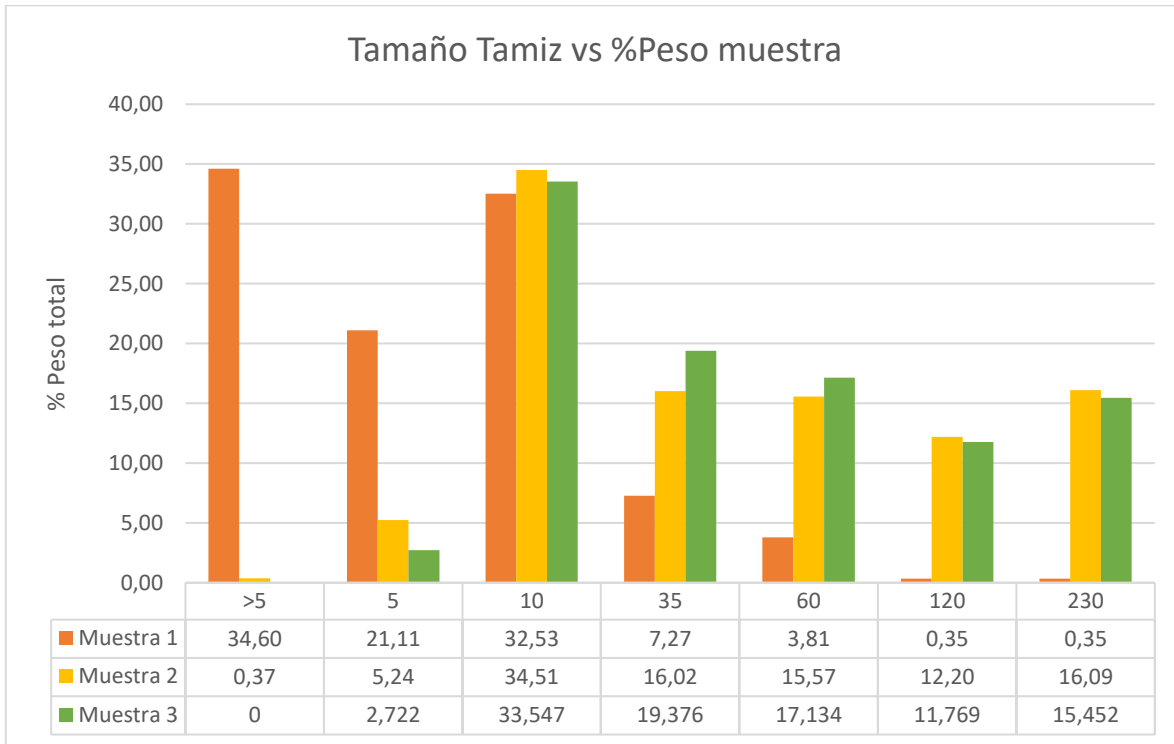
Gráfica 4 Material volátil en las muestras



- **Granulometría:**

Según la bibliografía estudiada el uso de la materia prima para los densificados se debe pasar por un proceso de molienda previo, en este caso se descartaron aquellas muestras sin moler y se trabajaron las muestras con un proceso de molienda sencillo. A partir del análisis granulométrico fue posible identificar que en las muestras uno y dos la mayor concentración de materia prima se depositó en el tamiz de 10 Mesh, mientras que la muestra uno contiene una mayor cantidad de material en el tamiz mayor a 5 mesh (Gráfica 5), de acuerdo a la bibliografía consultada este tamaño no se encuentra en los rangos definidos por los documentos consultados, de modo que su uso no sería recomendable, para que esta biomasa pueda ser empleada con mayor facilidad, tendría que realizarse una segunda o tercera molienda y tamizaje lo que implicaría mayor gasto energético asociado.

Gráfica 5 Comparación materia acumulada vs tamiz utilizado





### 1.3 Análisis de resultados

El material de la muestra uno se descarta para la fabricación de los densificados, debido a que las instalaciones de recolección no poseen la capacidad de asegurar condiciones de humedad y temperatura controlada lo que altera considerablemente las características finales de los densificados y generarían mayores costos de producción. Esto se debe a que su contenido de humedad es alto, dificultando el proceso de molienda, lo que hace necesario realizar un proceso de secado previo, ya que sus condiciones pueden alterar significativamente el proceso de combustión y densificación, además es necesario tener en cuenta que su densidad es muy baja, lo que hace necesario un gran aumento de materia prima en comparación con las otras muestras. Aunque este material posee características muy buenas para la fabricación de densificados, según la bibliografía estudiada debido a su baja densidad es necesario utilizar un densificador que pueda cumplir con las condiciones requeridas en la bibliografía.

Luego de hacer el estudio granulométrico, se encontró que en la muestra dos y tres el mayor porcentaje masico de material retenido estaba presente en el tamiz 10 Mesh, por lo cual se escogió este tamaño de partícula para continuar la investigación, dado que se encuentra en el rango de tamaños evaluados por otros autores (2 mm), elegir este tamaño de partícula permite reducir las etapas de molienda y tamizaje en el proceso.

Para la fabricación de los biocombustibles se selecciona la muestra número tres, debido a que posee características más cercanas a los parámetros establecidos por la literatura, la humedad más baja 16.10% de humedad, el menor contenido de ceniza 34,32% y mayor material volátil 74,93% en comparación con la muestra dos, además su contenido de material leñoso mejora las condiciones de densificado en comparación con la muestra uno.

## 2. CAPITULO II Producción de los biocombustibles densificado a partir del residuo biomásico seleccionado

Se entiende como biocombustibles sólidos aquellos combustibles que se obtienen de materia orgánica generada por procesos biológicos, ya sea de origen vegetal o animal, que permiten en su estado sólido utilizarse para consumo energético y ser una fuente de energía alternativa. (Callejas & Quezada, 2009).

Los biocombustibles sólidos pueden clasificarse en dos grupos: pellets y briquetas. Estos combustibles poseen propiedades caloríficas altas y bajas humedades permitiendo su combustión y aprovechamiento energético. Por las materias primas empleadas en su producción, no contienen ningún componente que produzca olor o humo tóxicos, usualmente se utiliza como materia prima biomasa residual con características lignocelulósicas proveniente de procesos productivos agroforestales. (Rincón & González, 2014). Este tipo de biocombustible se produce a través de procesos de compresión que buscan aumentar su densidad energética, tienen forma cilíndrica para facilitar el proceso de almacenaje y transporte. La principal diferencia entre ambos son sus dimensiones según (Ríos et al., 2017) los pellets son cilindros que cuentan con dimensiones entre los 6 a los 8 mm de diámetro y con longitudes menores a 40 mm (European Biomass Association, 2015), principalmente se producen a partir de aserrín, cascarillas y pajas. En este caso, la compactación del material puede hacerse de manera manual o mecánica, utilizando si es necesario aglutinantes, dependiendo la presión y la materia prima a densificar.

Por otra parte, las briquetas tienen dimensiones que pueden ir desde los 50 a los 130 mm de diámetro y una longitud desde 15 hasta 50 cm (Francisco-Marcos, 1995), se fabrican al igual que los pellets mediante prensas que pueden ser de manuales o mecánicas, debido a las altas presiones se tiende a aumentar la temperatura del sistema lo que facilita la cohesión de los materiales (Correa-méndez et al., 2014).

Debido a su tamaño, las briquetas pueden ser usadas en cualquier sistema de combustión sin algún tipo de adaptación, al tener mayor densidad energética se requiere menos combustible para generar energía, por otra parte, los pellets necesitan una caldera o estufa específica adaptada para su proceso de quemado que normalmente incluye un sistema automático de alimentación de combustible. (Acalora, 2016) Ambos biocombustibles permiten obtener productos finales de mayor densidad mediante esfuerzos mecánicos y la modificación de las condiciones de presión, calor, aglomerantes y humedad. (Vargas Lazo, 2018)

En el presente capítulo se hablará de la metodología elegida para la producción de biocombustible densificados a partir de la biomasa elegida en el capítulo anterior.

## 2.1. Producción de biocombustibles

A continuación, se presenta la revisión bibliográfica realizada para definir los parámetros y condiciones para la producción de biocombustibles sólidos.

### 2.1.1. Parámetros de producción

Para la segunda etapa del proyecto fue necesario establecer los parámetros requeridos y las condiciones de densificación que permitieran obtener un combustible sólido, estable y que cumpliera con los requisitos establecidos en la norma NTC 2060- Briquetas combustibles para uso doméstico (Consejo Directivo de 1987-11-04., 1987) en la Tabla 6 se presentan algunas de sus características:

*Tabla 6 Requerimientos de calidad de las briquetas*

<b>Propiedad</b>	<b>Tipo 1</b>	<b>Tipo 2</b>
Tamaño cm, mínimo	≥ 3	≥ 3
Masa cada briqueta, gr	≥60	≥60
Longitud, cm mínimo	0.035	0.035
Poder calorífico, en kj/kg, mínimo	21000	12500
Cenizas, en % m/m, máximo	30	30
Carbono fijo, % en masa, mínimo	50	-
Material volátil, en % máximo, m/m	15	15
Humedad, en % máximo	2.5	2.5

*Fuente 4 NTC 2060*

### 2.1.2. Construcción de un prototipo de maquina densificadora.

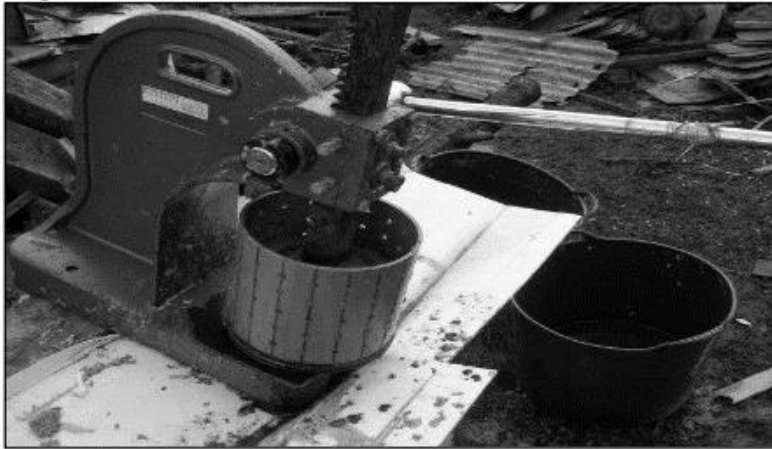
Debido a la situación de emergencia sanitaria por COVID-19, el préstamo de la prensa para densificación de combustibles no pudo desarrollarse como se tenía planeado en el momento de la definición del proyecto. Para solventar esta situación fue necesario diseñar y construir una prensa manual que permitiera la producción de biocombustibles.

