

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

Caracterización físico-químicas y mecánicas de pellets producidos a partir de Bagazo de Maíz, (*Zea mays L.*) Residuos Madereros (*Eucalyptus globulus L;* *Pinus patula S.C.*) y Material Vegetal de Plantas de *Pennisetum purpureum M.M.* Para la generación de energía térmica.

Angélica María Ruiz Ortiz.

Trabajo de grado para optar el título de ingeniería forestal.

Director.

Julián Mauricio Niño Botero.

PhD.

Universidad industrial de Santander.

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED.

Programa de Ingeniería Forestal.

Málaga.

2022.

Agradecimientos

Agradezco a mi madre e hija por ser la compañía y el apoyo incondicional durante toda mi carrera.

Agradezco a mi padre por enseñarme cosas de gran importancia para el camino.

Agradezco a mis hermanas y hermano por el amor y apoyo constante en todo nuestro diario vivir.

Agradezco a mi director de tesis, junto con sus allegados de trabajo por la constancia a lo largo de este trabajo.

Agradezco a mis compañeros, y amigos por alegrar y apoyar este proceso educativo.

Agradezco a las carpinterías, al sector campesino y a todos aquellos que aportaron su voluntad y conocimiento para llevar acabo la finalización de este proyecto.

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
TÉRMICA.

Angélica María Ruíz Ortiz



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE ANGELICA MARIA RUIZ ORTIZ		CÓDIGO 2165206
TÍTULO DEL PROYECTO CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICAS Y MECÁNICAS DE PELLETS PRODUCIDOS A PARTIR DE BAGAZO DE MAÍZ, RESIDUOS MADEREROS (<i>Eucalyptus globulus</i> ; <i>Pinus patula</i>) Y MATERIAL VEGETAL DE PLANTAS DE <i>Pennisetum purpureum</i> M.M. PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA		
REGISTRO N° 25230	FACULTAD INSTITUTO DE PROYECCIÓN REGIONAL Y EDUCACIÓN A DISTANCIA	CARRERA INGENIERIA FORESTAL
CALIFICACIÓN (letra y número) CUATRO.DOS (4.2)		CRÉDITOS 7

DIRECTOR DEL PROYECTO

NOMBRE JULIAN MAURICIO BOTERO LONDOÑO	FIRMA
---	------------------

CALIFICADORES

		FECHA <table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>M</td> <td>D</td> </tr> <tr> <td>2022</td> <td>03</td> <td>10</td> </tr> </table>	A	M	D	2022	03	10
A	M		D					
2022	03	10						
N RONALD ALFONSO MONTAÑEZ VALENCIA	N HERWIN RAMIRO ROA CAICEDO							

Original: Oficina de Admisiones y Contabilidad Académica
Copias: Coordinación de Carrera

Tabla de contenido

1. PLANTEAMIENTO

DEL PROBLEMA.....11

1.1 Descripción del problema.....11

1.2 Justificación.....13

1.3 Delimitación.....14

1.3.1 Residuos madereros de *Eucalyptus globulus L. & Pinus patula S. C.*...14

1.3.2 Material vegetal de *Pennisetum purpureum M.M.*.....14

1.3.3 Bagazo de maíz *Zea Mayz L.*.....14

1.4 Objetivos15

1.4.1 General.....15

1.4.2 Específicos.....15

2. MARCO REFERENCIAL.....15

2.1 Biomasa para los pellets15

2.2 Pellets.....19

2.2.1 Producción de pellets19

2.3 Transformación por torrefacción.....20

2.3.1 Afectación de las variables tiempo y temperatura en la composición física y química de la torrefacción.....21

2.3.2 El cloro y otros elementos químicos en el proceso de torrefacción...22

2.3.3	La humedad, el contenido de energía y las cenizas, factores claves en el proceso de torrefacción.....	23
2.3.3.1	Humedad.....	23
2.3.3.2	Contenido de Energía	23
2.3.3.3	Cenizas.....	24
2.4	Propiedades generales físicas, químicas y mecánicas de los pellets.....	24
2.4.1	Parámetros de calidad físicos, químicos y mecánicos para evaluar los pellets.....	24
2.4.2	Porcentaje de humedad, glicerina y densidad de los pellets.....	26
2.4.3	Carbón, elementos y compuestos químicos.....	27
3.	METODOLOGÍA	28
3.1	Área de estudio.....	28
3.1.1	Residuos madereros.....	28
3.1.2	Material vegetal de <i>Pennisetum purpureum M.M.</i>	29
3.1.3	Bagazo de maíz <i>Zea mays L.</i>	29
3.2	Caracterización de la materia prima.....	29
3.2.1	Análisis elemental	29
3.2.2	Contenido de fibra.....	29
3.2.3	Potencial energético.....	30
3.3	Diseño experimental	30
3.4	Preparación del material.....	30
3.5	Proceso de prensado o pelletización	31
3.6	Caracterización de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los pellets	