Para ello se realizó una revisión bibliográfica que permitió definir una serie de mecanismos para la operación y compresión manual.

Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica con el objetivo de establecer que mecanismos serían más fáciles de construir.

Según (Cruz & Vargas, 2020) la prensa hidráulica de accionamiento manual consiste principalmente en un gato hidráulico el cual es accionado manualmente, el pistón del gato hidráulico compacta el material dentro de un tubo de PVC el cual cumple la función de molde como se muestra en la Figura 13.

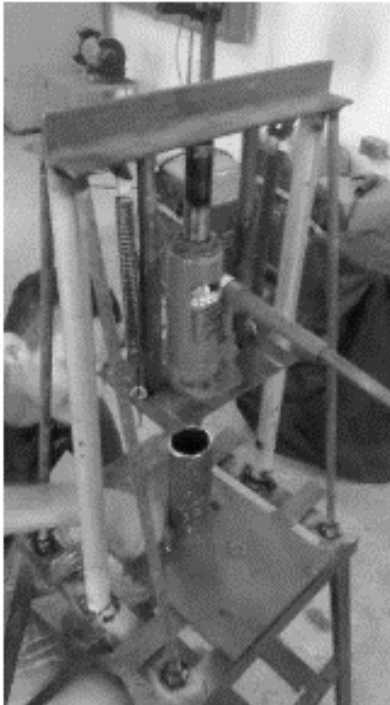
*Figura 13 Prensa hidráulica manual*



*Fuente 5 TISAM. Manual de briquetas de prensa de bricolaje.(Cruz & Vargas, 2020)*

En el trabajo de (Berastegui & Ortega, 2016) se empleó un gato hidráulico tipo botella de accionamiento manual, que se ubicó sobre una plataforma, este era el mecanismo encargado de ejercer la presión sobre la mezcla de biomasa para realizar la compactación, el diseño descrito por este trabajo se muestra en la Figura 14.

*Figura 14 Maquina Briquetadora manual*

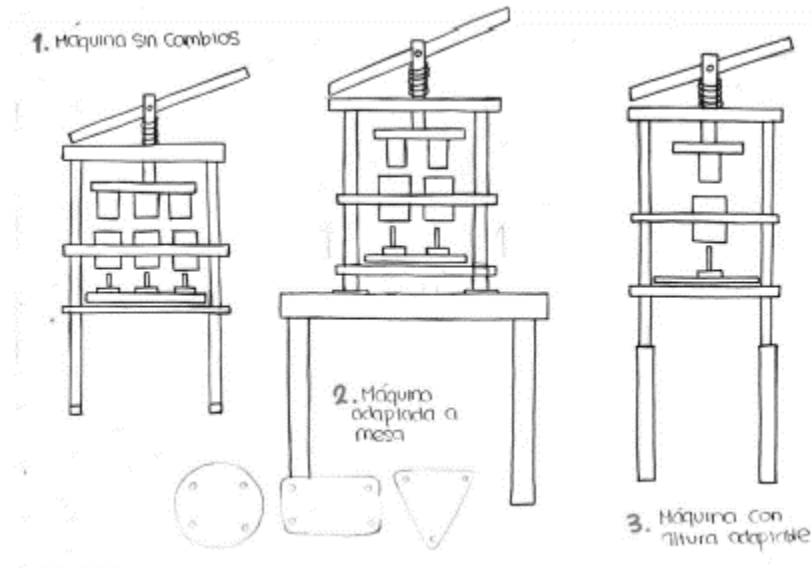


*Fuente 6 BERASTEGUI & ORTEGA, 2016*

Adicionalmente se estudió un mecanismo de palancas, como el descrito en el trabajo de (Archila, 2015), allí se establece que este mecanismo permite remover las briquetas con

facilidad y la gravedad favorece al empuje del material y a su vez permite una aplicación uniforme de la presión, considerando que es necesario que un tubo encaje de manera exacta con el molde como se muestra en la Figura 15.

Figura 15 Boceto sistema de palanca



Fuente 7 Archila, 2015

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, fue posible construir un prototipo densificador de acción manual vinculando los mecanismos descritos anteriormente, este diseño se presentará en la metodología.

### 2.1.3. Elección de las condiciones de operación

Se realizó una revisión bibliográfica que permitiera establecer las presiones y condiciones de densificación evaluadas en otros trabajos, con el objetivo de definir el rango de presión aceptable para el sistema de densificación propuesto, así como la temperatura, tipo de aglomerante entre otros.

De acuerdo con el trabajo de (Fonseca & Tierra, 2011) las presiones de compactación pueden clasificarse en tres grupos principales como se presenta a continuación:

- Altas presiones de compactación (>100 MPa).
- Medianas presiones de compactación con dispositivos de calentamiento (5– 100 MPa).
- Bajas presiones de compactación con el uso de aglutinantes (<5 MPa).

Uno de los parámetros a estudiar fue el uso de aglomerante, según (Kaliyan & Vance Morey, 2009) el uso de aglutinantes naturales tales como lignina, proteínas, grasas, almidón, agua o carbohidratos solubles produce puentes sólidos entre las partículas mejorando las propiedades de compresión del biocombustible.

A continuación, se describen algunos de los trabajos consultados para definir las condiciones de operación en la presente investigación:

De acuerdo con (Mendoza Fandiño et al., 2020) la presión es un parámetro que influye directamente en la forma en la que las partículas del combustible se conforman, llegó a esta conclusión después de haber realizado varias pruebas en las cuales se variaba la presión de compactación.

En el trabajo de (O. Chin & Siddiqui, 2000) se fabricaron cuatro tipos de briquetas los cuales fueron aserrín, cascara de cacahuate, fibras de coco y fibra de palma, también emplearon dos aglutinantes, que fueron melaza y almidón. La presión ejercida estuvo entre 5-7 MPa y fue realizada mediante una prensa hidráulica. Concluyendo que al aumentar el tiempo de sostenimiento de la carga las propiedades de durabilidad y resistencia de las briquetas mejoraban.

En el trabajo de (Berastegui & Ortega, 2016) se produjeron densificados de cascarilla de arroz, carbón mineral y almidón, se usó un tamaño de partícula de 1,18 mm y una presión de compactación de 7 MPa durante un tiempo de sostenimiento de la carga de 10 minutos. Los autores demuestran en su investigación que al realizar un proceso de fabricación con una presión elevada de 200 Mpa/cm<sup>2</sup> se da un aumento térmico de 100 a 150°C lo que genera la plastificación de la lignina que se comporta como un aglomerante natural, haciendo innecesario la adición de aglutinante para la generación de briquetas permitiendo obtener un producto con muy buenas condiciones de compactación y resistencia.

En el trabajo de (Alarcón, 2017) se utiliza almidón de yuca como aglutinante en una proporción del 10% al 20 % y una presión de compactación de 10,22 Mpa para que los biocombustibles mantuvieran la forma y tuvieran una compactación que permitiera su traslado y posible uso.

Por otra parte, (Díaz Artigas et al., 2020), en su proyecto, fabricaron biocombustibles de aserrín y corteza de pino empleando una presión de 7.5 Mpa empleando como aglutinante el residuo de destilación de la resina de pino, lo que permitió que el producto final tuviera buenas condiciones de compactación y debido a que su composición cumple los parámetros establecidos en la norma EnPlus se pueden producir a gran escala.

De acuerdo con (Mendoza Fandiño et al., 2020), la temperatura de operación puede afectar las características finales de los biocombustibles densificados debido a que según el aumento de temperatura puede permitir que se libere la lignina de las biomásas y permite la unión entre partículas.

En el caso de (Rodríguez et al., 2017) se estudió la producción de briquetas con cascara de piñón manso y bagazo de caña de azúcar, en diferentes proporciones y bajo las condiciones de temperatura  $80 \pm 2$  °C, presión de 140 kgf cm<sup>-2</sup> manteniendo la compresión sostenida durante 5 minutos, obteniéndose evaluaciones de resistencia, análisis energético

y calidad de las briquetas, en este caso se evaluó la influencia de estos parámetros sobre los productos obtenidos identificando las mezclas como mejores combustibles densificados.

La (FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1983) realizó un estudio que buscaba aprovechar residuos de la industria del carbón, la carbonilla, mezclándolos con almidón en la producción de combustibles densificados. De este estudio se obtuvo que a una temperatura de 80°C el almidón se asienta en el material aprovechando la pérdida de humedad, permitiendo que el combustible obtenido cuente con una textura manipulable y de fácil combustión, características cercanas a las del carbón.

A partir del estudio bibliográfico y el análisis de los resultados preliminares fue posible definir un diseño de experimentos y pruebas asociadas para la producción de los biocombustibles.

Por medio de diferentes pruebas se clasificaron tres temperaturas a tener en cuenta, la primera se consideró ambiente, la segunda 40°C (establecida en el manual Enplus para la certificación de calidad de pellets (European Biomass Association, 2015)) y por último se eligió 80°C, (establecida a partir de la bibliografía consultada) se tuvo en cuenta la información obtenida del manual EnPlus debido a que la norma NTC no reporta valores de temperatura.

Diferentes autores hablan sobre la necesidad de emplear un aglomerante cuando se trabaja densificación a bajas presiones de compactación, este parámetro en la normatividad Enplus (European Biomass Association, 2015) especifica que el aglutinante no puede superar el 2% del contenido total de la materia prima, nuevamente se tomó en consideración la norma europea debido a que la NTC 2060 no reporta valores máximos de aglutinante sólo establece que no debe poseer características de toxicidad ni producir gases tóxicos o irritantes durante el proceso de combustión (Consejo Directivo de 1987-11-04., 1987). Dada esta consideración de la NTC se decidió aumentar el aglutinante para estudiar las condiciones del producto final, debido a que (LÓPEZ et al., 2015) indica que el uso adecuado de aglutinante de almidón en briquetas es del 4-8%.

## 2.2. Metodología

Durante el capítulo anterior la biomasa fue seleccionada de acuerdo a sus características físicas y el análisis próximo, para continuar con el estudio se incluyó el poder calorífico como propiedad característica de los combustibles. Esta evaluación. Esta propiedad fue evaluada en un laboratorio externo con la muestra seleccionada en el capítulo anterior.

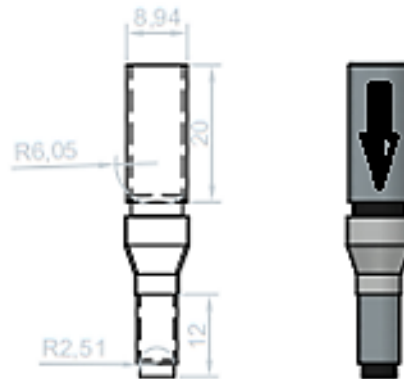
A continuación, se realiza una breve descripción de la metodología empleada para realizar la producción de los biocombustibles densificados.

### 2.2.1. Diseño y fabricación sistema de densificación manual

Como se estableció con anterioridad, inicialmente se tenía previsto el préstamo de un sistema de densificación comercial, pero por la crisis sanitaria desarrollada por el COVID-19 no fue posible emplear dicho equipo, razón por la cual fue necesaria la construcción de un sistema de densificación manual.

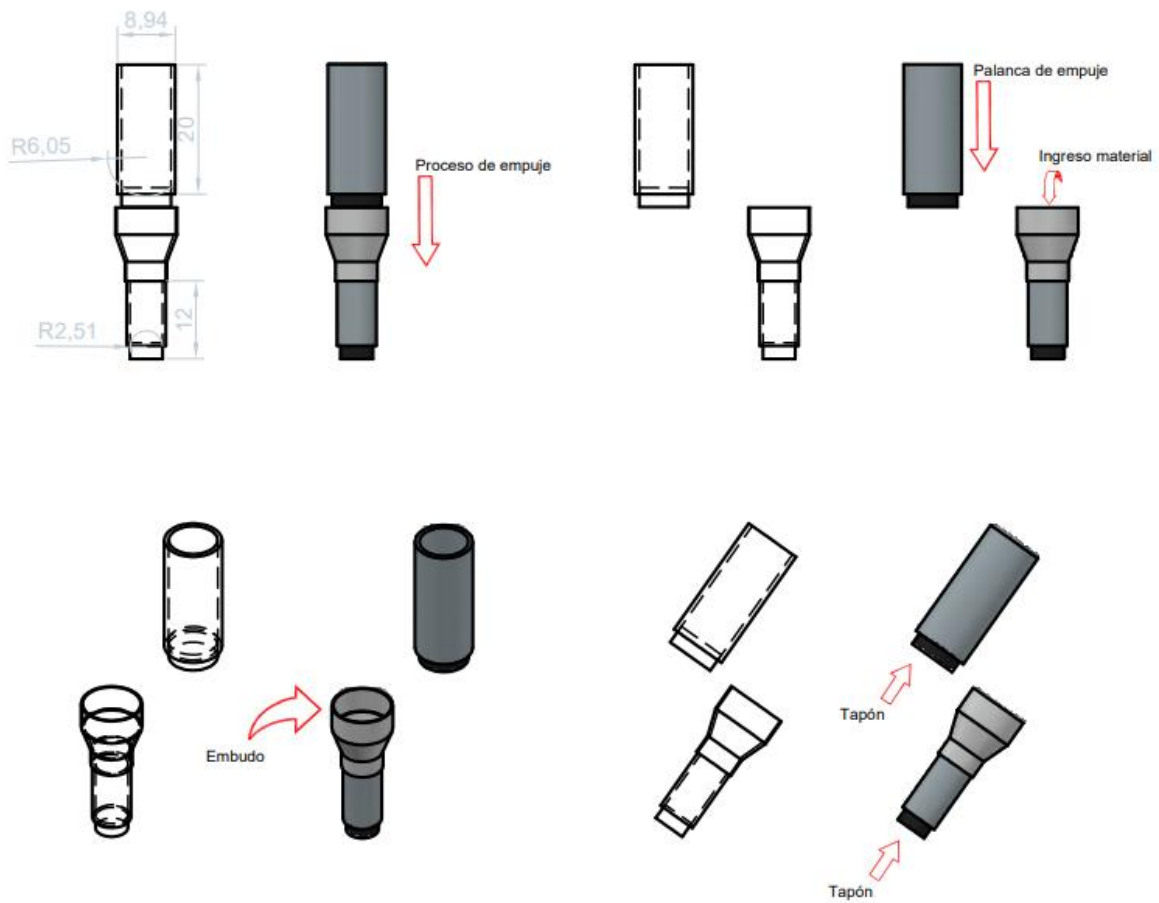
Conforme a la revisión bibliográfica previa, se diseñó un prototipo inicial, de prensa manual mediante un tubo PVC, con un diseño sencillo de embolo (Figura 16), en el cual el material sería empujado de manera directa por otro tubo con un tapón intentando imitar el proceso de compresión de una prensa de banco, sin embargo, este prototipo no fue empleado debido que no alcanzaba a ejercerse la presión que se esperaba ejercer sobre la biomasa.

*Figura 16 Primer prototipo de densificación*



*Fuente 8 Propia. La escala de la imagen está 1:1 manejando unidad de medida en cm*





Fuente 9 Propia

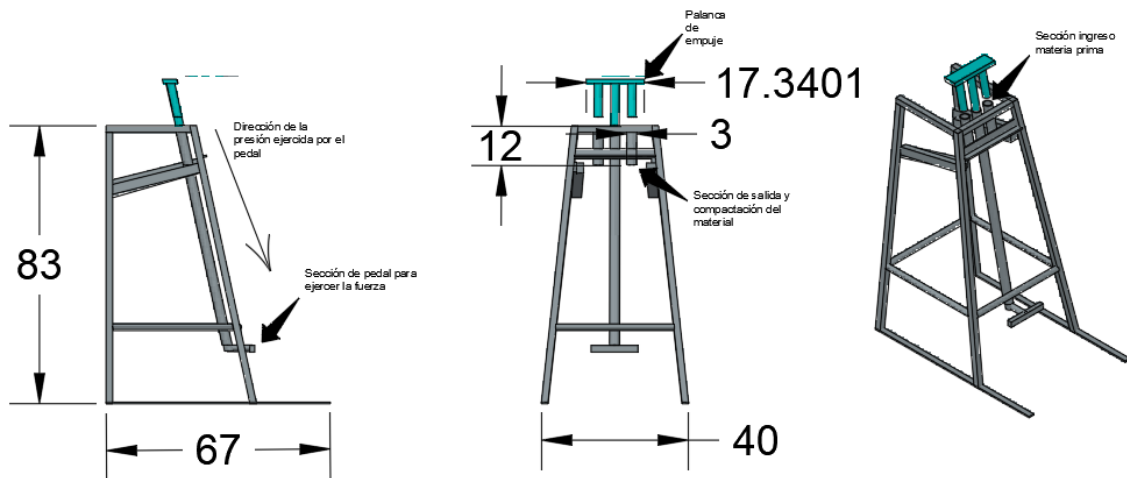
Debido a las condiciones de operación y los recursos se optó por construir una estructura que tuviera la capacidad de sostener un peso de 50 kilos, lo que permitiría aplicar la presión sobre el material. El sistema fue elaborado en acero y un sistema de compresión directa por palanca, el cual se acciona mediante la fuerza ejercida por una palanca de pie. El sistema se basó en algunos modelos identificados en la bibliografía, de los cuales se obtuvo el segundo prototipo presentado en la Figura 17 y Figura 18.

Figura 17 Segundo prototipo



Fuente 10 Propia

Figura 18 Prototipo 2 AUTOCAD



Fuente 11 Propia

Para la medición de la fuerza ejercida con este prototipo se utilizó una báscula digital de mano como se observa en la Figura 19.

Figura 19 Báscula digital de mano



A partir de las medidas del molde y el peso soportado por el embolo fue posible calcular la presión total ejercida sobre el material densificado como se muestra a continuación (Tabla 7).

Tabla 7 Calculo de la presión interna del molde

Peso generado (kg)	50
Fuerza (N)	490,5
Diámetro interno del molde (m)	0,025
Radio	0,0125
Área (m <sup>2</sup> )	0,000491
<b>Presión</b>	
Pa	999238,4
Kpa	999,2
Mpa	1

El producto obtenido se dejaba almacenado una semana, pasado este tiempo se observó que su resistencia disminuía. Razón por la cual se estableció que la presión ejercida no era la adecuada. Por esta razón se optó por modificar el diseño original e incluir un gato hidráulico tipo botella que permitiera aumentar la presión del sistema hasta 2,5 Mpa.