3.6.1	Densidad.....	32
3.6.2	Contenido de humedad.....	32
3.6.3	Resistencia al impacto % durabilidad.....	33
3.6.4	Esfuerzo de compresión.....	33
3.6.5	Material volátil	33
3.6.6	Cenizas.....	34
3.6.7	Resistencia ala agua	34
3.7	Proceso de quemado	34
3.7.1	Método tradicional	35
3.7.2	Torrefacción.....	35
4.	RESULTADOS	36
4.1	Área de estudio.....	36
4.2	Caracterización de la materia prima.....	38
4.2.1	Análisis elemental	38
4.2.1.1	Análisis elemental a partir de parámetros madereros.....	39
4.2.1.2	Análisis elemental a partir de parámetros no madereros.....	39
4.2.1.3	Análisis de carbón y compuestos químicos.....	40
4.2.2	Análisis y Contenido de fibra.....	41
4.2.3	Análisis de potencial energético. (PCL).....	42
4.3	Resultados molienda y tamizado de las muestras.....	43
4.3.1	Material de <i>Eucalyptus globulus L.</i> y <i>Pinus patula S.C.</i>	43
4.3.2	Material <i>Pennisetum Purpureum M.M</i> 90 y 120 días.....	44
4.3.3	Material de Bagazo de Maíz <i>Zea mayz L.</i>	48

4.4 Resultados y análisis de las propiedades físico químicas y mecánicas de las 5 biomasas.....	48
4.4.1 Densidades al momento del peletizado (Mi) y después de secado al aire libre por 72 hrs. (Mf).....	48
4.5 Análisis y resultados de Humedad para los diferentes tipos de biomasa.....	59
4.6 Porcentaje de durabilidad de los pellets de las 5 biomasas.....	62
4.7 Esfuerzo de compresión	63
4.8 Material volátil análisis y resultados.....	64
4.9 Análisis y resultados de %Cenizas.....	66
4.10 Análisis y resistencia a la humedad.....	67
4.11 Análisis y resultados de procesos de calcinación.....	69
4.11.1 Calcinación en estufa convencional.....	69
4.11.2 Calcinación por torrefacción.....	71
5. CONCLUSIONES	72
6. RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRAFIA	74

Tabla de graficas

Grafica 1. Análisis elemental de las 5 biomosas; Ruiz A. 2022.....	40
Grafica 2. Reducción de densidades del Mi y Mf de la biomasa de <i>Eucalyptus globulus L.</i> ; Angélica R. 2022.....	50
Grafica 3. Reducción de densidades de Mí y Mf de la biomasa de <i>Pinus patula S.C.</i> ; Angélica R. 2022.....	52
Grafico 4. Reducción de densidades del Mi y el mf de la biomasa de Bagazo de <i>Maiz Zea mayz L.</i> ; Angélica R. 2022.....	54
Grafica 5. Reducción de densidades de Mi y el Mf de la biomasa <i>Pennisetum purpureum.MM</i> 90 días; Angélica R. 2022.....	55
Grafica 6. Reducción de densidades del Mi y Mf en la biomasa de <i>Pennisetum purpureum M.M.</i> de 120 días; Angélica R. 2022.....	57
Grafica 7. Densidades promedio de las 5 Biomasa en Mi y Mf; Angélica R. 2022.....	58
Grafica 8. Porcentajes de Humedad en función del tiempo de las 5 biomosas; Angélica R. 2022.....	61
Grafica 9. % Durabilidad en las 5 biomosas; Angélica R. 2022.....	62

Grafica 10. Volúmenes Vs Fuerza de compresión de los 5 tipos de biomosas. Angélica R. 2022.....	63
Grafica 11. % de material volátil de las 5 biomosas; Angélica R. 2022.....	65
Graficas 12. Porcentajes de cenizas de las 5 Biomosas; Angélica R. 2022.....	67.
Grafica 13. Peso absorbido Vs Distancia de sumersión Vs tiempo de sumersión de Los Pellets de las 5 biomosas; Angélica R. 2022.....	68
Grafica 14. Tiempo de calcinación en estufa convencional Vs Masa de los pellets de las 5 biomosas; Angélica R. 2022.....	70

Tablas de contenido

Tabla 1. Tipos de biomasa (Callejas & Quesada, 2009).....	16
Tabla 2. Parámetros de calidad físicos y químicos para pellets originados de biombras maderables; DIN EN 14961-2. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020).....	25
Tabla 3. Parámetros de calidad físicos y químicos, para pellets originados de biombras no maderables; DIN EN 14961-2. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020).....	26
Tabla 4. Análisis elemental de las 5 Biombras; Laboratorio de conversión ganadera, 2022.....	38
Tabla 5. Categorías para pellets de procedencia maderera según la norma DIN EN 14961-2; Ruiz A. 2022.....	39
Tabla 6. Categorías para pellets de procedencia no maderera según la norma DIN EN 14961-2; Ruiz A. 2022.....	40
Tabla 7. Análisis y Contenido de Fibras de las 5 biombras; Laboratorio de Reconversión ganadera y Agroforestal; 2022.....	41
Tabla 8. Potencial energético o potencial calorífico de las 5 Biombras.....	42
Tabla 9. Relación tallo hoja Biombrs <i>Pennisetum purpureum M.M</i> 120 días Ruiz A. (2022).....	44
Tabla 10. Relación tallo hoja de <i>Pennisetum purpureum M.M</i> 90 días Ruiz A. (2022).....	46