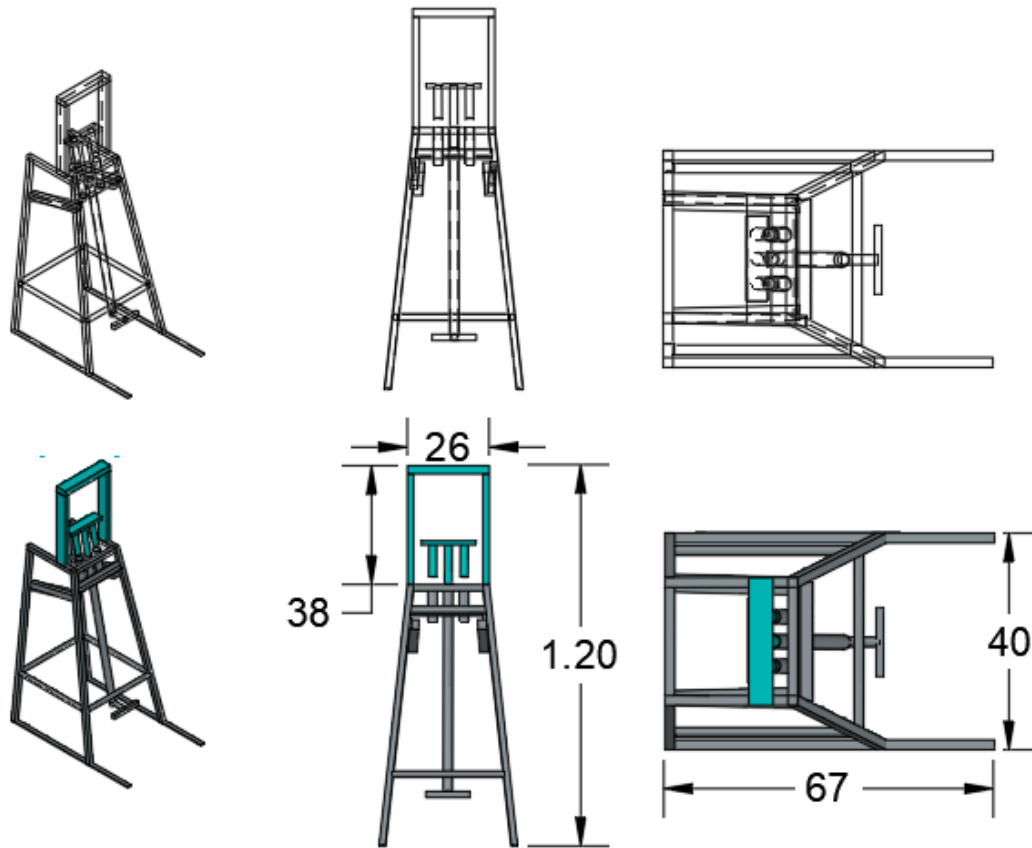
Para esta modificación se soldó una estructura en acero en la parte superior de la estructura que permitiera aprovechar el empuje de un gato hidráulico y que a su vez pudiera transmitir ese empuje de manera equitativa en las dos secciones de ingreso del material. El tercer prototipo fue el seleccionado para la fabricación del biocombustible sólido como se observa en la Figura 20 y Figura 21.

*Figura 20 Prototipo 3*



*Fuente 12 Propia*

Figura 21 Prototipo 3 AUTOCAD



Fuente 13 Propia

Debido al diseño elegido el control de la presión implicó el primer reto de ingeniería, dado que de acuerdo con la bibliografía se debería garantizar al menos una presión superior a 1 Mpa, presión alcanzada con el segundo diseño establecido llegando a una medición de 2,5 Mpa la cual fue medida por medio de un manómetro ubicado en el gato hidráulico.

### 2.2.2. Selección condiciones iniciales

Para la fabricación de los densificados fue necesario primero medir la cantidad de materia prima que se introducía en la entrada de los cilindros, se tomaron seis muestras en cada uno de los cilindros las cuales ocupaban la totalidad de la estructura, después se realizó el respectivo pesaje de cada una y se realizó un promedio para definir el peso final de muestra.



Para el análisis del material se optó por diseñar una serie de experimentos que permitieran alterar las condiciones más destacables sobre el proceso de densificado, con el objetivo de establecer su impacto sobre el producto obtenido. De acuerdo a (Balseca-Sampedro et al., 2018), la presión, temperatura y aglomerante son tres factores que influyen en la producción de biocombustibles. Con base en la bibliografía se establecieron rangos para estos tres parámetros:

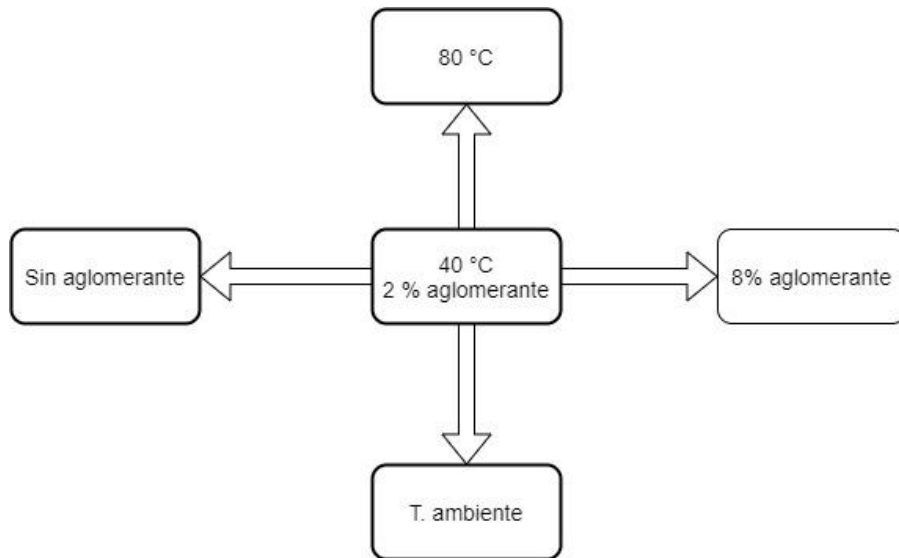
*Tabla 8 Condiciones de operación*

<b>PROPIEDAD</b>	<b>CONDICIÓN</b>		
<b>Presión</b>	1 Mpa	2,5 Mpa	
<b>Temperatura</b>	T. Ambiente	40 °C	80 °C
<b>Aglomerante</b>	Sin aglomerante	2 %	8 %

Se realizó otra clasificación de prueba con un valor de aglutinante del 8% la cual se tuvo en cuenta porque la presión ejercida no era la ideal y dificultaría el proceso de densificación, la elección de este valor fue de acuerdo a (García-Escalona et al., 2018), la cual evidencia que el mejor porcentaje de almidón a utilizar para densificados varia de un 2% a un 8%, al igual que se utilizó la menor cantidad de agua posible que permitiera una correcta mezcla y dispersión del material siendo esta de 15 ml de agua considerando la menor cantidad de agua posible para no realizar un aumento considerable de la humedad final del producto.

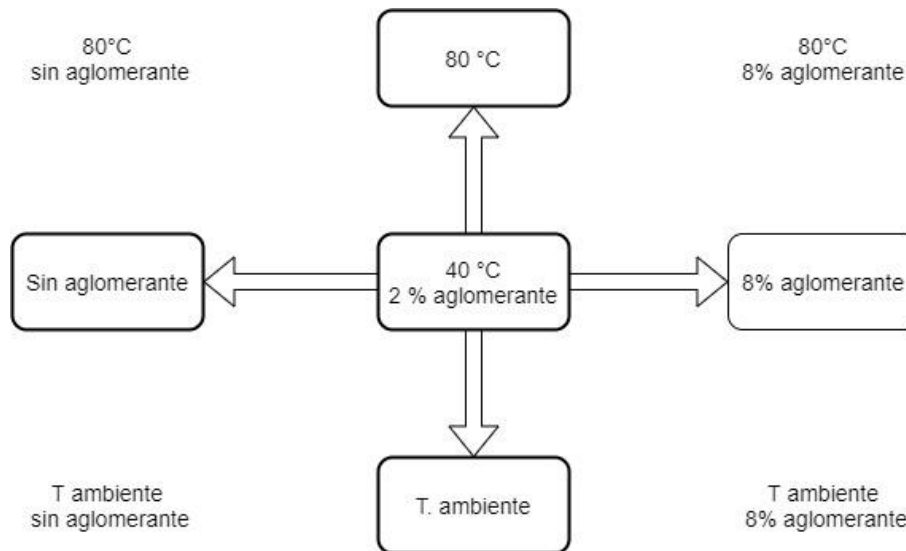
Con el objetivo de evaluar la influencia de estos parámetros sobre el producto final, se propuso un modelo de superficie central compuesto, para una presión de 1 Mpa. El punto central se eligió como 40°C y 2% de aglomerante, como se presenta en la Figura 22

Figura 22 Diseño de experimentos central



La ventaja de este tipo de diseño de experimentos es que pueden expandirse, permitiendo la evaluación de más parámetros y una exploración mayor de la influencia de las condiciones operativas. (Figura 23)

Figura 23 Diseño central compuesto



### 2.2.2.1. Selección condiciones de aglutinante

Para la elección del material utilizado como aglutinante se tuvieron en cuenta diferentes factores como propiedades funcionales de adhesión, función principal de ligante o aglutinante, sustancia natural libre de químicos, fácil acceso y bajo costo en el mercado

siendo así el almidón el elegido para la fabricación de los densificados, ya que cumple todas las propiedades nombradas anteriormente, que coinciden con la información reportada en el estudio de (García-Escalona et al., 2018) quienes utilizan almidón como aglomerante.

Al obtener el peso del material necesario para cada densificado, se realizó un cálculo que permitió identificar la cantidad de aglutinante y agua requeridos para la biomasa a densificar, de modo que el aglutinante que no sobrepasara el 2% total de la masa del combustible y que además no modificara significativamente el porcentaje total de humedad como se muestra en la Tabla 9.

Fue necesario realizar el cálculo asumiendo el total de nueve muestras a usar por cada presión, ya que esto permitía disminuir el tiempo de fabricación de la mezcla de aglomerante y además al aumentar las cantidades disminuía el proceso de pesaje y división a comparación de realizarse con cada uno. De este modo se hizo una sola mezcla para todas las muestras a densificar.

*Tabla 9 Cálculo de aglomerante*

	Valor	Unidad
masa cargada al sistema	33,75	gramos
humedad	16,50%	
humedad	20%	
masa de aglomerante	0,67	gramos aglomerante
agua de mezcla	1,18	gramos
porcentaje de aglomerante	2%	
masa de agua	5,569	gramos
masa material seco	28,18	gramos
masa total	35,60	gramos

El proceso de dispersión del aglutinante se realizó por medio de un frasco el cual tenía divisiones marcadas que indicaban la cantidad indicada para cada una de las muestras. Se colocaban los 33, 72 gramos sobre una mesa completamente limpia y se rociaba la mezcla de aglutinante por medio de una boquilla de aspersion.