Tabla 11. Densidades al momento de peletizado e la biomasa *Eucalyptus globulus L*; Angélica R. 2022.....48

Tabla 12. Densidades de *Eucalyptus globulus L*. después de 72 hrs en secado natural: Angélica R. 2022.....49

Tabla 13. Densidades al momento del peletizado de *Pinus patula S.C.*; Angélica R. 2022.....50

Tabla 14 Densidades después 72 hrs de secado natural *Pinus patula S.C*; Angélica R. 2022.....51

Tabla 15. Densidades al momento del peletizado de la biomasa Bagazo de Maiz *Zea mayz L*; Angélica R. 2022.....52

Tabla 16. Densidades después de 72 hrs de secado natural de la biomasa Bagazo de Maiz *Zea mayz L*. Angélica R. 2022.....53

Tabla 17. Densidades al momento del peletizado de la biomasa *Pennisetum purpureum M.M* 90 días; Angélica R. 2022.....54

Tabla 18. Densidades después de 72 hrs de secado natural de la biomasa de *Pennisetum purpureum M.M* 90 días; Angélica R.2022.....55

Tabla 19. Densidades de la biomasa de *Pennisetum purpureum M.M* 120 al momento de la peletizacion; Angélica R. 2022.....56

Tabla 20. Densidades después de 72 hrs de la Biomasa *Pennisetum purpureum M.M* 120 días; Angélica R.2022.....57

Tabla 21. Densidades de las 5 biomosas en el Mí y Mf; Angélica R. 2022.....	58
Tabla 22. Humedades de las 5 biomasa a los 10 min; 30 min y 2h en horno; Angélica R. 2022.....	59
Tabla 23. Humedad a las 24 hrs de los 5 diferentes tipos de biomasa Angélica R. 2022.....	59
Tabla 24. Promedios de las humedades 10min, 30mim, 2h, 24h, de las 5 Biomosas; Angélica R. 2022.....	60
Tabla 25. Porcentajes de durabilidad de los 5 tipos de biomosas; Angélica R. 2022.....	62
TABLA 26. Esfuerzo de compresión diferentes tipos de biomosas; Angélica R. 2022.....	63
Tabla 27 Porcentaje de material volátil de las 5 especies de biomasa; Angélica R. 2022.....	64
Tabla 28 Promedio de cenizas de las 5 biomosas; Angélica R. 2022.....	66
Tabla 29 Variables para hallar la resistencia a la húmeda de las 5 biomosas; Angélica R. 2022.....	68
Tabla 30 Tiempo de calcinación de las 5 biomosas en estufa convencional.....	69
Tabla 31. Temperaturas y Calcinación de las 5 Biomosas por torrefacción. Angélica R. 2022.....	71

Tabla de ilustraciones

- Ilustración 1 Fuentes de Biomasa Residual Hernández, C. A. S., Antonio, C. G., Trejo, J. F. G., & Pérez, A. A. F. (2020).....16
- Ilustración 2 Diagrama de producción de pellets. Tomado de Uslu et al. (2008)....19
- Figura 1 Fases de la metodología desarrollada. Ruiz A; 2022.....28
- Ilustración 3. Molino industrial; tomado por Ruiz, A (2022).....31
- Ilustración 4. Tamices número 16 y 50; Tomado de Rincón, S., & González, A. (2014).....31
- Ilustración 5. Peletizadora; tomada de Rincón, S., & González, A. (2014).....31
- Ilustración 6. MAPA UBICACIÓN DE LAS BIOMASAS DE *Eucalyptus globulus L.*, *Pinus patula S.C.*, *Bagazo de maíz Zea mayz L.*, *Pennisetum purpureum M.M.* 120 días y *Pennisetum purpureum M.M.* 90 días EN LA CIUDAD DE MÁLAGA SANTANDER. R. Angélica 2022..... 36
- Ilustración 7. Biomosas de *Pinus patula S.C* y *Eucalyptus globulus L.* tamizadas. Ruiz A; 2022.....44

RESUMEN

Título: Caracterización físico-químicas y mecánicas de pellets producidos a partir de Bagazo de Maíz *Zea mays L.*, Residuos Madereros (*Eucalyptus globulus L.*; *Pinus patula S.C.*) y Material Vegetal de Plantas de *Pennisetum purpureum M.M.* Para la generación de energía térmica.

Autor: Angélica María Ruíz Ortiz

Palabras claves: Biomosas, propiedades físicas- químicas-mecánicas, energía térmica.