#### 2.2.2.2. Modificación de temperatura

*Para la modificación de temperatura, la muestra elegida, se ingresaban a un horno, el tiempo de permanencia en el horno se completaba cuando la muestra alcanzara las condiciones requeridas, para el seguimiento de la temperatura se empleó un termómetro digital tal como se muestra en la*

Figura 24.



Figura 24 Control de temperatura de las muestras



### 2.2.3. Proceso de densificado

Se realizaron un total de 18 muestras, las cuales se dividían en dos grupos según la presión ejercida; ya sea de 1 Mpa o de 2,5 Mpa; a su vez cada grupo asumió una subdivisión de tres repeticiones por temperatura como se muestra en la Figura 25.

Figura 25 Diseño de pruebas



Para el proceso de densificación se tuvieron en cuenta las condiciones identificadas de (O. C. Chin & Siddiqui, 2000) quienes fabricaron briquetas con aserrín y aglutinante de melaza y almidón, con un proceso de compactación que poseía un rango de 5-7 Mpa de presión generados por una prensa. Encontraron que, cuando se aumenta el tiempo de sostenimiento de carga se mejoraban las condiciones finales de los densificados.

Según Ortega & Berástegui (2016) quienes realizaron un proceso de densificación a partir de la mezcla de cascarilla de arroz, carbón mineral y aglomerante natural de yuca, quienes seleccionaron un tamaño de partícula de 1,18 mm y para la compactación utilizaron una presión de 7 MPa durante un tiempo de sostenimiento de la carga de 10 minutos.

Por lo cual se estipulo para esta investigación se estableció un tiempo de carga de 10 minutos y reposo de 5 minutos retirando la presión para permitir disminuir la presión al

retirar el material. Finalmente, después de retirado el biocombustible de la prensa se dejó secar a temperatura ambiente por 24 horas.

### 2.3. Resultados

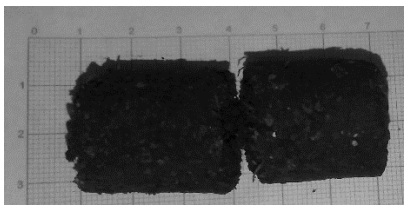
A continuación, se presentan algunos de los densificados obtenidos, lo que permite realizar un análisis de la influencia del cambio de parámetros de fabricación sobre las características de producción y almacenamiento.

El análisis está separado por la presión aplicada, inicialmente se destacarán aquellos materiales producidos a 1Mpa:

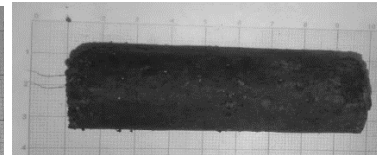
*Figura 26 Sin aglutinante y temperatura ambiente*



*Figura 27 2% Aglutinante y temperatura ambiente*



*Figura 28 8% Aglutinante y temperatura ambiente*



El densificado presentado en la Figura 26, muestra que las condiciones iniciales de la muestra no tienen la capacidad de unión para fabricar un biocombustible sólido sin ayuda de un aglutinante, en este caso una vez se retiraba la presión del sistema y el biocombustible era extraído del sistema de compresión, el material se desligaba y se descomponía.

Por otra parte, en el densificado presentado en la *Figura 28* y *Figura 28* se observa la influencia del aglomerante sobre la estructura y conformación del biocombustible, en la *Figura 28* se puede observar que aunque hay un proceso de cohesión, se sigue presentando un desligamiento del material que lo conlleva a su rompimiento, en el caso de la *Figura 28* el material presentó buena estructura inmediatamente se extrajo del sistema de fabricación, demostrando poseer buenas propiedades de unión, sin embargo, después del tiempo de almacenamiento su resistencia disminuyó.

Esta tendencia pudo deberse a la pérdida de humedad y a la baja presión realizada durante su producción, mientras menos humedad tenga el densificado sus puentes de hidrogeno se debilitan y las fuerzas de unión que mantienen el biocombustible disminuyen.

Figura 29 8% Aglutinante y temperatura ambiente

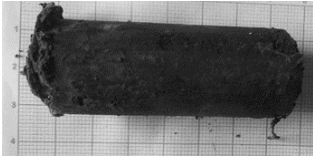
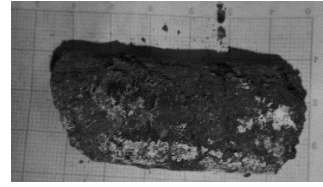


Figura 30 8% aglutinante 40°C



Figura 31 80°C y 8% aglutinante



En la Figura 29 se presenta un biocombustible densificado a una presión de 2,5 Mpa, 8% de aglutinante a temperatura ambiente, en este caso la estructura se muestra más sólida y con mejores propiedades de cohesión en comparación con el material obtenido mediante pruebas con las mismas características y menor presión, demostrando la influencia que tiene la presión sobre la capacidad de unión del combustible.

Como en otros ensayos se realizaron cambios de temperatura para evaluar la influencia de este parametro en las características del material obtenido, en la Figura 30 se presenta un combustible obtenido a una temperatura de 40°C 8% de aglutinante y una presión de 2,5 Mpa, en este se puede observar que el aumento de la temperatura genera un densificado con menor longitud y con una mayor resistencia inicial.

En la Figura 31 se presenta un ensayo aumentando la temperatura aún más, para este caso el producto presentó una longitud menor que los otros densificados, el material pudo ser mejor comprimido.

Figura 32 Sin aglutinante y temperatura ambiente

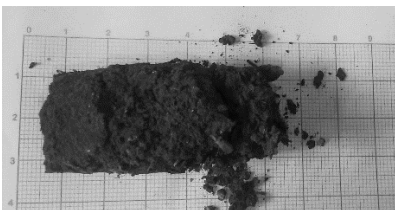


Figura 33 40°C y 2% aglutinante

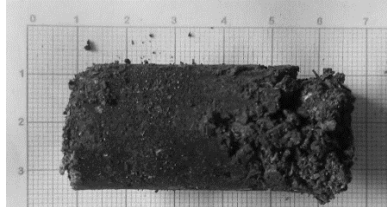
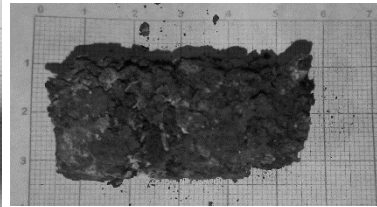


Figura 34 8% aglutinante y 80°C



En la

Figura 32, se presenta un biocombustible a una presión de 2,5 Mpa, sin aglutinante y temperatura ambiente, en la sección anterior se había presentado un densificado con estas mismas características a una presión inferior, en este caso a pesar del aumento de presión, no se pudo garantizar la cohesión del material, debido seguramente a que las características mismas de la biomasa, la falta de aglomerante y la humedad.

La muestra presentada en la Figura 34, tuvo un aumento de aglutinante, en este caso es posible evidenciar una conformación del material obtenido sin embargo luego del proceso de almacenamiento el material no pudo soportar su transporte, de acuerdo con la

experimentación el aumento de temperatura dificultó el proceso de compactación ya que durante el aumento de temperatura el material se compactaba y solidificaba antes del proceso de prensado, lo que generaba que durante esta etapa secciones de la materia prima seca no se uniera correctamente, siendo aún más evidente durante el mayor aumento de temperatura que corresponde a 80°C como se observa en la Figura 34.

## 2.4. Análisis de resultados

- Se pudo encontrar que los materiales sin aglutinante no poseían las características necesarias para lograr densificarse por lo cual se retira su análisis del siguiente módulo, además también se encontró que en su totalidad los biocombustibles generados con una presión de 1Mpa no mantenían su consistencia o en su gran totalidad se rompían.
- Además, se pudo evidenciar que aquellos biocombustibles generados con una temperatura de 80°C se solidificaban en el proceso de ingreso al horno y sus condiciones no permitían una correcta cohesión de los materiales, haciendo que este se fracturara, lo que, de acuerdo con la literatura consultada corresponde una baja concentración de lignina haciendo que el material se separara en diferentes partes.

### 3. Capitulo III Caracterizar el biocombustible producido y evaluar su calidad a partir de normativa vigente

La elaboración de briquetas es un método por medio del cual se puede aprovechar el poder calorífico de las biomásas (Mendoza Fandiño et al., 2020), además que los biocombustibles según (Callejas & Quezada, 2009) pueden sustituir parte de los combustibles tradicionales a base de hidrocarburos, ya sea porque el precio de estos se eleve o el ser humano llegue a agotarlos. También otra razón importante de los biocombustibles es la reducción de CO<sub>2</sub>.

Aunque se tenga en cuenta que los procesos de aprovechamiento de los diferentes materiales residuales provenientes de cultivos agrícolas están en aumento, es necesario cumplir con las condiciones que son decretadas por las diferentes entidades para asegurar un producto que no afecte las condiciones de salud del ser humano y a que a su vez cree un estándar que permita ser la base de la fabricación de los diferentes biocombustibles.

En cuanto a normatividad para la generación de biocombustibles se resalta principalmente la normatividad EnPlus (European Biomass Association, 2015) siendo este un sistema de certificación de esquema de calidad para pellets de madera de manera mundial.

Para el caso de normatividad de las briquetas, se resalta principalmente la Norma Técnica Colombiana NTC 2060 (Consejo Directivo de 1987-11-04., 1987) la cual establece los requisitos que debe cumplir y los ensayos a los cuales se debe someter todas las briquetas que tengan uso doméstico.