Descripción:

Las investigaciones de energías renovables a partir de biomosas residuales son pioneras en casi todos los países del mundo, la necesidad de adquirir energía en nuestro diario vivir, el acelerado aumento del calentamiento global, el incremento del precio de los combustibles fósiles y la escases de adquisición de estos, son factores que influyen en la aplicación de nuevas formas de abastecimiento energético. Dentro de las energías renovables, como la eólica y demás, se encuentra la de biomosas residuales, esta se encuentra postuladas como la tercera a nivel de energías eléctricas y primera en energías térmicas. Por ello el propósito de esta investigación es la caracterización físico-química y mecánica de pellets producidos a partir de Bagazo de Maíz *Zea mays L.*, Residuos Madereros (*Eucalyptus globulus L.* & *Pinus patula S.C.*) y Material Vegetal de Plantas de *Pennisetum purpureum M.M.* Para la generación de energía térmica.

El proceso metodológico utilizado para caracterizar las propiedades físico- químicas y mecánicas de las biomosas transformadas de un elemento llamado pellets, se basa en las variables de densidad, humedad, análisis elemental, potencial energético, resistencia al

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

impacto, esfuerzo de compresión, material volátil, cenizas, resistencia a la humedad y procesos de quemado por métodos convencionales y proceso de torrefacción.

Se encontrara a lo largo de la investigación que la biomasa natural de *Eucalyptus Globulus L* es pionera y se acopla a casi todas las normas DIN EN 14961-2, convirtiéndose así en una biomasa transformada en lo que se conoce como pellets categorizada como tipo A1, las demás biomásas cumplen con casi con todos los rangos estipulados en las normas, pero poseen algunas falencias mínimas que pueden haberse derivado de factores bióticos, o maquinaria.

ABSTRACT

Title: Physico-chemical and mechanical characterization of pellets produced from Corn Bagasse, Wood Residues (*Eucalyptus globulus*; *Pinus patula*) and Plant Material of *Pennisetum purpureum* M.M. For the generation of thermal energy.

Author: Angélica María Ruíz Ortiz

Keywords: Biomasses, physical-chemical-mechanical properties, thermal energy.

Description:

Renewable energy research from residual biomass is pioneering in almost every country in the world, the need to acquire energy in our daily lives, the accelerated increase in global warming, the increase in the price of fossil fuels and the scarcity of acquisition of these, are factors that influence the application of new forms of energy supply. Within

renewable energies, such as wind power and others, is that of residual biomass, this is postulated as the third at the level of electrical energy and first in thermal energy. Therefore, the purpose of this research is the physical characterization.-chemistry and mechanics of pellets produced from Corn Bagasse *Zea mayz L*, Wood Residues (*Eucalyptus globulus L*; *Pinus patula S.C*) and Plant Material from *Pennisetum purpureum M.M*. For the generation of thermal energy.

The methodological process used to characterize the physical-chemical and mechanical properties of biomass transformed into an element called pellets is based on the variables of density, humidity, elemental analysis, energy potential, impact resistance, compressive stress, volatile material, ash, resistance to humidity and burning processes by conventional methods and torrefaction process.

It will be found throughout the investigation that the natural biomass of *Eucalyptus Globulus L* is a pioneer and is coupled to almost all DIN EN 14961-2 standards, thus becoming a biomass transformed into what is known as pellets categorice as tope A1, the otear biogases compló bit almost all the franges stipulated in the standards, but have some minimal shortcomings that may have been derived from biotic factors, or machinery.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema

A nivel mundial las pequeñas, medianas y grandes industrias, suplen sus necesidades de energía térmica con la implementación de la combustión del carbón y los residuos fósiles. Restrepo Villada, C. E., & Pimiento Ramírez, J. A. (2018) (1). Colombia no es la excepción y por pertenecer a un país tercermundista, la mayoría de la economía se ve plasmada en el arduo trabajo de medianas y pequeñas industrias, que se basan en la venta y compra de este mineral, contribuyendo a que la demanda de este producto sea sumamente alta. García Naranjo, G. (2018) (2).

Según Bayona Velásquez, E. M. (2016) (3), la tasa de demanda del carbón térmico crece linealmente con la elevada tasa de natalidad de la sociedad, es decir se establece una relación directamente proporcional entre estas dos variables, a mayor población, mayor consumo de energía térmica, mayor combustión del material y como resultado mayores niveles de contaminación y deterioro del paisaje natural.

En el departamento de Santander y más específicamente en la provincia de García Rovira, una de las principales economías se ve ligada a la compra y venta del carbón. Allí se encuentran numerosas microempresas que se dedican a la elaboración de elementos de construcción (ladrillos y cal) y fertilizantes agroindustriales (cal), ambos procesos adoptan la combustión del carbón, para lograr transformarse. Como estas microempresas, existen múltiples disciplinas que emplean exorbitantes cantidades del mineral, aumentando al límite los niveles de contaminación atmosférica en el departamento.

Por otra parte, en esta provincia la venta del carbón térmico proviene de las minas que se han construido con el fin de provisionar el pedido que hacen las industrias, para obtener este producto elaborado, el paisaje natural o la cobertura natural de la zona minera desaparece, intensificando la contaminación atmosférica y reduciendo la calidad del paisaje. Salazar Yépez, M. A., & Chávez López, A. M. (2018) (4).

El hombre ha tenido que usar lo que se encuentra al alcance de sus manos para lograr proveer las demandas de los productos originados por la combustión del carbón térmico. Al ser tan reducidas las opciones de variedades de energías térmicas. Según Kana Livandro (2019) (5), los estudios para generar nuevas energías renovables, son primordiales y pioneros en todos los países, con el fin de contrarrestar el impacto tan fuerte que se ha generado. Por ello este estudio tiene como objetivo evaluar las propiedades físico-químicas de pellets producidos a partir de Bagazo de Maíz, Residuos Madereros y Material Vegetal de Plantas de *Pennisetum purpureum M.M.* Para la generación de energía térmica.

El elemento que se ha venido impulsando e implementado, corresponde a los pellets, un producto que reúne los requisitos necesarios para declararse como una energía renovable, es natural, su fuente de abastecimiento es casi inagotable, y produce energía que no contamina. Aguilar Sierra, J. M., & Tulcán Álvarez, E. A. (2018) (6). Afirma que los pellets se pueden crear de diversas materias primas, y a futuro lograran suplementar el carbón, y por causa efecto, la salud del planeta cambiara positivamente.

En la provincia de García Rovira, la mayoría de los campesinos abastecen sus necesidades económicas con siembra del maíz, al culminar la etapa de producción, siembra y cosecha de este maíz *Zea mayz L.*, se generan una gran cantidad de residuos sin un uso final, que se denominan como el bagazo. Otra de las economías base muy representativas de

esta región, permanece en las microempresas de carpinterías, las cuales generan residuos denominados aserrín y viruta, generados a lo largo de los procesos de manipulación de madera, estos logran tener un uso final, como lo es la elaboración de compost y los pisos para galpones. Estos residuos aún no se han patentado y valorizado por ello es una opción viable para dar un valor agregado al residuo, Adicionalmente se trabajará con *Pennisetum purpureum M.M*, la cual es una gramínea de alta plasticidad ecológica y producción de biomasa que se encuentra ampliamente distribuida en la región.

Las energías renovables son entonces una alternativa para la reducción de la contaminación ambiental, por ello nace la necesidad de potencializar los estudios para la producción de opciones como los pellets. Bertoglio, C., Figueira, A., Morris, J., & Lafflito, C. (2020) (7).

1.2. Justificación

La contaminación atmosférica, los daños a la salud, las lluvias acidas, el efecto invernadero, son algunas reacciones de la implementación y el uso exorbitante del carbón. Los residuos fósiles, en especial su derivado, el carbón, son la primordial forma de abastecimiento de energía para la humanidad hace millones de años, se utiliza por ser relativamente económica y por qué su ubicación, es extensamente amplia. Iriarte, T. I. P. (2014) (8).

Las diferentes industrias placen sus necesidades energéticas basándose en la combustión del carbón, que en efectos de transformación de mineral a energía se liberan altos niveles de CO₂, que no solo contribuyen a la contaminación atmosférica, sino que ahora estos niveles alarmantes son nocivos para la salud, adicionándole que esta transformación se viene

acumulando desde la ambigüedad. Oviedo Doria, H. R., De Avila, C. E., & Sierra Hernández, J. D. (2019) (9).

Las emisiones del carbón no son los únicos contaminantes que se generan, la explotación para adquisición, el transporte y el almacenamiento de esta materia prima, causan un fuerte impacto ambiental negativo. Los esfuerzos a nivel mundial de iniciativas tratando de disminuir los impactos ambientales negativos y el cambio climático, han sido múltiples, pero aún no son lo suficientes para revertir el problema, con ello la búsqueda de soluciones a dichos problemas en el diario vivir es un reto. Iriarte, T. I. P. (2014) (8).

Hoy en día una de las grandes soluciones para solventar este problema mundial es la implementación de las energías renovables, que tienen como objetivo crear energías sin tener la necesidad de usar el carbón, energías que se consuman totalmente. Del carbón solo el 35% se consume en energía y el restante se convierte en residuos (ceniza y humo). Cardoso, A. (2016) (10).

Las energías renovables provienen de un sin número de orígenes naturales (aire, agua, biomasa), se caracteriza, por no utilizar residuos fósiles, ser limpias y disponer de inagotable fuente de abastecimiento. Correa Álvarez, P. F., González, D., & Pacheco Alemán, J. G. (2016) (11). Una de esas energías se ve plasmada en los biocombustibles conocidos pellets y briquetas, los cilindros formados a presión, aglomerados y comprimidos que para el año 2025 se dicen que sustituirán al carbón. Polo Vanegas, A. J. (2019) (12).