#### 3.1 Metodología

A continuación, se realiza una breve descripción de la metodología empleada para realizar la caracterización de los biocombustibles fabricados previamente

##### 3.1.1 Densidad

Para el cálculo de la densidad de los productos densificados, cada combustible fue pesado de manera individual y su masa fue dividida en su volumen. El cálculo del volumen se realizó tomando la medición de la altura y el diámetro Para este proceso se utilizó la Ecuación 7 presentada anteriormente en el capítulo 1:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$\rho =$  Densidad

$m = \text{Masa}$   
 $v = \text{Volumen}$

### 3.1.1 Relación de compresión

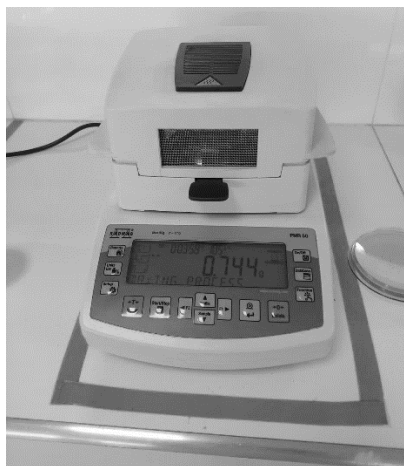
Este análisis se realizó siguiendo la metodología descrita en el artículo “Efecto del tamaño de partícula y la adición de cáscara de cacao en las propiedades de los pellets de aserrín y carbón” mediante la comparación de la densidad inicial del material sin densificar y final una vez el material ha sido densificado (Ecuación 8). Este parámetro es importante dado que permite considerar propiedades de resiliencia, plasticidad y capacidad de deformación de la biomasa durante la compresión. (Forero-Nuñez et al., 2015)

$$\text{Relación de compresión} = \left[ \frac{\text{Densidad final}}{\text{Densidad inicial}} \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

### 3.1.2 Humedad

Para este proceso se utilizó una balanza medidora de humedad o termobalanza como la que se muestra en la Figura 35 , este equipo cuenta con un rango de temperatura de secado de 105°C y un rango de peso de muestras desde 0,1 g a 1 g. En esta ocasión se empleó este equipo con el objetivo de disminuir el tiempo del proceso de secado.

Figura 35 Balanza de humedad





### 3.1.3 Ceniza

Para la determinación de cenizas se aplicó el método estándar ASTM E1534 – 93 (ASTM, 2013b). El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material seco.

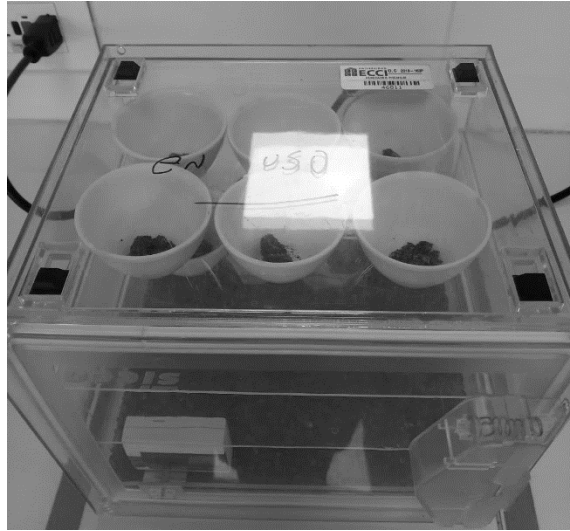
Se utilizó el material resultante de la medición de humedad en la termobalanza, ya que esta nos otorgaba el valor del peso final de la muestra, cada una de estas fueron colocadas en crisoles previamente pesados y se llevaron a una mufla la cual fue calentada a una temperatura de 600°C (Figura 36) durante 30 minutos.

*Figura 36 Mufla*



Para el proceso de pesado de las muestras fue necesario esperar una hora con la mufla cerrada, esto con el objetivo de realizar una disminución paulatina de temperatura al interior del equipo, después las muestras fueron llevadas a un desecador durante 10 minutos (Figura 37), una vez finalizado este proceso se realizó su respectivo pesaje.

Figura 37 Desecador con muestras



Las cenizas fueron calculadas mediante la Ecuación 9:

$$\text{Ceniza} = \left[ \frac{(Pz - Pc)}{(Pm - Pc)} \right] \times 100$$

Ecuación 9

Donde:

**Ceniza** = Contenido de ceniza (%)

**Pc** = Peso crisol (g)

**Pm** = Peso muestra y crisol

**Pz** = Peso muestra final y crisol

#### 3.1.4 Combustión

Se realizó el proceso de combustión de cada densificado por medio de un crisol y un mechero de bunsen, este proceso consiste en un procedimiento de quemado con fuego directo en el cual se busca observar las propiedades de quemado de los biocombustibles, calculando el tiempo y la temperatura alcanzada.

Figura 38 Combustión densificados



### 3.1.5 Poder calorífico

Esta prueba se desarrollo teniendo en cuenta la PRE-012 V00:2018. Fue necesario realizar esta medición por medio de un laboratorio externo acreditado, por lo cual fue realizada por la Universidad Nacional de Colombia en la sede de Medellín. Se realizó un método de ensayo por calorimetría con un rango de emisión de 1214 J/g a 40 x10<sup>3</sup> J/g (290 cal/g a 9560 cal/g).

### 3.1.6 Resistencia al impacto (%Durabilidad)

Esta prueba se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el artículo “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA FABRICACIÓN DE PELLETS A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PROVENIENTE DE PALMA DE ACEITE” iniciando con una medición de la masa de cada uno de los biocombustibles densificados, a partir de una altura de 1,80 metros se realizó una caída libre de cada biocombustible con tres repeticiones del procedimiento, teniendo en cuenta que se seleccionaba el pedazo más grande para realizar el siguiente lanzamiento, finalmente se seleccionaba el pedazo de mayor tamaño después de realizar las tres repeticiones de la caída y se pesaba, comparando la masa perdida con la masa inicial del densificado (Rincón & González, 2014)

$$\%Durabiliad = \left[ \frac{\text{masa final}}{\text{masa inicial}} \right] \times 100$$

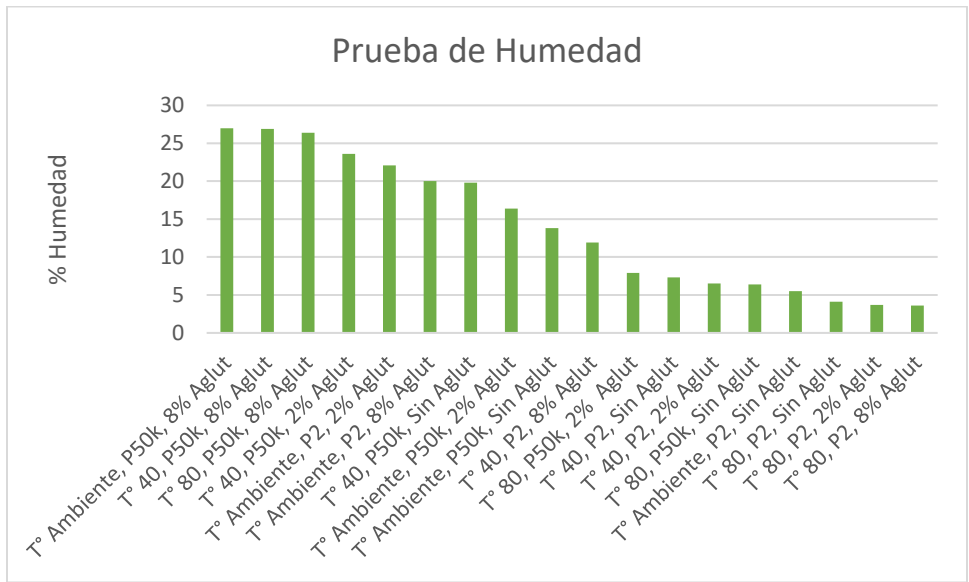
Ecuación 10

### 3.2 Resultados

- Humedad:

Para el proceso de humedad se debe identificar aquellos densificados que tengan menor concentración de humedad, ya que este parámetro puede alterar el proceso de quemado del biocombustible sólido. En los datos observados, se encuentra que no se pudo encontrar un parametro de fabricación que se comportara proporcional o inversamente proporcional a los valores de temperatura o aglutinante que son los parametros que podían añadir o disminuir la humedad. Aún así se intentó identificar y destacar los densificados con un valor menor o igual a 10% en humedad basandonos en lo regido en el esquema de certificación ENPLUS de calidad.

Gráfica 6 Humedad densificados

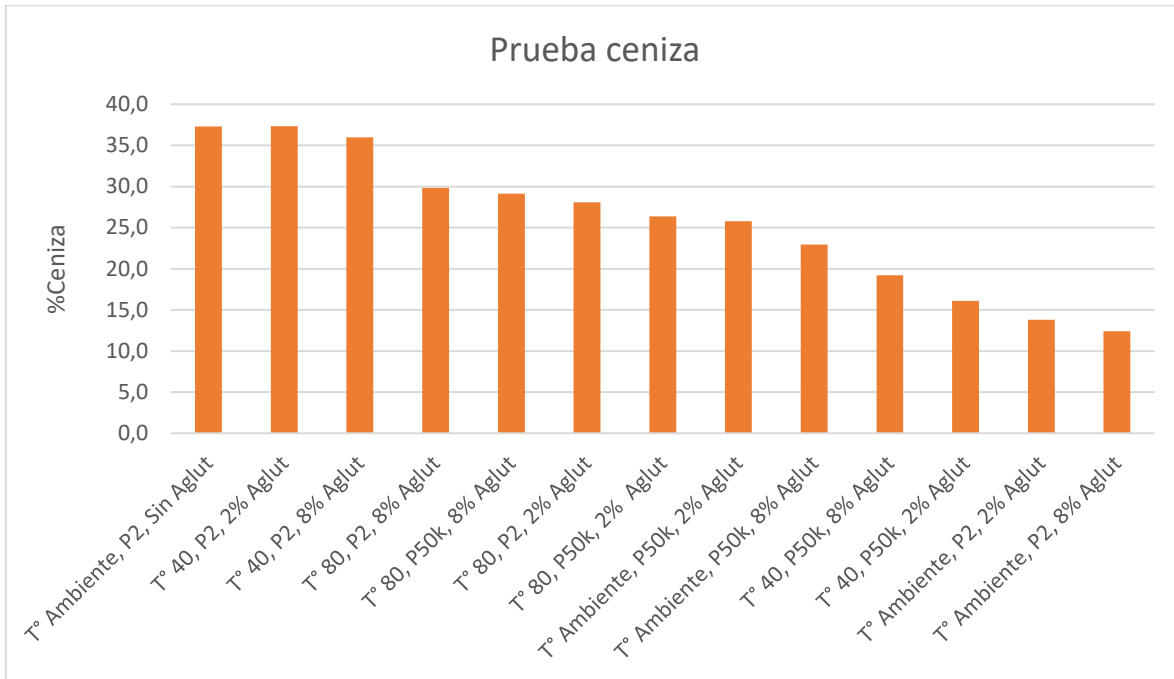


- Ceniza:

A continuación, se muestran los resultados de la prueba de ceniza, en los cuales se debe destacar aquellos que posean un contenido menor de ceniza, ya que garantiza que el material no combustible es menor, lo que mejora las condiciones a la hora de quemado del material al no disminuir el proceso de combustión por la cantidad de residuo acumulado y a su vez genera menor residuo.