Los pellets y briquetas son innovadores porque se producen a partir de innumerables residuos orgánicos que en el pasado no tenían ningún propósito final de producción, lo que los hace únicos, adicionalmente por carecer de químicos y ser 100% naturales, sus niveles de

contaminación atmosférica y ambiental son mínimos. Polo Vanegas, A. J. (2019) (12). La carencia de información sobre las fuentes de abastecimiento (material orgánico) para la creación de estos pellets y briquetas, han conllevado a el desarrollo de numerosos estudios con relación a las variables que proveen calidad y durabilidad en este nuevo material. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13).

Por lo tanto, se hace necesaria la evaluación de algunas de estas fuentes de abastecimiento como los son el bagazo del maíz *Zea mayz L.*, los residuos madereros de *Eucalyptus globulus L.* & *Pinus patula S.C.* (aserrín y virutas) y el material vegetal de *Pennisetum purpureum M.M.*

1.3 Delimitación

1.3.1 Residuos madereros de *Eucalyptus globulus L* & *Pinus patula S.C.*:

La biomasa se obtuvo en el municipio de Málaga Santander, en el cual se cuenta con una gran variedad de carpinterías, de las cuales se escogerán 2 (Maderas Mafracol CI 29 10-22 y Sidemex CARRERA 10 12 46 coordenadas respectivamente 6° 41' 55" N; 72° 43' 49" W y 6° 42' 44"; 72° 44' 01" W), en las cuales se recogerán semanalmente los residuos de aserrín y viruta.

1.3.2 Material vegetal de *Pennisetum purpureum M.M.*:

Este material fue tomado de plantas previamente establecidas por estudiantes de la carrera de zootecnia, estas plantas se encontraban en un lote de 100m² ubicado en la parte trasera de las instalaciones de la sede de la Uis Málaga, predios pertenecientes a la Universidad Industrial de Santander sede Málaga, con coordenadas : 6° 42' 39 "N; 72° 43' 35" W.

1.3.3 Bagazo de maíz *Zea mays L.*:

Este material se tomó de la finca denominada Ojo de Agua en la vereda de Calichal del municipio de Málaga Santander. 6° 43' 34" N; 72° 43'30" W

4. Objetivos

1.4.1 General

Evaluar las propiedades físico-químicas y mecánicas, de pellets producidos a partir de Bagazo de Maíz *Zea mayz L*, Residuos Madereros de *Eucalyptus globulus L* & *Pinus patula S.C* y Material Vegetal de Plantas de *Pennisetum purpureum M.M* para la generación de energía térmica.

1.4.2 Específicos

- Cuantificar la composición elemental, contenido de humedad y poder calorífico del Bagazo de Maíz *Zea mayz L*, Residuos Madereros de *Eucalyptus globulus L* & *Pinus patula S.C* y Material Vegetal de Plantas de *Pennisetum purpureum M.M*
- Implementar procesos de torrefacción en pellets de Bagazo de Maíz *Zea mayz L*, Residuos Maderero de *Eucalyptus globulus L* & *Pinus patula S.C* y Vegetal de Plantas de *Pennisetum purpureum M.M*
- Determinar la composición elemental, contenidos en fibras, contenido de humedad, poder calorífico y tiempo de combustión de los pellets de Bagazo de Maíz *Zea mayz L*, Residuos Maderero de *Eucalyptus globulus L* & *Pinus patula S.C* y Vegetal de Plantas de *Pennisetum purpureum M.M*

2. Marco referencial

2.1 Biomasa para los pellets La biomasa es la única fuente de energía renovable que puede ser transformada en combustibles gaseosos, sólidos o líquidos, mediante procesos de conversión biológicos, fisicoquímicos y térmicos. Cuando se aplican los procesos de conversión se adquieren productos con densidades altas y un valor energético mayor, transformando la biomasa en recursos energéticos secundarios aprovechables en forma de biocombustibles; a partir de los cuales se puede producir energía en forma de calor, electricidad o fuerza motriz. A su vez, los biocombustibles ayudan a controlar problemas de contaminación al ambiente, así como problemas de almacenamiento; aportando un beneficio al reducir los costos de energías fósiles, electricidad y disposición de residuos (McKendry, 2002) (14).

La biomasa no es más que materia orgánica que se puede transformar en energía. Por lo anterior ya mencionado, se deduce entonces que esta biomasa se puede obtener a partir de actividades tanto de producción como del hogar o domésticas, donde se abarca los residuos agroindustriales, agrícolas, orgánicos urbanos, animales y forestales. Hernández, C. A. S et al. (2020) (15). (Ver Ilustración 1).

Ilustración 1 Fuentes de Biomasa Residual



Hernández, C. A. S., Antonio, C. G., Trejo, J. F. G., & Pérez, A. A. F. (2020).

La biomasa se puede clasificar de acuerdo con el contenido listado en la Tabla 1, que muestra diferentes tipos de biomasa. A grandes rasgos, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que se haya originado recientemente a partir del proceso biológico de un organismo vivo. Callejas y Quesada (2009) (16); Badran (2019) (17).