Basandonos en la información de la NTC 2060 que pide un valor inferior o igual a 30% , se encontró que son sólo 3 densificados los que no cumplen este parámetro pero por una cantidad inferior al 10%.

Gráfica 7 Ceniza de los densificados



- Poder calorífico

El valor otorgado para esta prueba fue de 3249 cal/g es decir 13602.9 kj/kg, siendo este valor menor a lo requerido en la NTC 2060 (Consejo Directivo de 1987-11-04., 1987) el cual es 21000 mínimo.

- Resistencia:

En este proceso se debe tener a consideración aquellos biocombustibles que posean una resistencia superior a 90% ya que se debe garantizar en el proceso de traslado, manipulación y almacenamiento que los densificados no tengan agrietamientos y/o rompimientos. Según esta información se hace una reducción considerable en los densificados a seleccionar, ya que solo 3 cumplen con este parámetro

Gráfica 8 Resistencia de los densificados

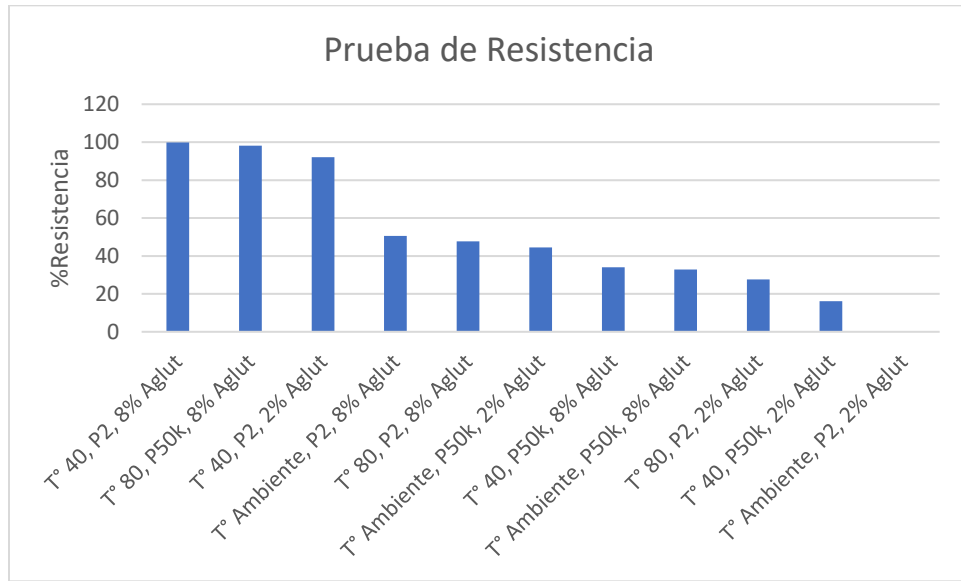


Figura 39 Experimento primera caída



Figura 40 Experimento segunda caída

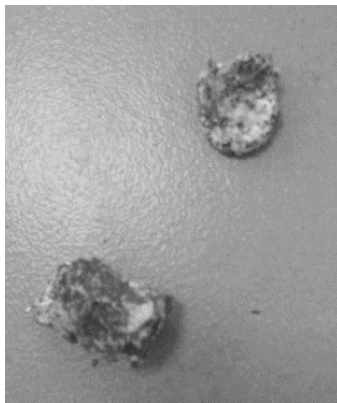
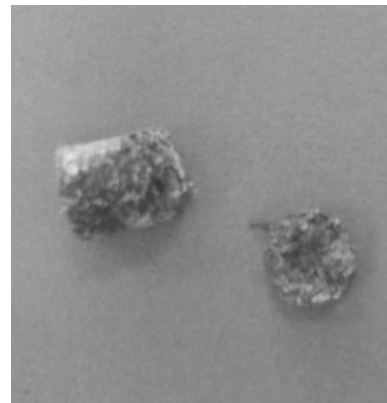


Figura 41 Caída 3, Experimento tercera caída



### 3.3 Análisis de resultados

- Los biocombustibles generados con temperaturas de 80°C dificultan el proceso de compactación de material, esto se debe principalmente porque el aumento de temperatura no se desarrolla durante el proceso de generación de presión de la máquina, ya que el aumento de temperatura durante la densificación se produce principalmente por las altas presiones generadas, condición que no sucede en este caso.
- Los mejores resultados de resistencia lo demuestran el biocombustible que posee una temperatura de 40°C y 8% de aglutinante, este parámetro es importante ya que es necesario considerar el proceso de manipulación y transporte de los biocombustibles y hay que garantizar la mayor compactación y menor pérdida de material por caída.
- El poder calorífico de la muestra es menor a lo requerido por la normal, por lo cual se podría mejorar las condiciones del material al modificar las combinaciones de las muestras y añadir un material con mayor poder calorífico.
- Debido a la baja presión se descartaron aquellos biocombustibles que no poseían aglutinante ya que no fueron capaces de lograr un proceso adecuado de compactación.

## 4. Conclusiones generales

- Las condiciones iniciales de la materia prima influyen en el resultado final de los densificados, ya que factores como la humedad, densidad y composición del mismo puede llegar a hacer que las propiedades del biocombustible varíen y se aumenten las condiciones previas para su tratamiento y completo aprovechamiento.
- Aunque el pasto tiene muy buenas propiedades iniciales para la fabricación de biocombustible sólidos, es necesario realizar un mejor proceso de almacenamiento y asegurar un equipo que garantice una mayor relación de compresión que permita el total aprovechamiento del producto.
- Un factor de alta importancia para la fabricación de biocombustibles sólidos es la presión, dado que permite disminuir la distancia entre partículas asegurando las condiciones apropiadas de compactación y estructuración de densificados.
- El mejor biocombustible obtenido fue aquel con las propiedades de presión de 2 Mpa, temperatura de 40°C y aglutinante en 8%, debido a que es el densificado con las propiedades más cercanas a las requeridas en la normatividad.
- Al mejorar las recomendaciones descritas en este trabajo se podría garantizar un producto que pueda llegar a alcanzar las propiedades descritas en la NTC 2060 y poder así llegar a generar un producto comercial que ingrese al mercado.



## 5. Recomendaciones

- Se considera oportuno realizar un almacenamiento que permita controlar las condiciones de temperatura y humedad del material lignocelulósico residual de la Universidad, ya que este material podría permitir la obtención de un biocombustible aprovechable.
- Se recomienda realizar las pruebas a mayores presiones controlando adecuadamente las condiciones de operación y propiedades del material densificado.
- Se recomienda añadir un elemento que mejore las condiciones de poder calorífico del biocombustible, ya sea aumentando el material maderable de la muestra o añadiendo un material externo.
- Con los resultados obtenidos se recomienda que se realice un aumento de temperatura durante el proceso de prensado del material, ya que las temperaturas altas garantizan mayor resistencia en el material debido a la temperatura de transición vítrea de la lignina.
- Se recomienda realizar pruebas de contenido de macromoléculas, celulosa, hemicelulosa y lignina con el objetivo de establecer la concentración de estos compuestos en la biomasa y asegurar su potencial en la obtención de biocombustibles.



## 1.4 Bibliografía

- Acalora. (2016). *comprar briquetas | comprar pellets | briquetas vs pellets*.  
<https://www.acalora.es/comprar-briquetas-vs-comprar-pellets-diferencias-similitudes-y-ventajas/>
- Alarcón, S. (2017). Elaboración de briquetas a partir de desechos de tallos de rosas y papel reciclado. In *UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA*. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD.
- Archila, L. (2015). *Máquina para fabricación de briquetas de aserrín para aserradero Lorenz*. UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR.
- ASTM. (1994). Standard Test Method for The Durability of Biomass. *ASTM International*, 14(Reapproved), 5–6.
- ASTM. (2013a). Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. *ASTM International*, 82(Reapproved 2013), 2. <https://doi.org/10.1520/E0871-82R13.2>
- ASTM. (2013b). Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels E1534-93. *ASTM International*, 82(Reapproved 2013), 2. <https://doi.org/10.1520/E1534-93R13.2>
- ASTM. (2013c). Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. *ASTM International*, 3(1), 3. <https://doi.org/10.1520/E0872-82R13.2>
- ASTM. (2014). Standard Test Method for Bulk Density of Densified Particulate Biomass Fuels (ASTM E873). *ASTM International*, 82(Reapproved 2013), 2. <https://doi.org/10.1520/E0873-82R13.4>.
- Balseca-Sampedro, O. F., López-Ortiz, S. A., Viteri-Núñez, E. F., Analuisa-López, D. S., & Hernández-Gavilanes, E. V. (2018). Elaboración, caracterización y posibles aplicaciones de briquetas de residuos de café (BORRA) como biocombustible sólido. *Polo Del Conocimiento*, 3(7), 420. <https://doi.org/10.23857/pc.v3i7.565>
- Barranco, C., Rodríguez, J., Jorge, F., Doria, Y., & Vasquez, R. (2017). Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tusa de maíz, bioaglomerante de yuca y carbón mineral del departamento de Córdoba Development of densified solid biofuels a from corn cob, cassava starch and mineral coal department of Córdoba. *Revista Chilena de Ingeniería*, 25(4), 643–653. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000400643>
- Beltron, I., Palacios, H., & Rosero, E. (2019). Evaluación energética de biocombustibles sólidos elaborados a partir de mezclas de biomasa lignocelulósica. *REVISTA RIEMAT*, 4(10), 2–7.
- Berastegui Barranco, C., Ortega Rodríguez, J. P., Mendoza Fandiño, J. M., González Doria, Y. E., & Gómez Vasquez, R. D. (2017). Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tusa de maíz, bioaglomerante de yuca y carbón mineral del departamento de Córdoba. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 25(4), 16. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000400643>
- Berastegui, C., & Ortega, J. (2016). ELABORACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS A PARTIR DE TRES BIOMASAS RESIDUALES, TRES TIPOS DE BIOAGLOMERANTE Y CARBÓN MINERAL DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA. *Universidad de Cordoba*, III(2), 125.
- Callejas, E., & Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, 16(100), 0.
- Chávez-Sifontes, M. (2019). La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos. *Anales de Química - RSEQ*, 9. <http://analesdequimica.com/115-5/1155-chavez.pdf>
- Chin, O. C., & Siddiqui, K. M. (2000). Characteristics of some biomass briquettes prepared