Tabla 1. Tipos de biomasa

Tipos de biomasa	Características
Biomasa Residual	<p>Producida en actividades humanas usando sustancias</p> <p>Orgánicas. En muchos casos, eliminarlo es un problema.</p> <p>Las ventajas de esta biomasa son:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Disminuye el espacio de los vertederos.

	<ul style="list-style-type: none">-Disminuye la contaminación y el riesgo de incendios.-Genera trabajo.-Contribuye al desarrollo de las zonas rurales.-Mitiga emisiones de CO₂.- Los costos de transporte y producción son reducidos.
Biomasa Natural	<p>Ocurre en ecosistemas naturales. El desarrollo intensivo de este recurso es incompatible con la protección del medio ambiente, aunque es una de las principales fuentes de energía en los países subdesarrollados. La producción de biomasa natural no se ve intervenida antropicamente. Básicamente son residuos forestales como:</p> <ul style="list-style-type: none">-Coníferas-Fronosas-Leñas y ramas-Residuos de la limpieza de los bosques y restos de plantaciones.

Biomasa Térmica	<p>Este tipo de biomasa se utiliza para proporcionar calefacción, producir agua caliente sanitaria y / o productos industriales.</p> <p>En las aplicaciones de energía térmica, los tipos de biomasa más comunes provienen de la industria agrícola (semillas de aceituna y cascarilla de frutos secos), la industria forestal (astillas de madera, viruta) y de las actividades silviculturales y cultivos leñosos (poda,</p> <p>Leña). Estos materiales se pueden convertir en biocombustibles sólidos (pellets y briquetas),</p> <p>Que ya compactadas, se hace más fácil el transporte, manipulación y almacenamiento.</p>
Excedentes Agrícolas	<p>Todo residuo agrícola que no sea consumido por el ser humano, puede utilizarse con el fin de crear energía.</p> <p>La energía creada a partir de estos residuos ha tomado mala fama, puesto que los países tercermundistas afirman que los</p>

	<p>precios de los productos alimenticios agrícolas han aumentado. Se dice que ahora esta producción no solo zacea el hambre, sino que ahora también abastecen estas energías.</p> <p>Los excedentes agrícolas que no sean empleados en la Alimentación humana pueden ser utilizados con fines energéticos.</p> <p>El excedente agrícola se puede utilizar como combustible para centrales eléctricas o biocombustibles.</p>
Cultivos Energéticos	<p>Estos cultivos están dedicados a la producción de energía.</p> <p>Estos cultivos a diferencia de los agrícolas están adaptados alas grandes sequias, enfermedades, precocidad al crecimiento, suelos infértiles, mayores capacidades de rebrotes.</p> <p>Los cultivos enérgicos adoptan sistemas, para lograr crecer en armonía con cultivos tradicionales como los cereales, la caña de azúcar, semillas oleaginosas, y</p>

	cultivos no tan tradicionales como los son: pataca y sorgo dulce.
--	---

Tabla 1. Tipos de biomasa Callejas y Quesada (2009) (16)

2.2 Pellets

Los pellets son pequeños cilindros, originados a partir del proceso de compresión y aglomeración de diferentes biomásas.

2.2.1 Producción de pellets

Para lograr obtener un pellet, este debe someterse a cuatro procesos básicos e importantes: secado, molienda, densificación o peletización y enfriamiento. (Ver ilustración 2)

Ilustración 2 Diagrama de producción de pellets.

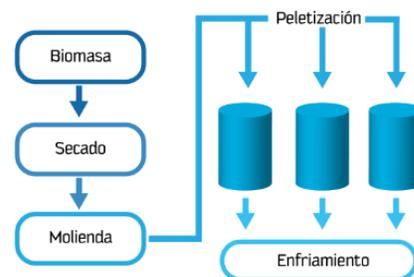


Ilustración 2 Diagrama de producción de pellets. Tomado de Uslu et al. (2008) (18).

Como primer paso, el proceso de secado busca tener el contenido de humedad óptimo de la biomasa para producir pellets con un contenido energético lo más cercano posible al pellet de madera (16,5 GJ / ton) Whittaker y Shield (2016) (19).

El contenido de humedad debe oscilar entre los rangos de 5 y 28%, si el material a transformar cumple con estas características, se procede a la molienda de la biomasa, con el propósito de obtener un granulo de tamaño mediano, puesto que, si el tamaño es muy grande, el proceso de densificado no es óptimo, y si el granulo es muy pequeño el consumo de energía aumentara significativamente. La textura varia de forma considerable, por ello se deben determinar para cada tipo de biomasa valores óptimos de humedad y tamaños de las partículas o gránulos. Pradhan et al. (2018) (20).

Una vez secada y triturada la biomasa, se puede compactar mediante un peletizador, que básicamente consiste en una serie de rodillos que comprimen la materia prima por medio de una matriz de acero perforada. Cuando la biomasa pasa a través del canal de prensa cilíndrico del molde perforado, se produce un sobrecalentamiento debido a la fricción entre el material de biomasa y la pared de la peletizadora. Debido a la presión aplicada por los rodillos y al calentamiento por fricción, se obtiene un cilindro de biomasa aglomerada (pellet). La importancia del enfriamiento es que las partículas producidas después del enfriamiento se endurecerán, lo que aumentará la fuerza y densidad de las partículas Mostafa et al. (2019) (21).