- under modest die pressures. *Biomass and Bioenergy*, 18(3), 223–228.  
[https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00084-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00084-7)
- Chin, O., & Siddiqui, K. (2000). Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures. *Materials Sciences and Applications*, 18 (3), 223–228.  
<https://doi.org/10.4236/msa.2013.49064>
- Choquecota, W. (2014). Facultad De Ingeniería De Procesos Escuela Profesional De Ingeniería De Materiales Tema Proyecto De Investigación Para La Densificación De Biomasa Con Arcilla, Combustible Para La Obtención Local De Materiales De Construcción. *UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS*, 64.  
<http://bibliotecas.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2907/MTchmewo008.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Consejo Directivo de 1987-11-04. (1987). NTC 2060: BRIQUETAS COMBUSTIBLES PARA USO DOMESTICO. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)*, 11.
- Correa-méndez, F., Carrillo-parra, A., Rutiaga-quñones, J. G., & Jurado, E. (2014). Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(25), 52–63.
- Cortés-Sánchez, M. D., Gata-Montero, E. M., Papió-Tertero, A., Rodríguez Rivas, Á., & Sánchez-Santos, J. M. (2019). Biocombustibles: tipos y estrategias de producción. *MoleQla: Revista de Ciencias de La Universidad Pablo de Olavide*, 35, 6.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7094734&info=resumen&idioma=SPA%0Ahttps://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7094734%0Ahttps://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero35/Numero-35.pdf>
- Cruz, F., & Vargas, J. (2020). *Diseño de una máquina para la fabricación de briquetas de posos de café*. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- DANE. (2011). RESULTADOS ENCUESTA NACIONAL AGROPECUARIA ENA. *Dirección de Metodología y Producción Estadística – DIMPE –*, 181.
- Díaz Artigas, I. J., Díaz Concepción, A., Rodríguez Piñero, A., Alfonso Álvarez, A., & Tamayo Mendoza, J. E. (2020). Briquetas energeticas con aserrín y corteza de pino. *Ingeniería Energética*, 41(1), 1–6.
- Durango, E., & Oquendo, J. (2016). CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE BIOCMBUSTIBLES SÓLIDOS ELABORADOS A PARTIR DE BIOMASA AGROINDUSTRIAL Y CARBÓN MINERAL DEL DEPARTAMENTO DE CORDOBA [Universidad de córdoba]. In *Universidad de Córdoba*.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- European Biomass Association. (2015). EN plus Manual de certificación de calidad para pellets de madera. *European Pellet Council (EPC) c/O*, 3, 10. <https://enplus-pellets.eu/es/component/attachments/?task=download&id=162:ENplus-Manual-Espaa-vs-3>
- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1983). Capítulo 11: BRIQUETAS DE CARBON VEGETAL. In *Metodos simples para fabricar carbón vegetal*. (p. 197). <http://www.fao.org/3/X5328S/X5328S12.htm>
- Fernández-Puratich, H., Oliver Vicente, J., Valiente, M., Verdú, S., & Albert, N. (2014). Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. *Madera y Bosques*, 20(3), 97–111.  
<https://doi.org/10.21829/myb.2014.203155>
- Forero-Nuñez, C. A. . b, Jochum, J. . d, Vargas, & F.E.Sierra. (2015). Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets [Efecto del tamaño de partícula y la adición de cáscara de cacao en las propiedades de los pellets de aserrín y carbón]. *Ingeniería e Investigación*, 35(1), 17–23.

- <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84929393184&partnerID=40&md5=d6aa814e511af0ceb2ab2ec288093139>
- Francisco-Marcos, M. (1995). Pélets y briquetas. *Revista AITIM* 171, 54–62. [https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo\\_2293\\_9990.pdf](https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf)
- Gaitán-Álvarez, J., & Moya, R. (2016). Características y propiedades de pellets de biomasa torrefaccionada de Gmelina arborea y Dipterix panamensis a diferentes tiempos. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 22(3), 325–337. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.09.044>
- García-Escalona, L. V., Benítez-Díaz, P. R., Valero, S. W., & Gutiérrez-Gotera, I. (2018). Elaboración de Briquetas a Partir de Residuos de Aserrín Aglutinados con Almidón de Maíz y su Posible Aplicación como Aislante Térmico. *Revista Ingeniería*, 29(1), 22–40. <https://doi.org/10.15517/ri.v29i1.33090>
- Garzón, G. (2018). Evaluación del proceso de pirolisis de material lignoceluloso proveniente del eucalipto en atmosfera de dióxido de carbono. *Instname:Universidad Libre*, 80. <https://repository.unilivre.edu.co/handle/10901/11026>
- Guzmán, H., & Pastrana, J. (2016). ELABORACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS A PARTIR DE LA MEZCLA DE DOS BIOMASAS RESIDUALES, UN AGLOMERANTE A BASE DE YUCA Y CARBÓN MINERAL, PROPIOS DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA [Universidad de Córdoba]. In *FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA* (Vol. 9, Issue 2). <https://doi.org/10.5151/cidi2017-060>
- Hector, P., Marina, C., Graziela, B., Carlos, R., Angélica, O., Daniel, P., & Thiago, P. (2019). Pelletization of eucalyptus wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production. *Renewable Energy*, 149, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.015>
- Hernandez, E. (2011). ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA OFICINA REGIONAL PARA AMERICA LATINA Y EL CARIBE – RLC “ Estado del Arte y Novedades de la Bioenergía en el Colombia .” *Organización De Las Naciones Unidas Para La Alimentación Y La Agricultura* ., 1–33. <http://www.fao.org/docrep/019/as419s/as419s.pdf>
- Kaliyan, N., & Vance Morey, R. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
- Kusch-Brandt. (2019). Urban Renewable Energy on the Upswing: A Spotlight on Renewable Energy in Cities in REN21’s “Renewables 2019 Global Status Report.” In *Resources* (Vol. 8, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/resources8030139>
- LÓPEZ, A., DARWIN, S., & HERNANDEZ, E. (2015). *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*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.
- Mendoza Fandiño, J. M., González Doria, Y. E., Doria Oviedo, M., Pedroza Urueta, Á., & Ruiz Garcés, A. F. (2020). Fabricación de biocombustibles sólidos densificados (briquetas) a base de serrín de acacia y estiércol de bovinos en el departamento de Córdoba. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 28(3), 448–460. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052020000300448>
- Reggie, B. (n.d.). La historia de las briquetas de hierba. *BHS Energy LLC*, 1–2.
- REN21. (2020). *Global Overview*. Global Status Reports. [https://www.ren21.net/gsr-2020/chapters/chapter\\_01/chapter\\_01/](https://www.ren21.net/gsr-2020/chapters/chapter_01/chapter_01/)
- Rincón, S., & González, Y. (2014). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA FABRICACIÓN DE PELLETS A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO

- PROVENIENTE DE PALMA DE ACEITE [Universidad Libre]. In *FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL* (Vol. 85, Issue 1). <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2013.06.007>
- Ríos, I., Santos, J., & Gutiérrez, C. (2017). Biocombustibles sólidos : una solución al calentamiento global. *Revista Ciencia*, 68(4), i1–i7. <http://revistaciencia.amc.edu.mx/online/BiocombustiblesSolidos.pdf>
- Rodrigues, M. (2012). *WOODY BIOMASS FOR THE ENERGY SECTOR IN BRAZIL*. <https://slideplayer.com/slide/2812532/>
- Rodriguez, W. D. M., Evangelista, A. W., Sette, C. R., Júnior, J. A., & da Silva, M. F. (2017). Producción de briquetas con residuos de cáscara de piñón manso (*Jatropha curcas*) y bagazo de caña de azúcar. *Bosque*, 38(3), 527–533. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000300010>
- Sánchez, M. (2015). Evolución de los biocombustibles en Colombia y su incidencia sobre el precio de los alimentos [Universidad Nacional de Colombia]. In *Universidad Nacional de Colombia Facultad*. <http://www.bdigital.unal.edu.co/52262/1/52787408.2016.pdf>
- Schallenberg, J. C., Gonzalo, R., Izquierdo, P., Hernández Rodríguez, C., Unamunzaga, P., Ramón, F., Déniz, G., Díaz, M., Delia, T., Pérez, C., Martel Rodríguez, G., Paredilla, J., Vicente, F., & Ortin, S. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Instituto tecnico de canarias.
- SENER. (2017). Reporte de Inteligencia Tecnológica “Biocombustibles Gaseosos.” *Mapas de Ruta Tecnológica Para Los Centros Mexicanos de Innovación En Energía*, 198. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/306072/Inteligencia\\_Tecnologica\\_BCS\\_220218.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/306072/Inteligencia_Tecnologica_BCS_220218.pdf)
- Vargas Lazo, M. A. (2018). Estudio de la producción de pellets a partir de borra de café [Universidad Nacional de Colombia]. In *Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería Química*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68833>
- World Energy Resources council conseil. (2013). World Energy Resources. *5th Asia-Pacific Conference on Combustion, ASPACC 2005: Celebrating Prof. Bob Bilger's 70th Birthday*, 468.