En la actualidad existen múltiples transformaciones de la biomasa para la creación de los pellets, se cuenta con dos rutas conocidas, la primera es la ruta termoquímica (licuefacción, combustión, gasificación y pirolisis) y la segunda es ruta denominada, ruta bioquímica (digestión y fermentación). Según Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13), la combinación de los procesos de secado, molienda, reducción granulométrica y densificación de los pellets, hacen que no exista un único método para transformar la biomasa en un biocombustible idóneo.

La fabricación, comercialización y combustión de los pellets, genera un impacto positivo al ambiente, debido a que las emisiones de CO₂ (principal causante del efecto invernadero) y otros gases como NO_x (Óxido de nitrógeno), CH₄ (Metano), y CO (Monóxido de carbono), disminuyen notoriamente. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13).

2.3 Transformación por torrefacción.

Uno de estos tratamientos, que combina los 4 pasos anteriormente ya nombrados, genere reducción de problemas de contaminación y mejore las características de los pellets se denomina la torrefacción; Se trata básicamente de una pirolisis parcial de biomasa en un entorno sin oxígeno. El proceso se realiza a una temperatura entre 200-300 ° C y en un corto tiempo de residencia, lo que genera la degradación de compuestos con menor energía y mayor hidrofilia que contiene la biomasa, por lo que se puede obtener un aumento en la densidad energética. (Nhuchhen et al., 2014) (22). Estos autores también afirman que el proceso de torrefacción se divide en las siguientes etapas, 1). Proceso en el que se retira el agua libre presente en la madera (secado); 2). Proceso en el que se liberación de agua de constitución encontrada en los enlaces y algunos hidrocarburos; 3). La torrefacción propiamente con la liberación de partes; 4). Enfriamiento del material compactado. (Nhuchhen et al., 2014) (22).

En la torrefacción los pellets pueden ser tratados de dos maneras: 1. Consiste en peletizar y luego someter el material a la torrefacción; 2. Someter el pellet primero a la torrefacción y luego al peletizado. Según (Ghiasi et al., 2014) (23) afirma en su estudio que la opción 1 es más factible, puesto que esta opción implica menores costos en la producción, y no requieren adecuación de vapor, lo que genera un proceso de peletización mas fácil. Si se escoge la primera opción los pellets deben tener una alta resistencia mecánica para soportar los procesos, ya que pueden desintegrarse o generar finos. (Ghiasi et al., 2014) (23).

2.3.1 Afectación de las variables tiempo y temperatura en la composición física y química de la torrefacción:

Durante el proceso de torrefacción, controlar el tiempo y la temperatura es de suma importancia, ya que buen control genera pellets torrefactados de una muy buena apariencia y calidad. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13). Según Zanuncio et al. (2014) (24), la torrefacción origina un primer efecto a medida que aumenta el tiempo y la temperatura del proceso, este efecto corresponde a el oscurecimiento cada vez más intenso, lo que no puede resultar atractivo para los ojos de los consumidores. Sin embargo, son más los pros que los contras en este proceso térmico, lo cual amplían las perspectivas de aplicación de este tratamiento.

El poder calorífico superior de los pellets (PCS), es un parámetro principal que se debe tener en cuenta en el momento de seleccionar la biomasa como energía, por consiguiente, el proceso de torrefacción puede incrementar significativamente el valor del PCS. Según Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13), el aumento de la temperatura se relaciona positivamente con el aumento del valor del PCS, las temperaturas de 250°C y 290°C son significativas en el proceso de torrefacción. Cuando se dice que hay una relación entre el aumento del PCS y el aumento de la temperatura es porque a muy altas temperaturas, la hemicelulosas se modificara o se eliminará, resultando en una mayor concentración de lignina en el pellet.

Igualmente, la relación positiva entre las variaciones de temperatura y el porcentaje de extractos se puede lograr explicar. Dado que se eliminan otros fragmentos degradados que

se pueden disolver y extraer con un disolvente, se puede utilizar no solo como extracto. Afirma Zanuncio et al (2014) (24), que cuando la hemicelulosas se degrada, es posible formar productos de acetona solubles, lo que resulta en un mayor contenido de extracto total del material.

Por otra parte, a medida que aumentaba la temperatura de torrefacción, se observaba una mayor pérdida de masa y un menor rendimiento energético. La degradación térmica de los componentes químicos de la biomasa (especialmente fracciones de celulosa y hemicelulosas), que se da por las altas temperaturas, la suma de ambas energías genera el aumento de la pérdida de masa. En el estudio de Shang et al (2012) (25), la descomposición térmica de la hemicelulosas durante el proceso de torrefacción ocurre entre los 200- 300°C, a temperaturas de 270°C la celulosa es la que comienza a degradarse, y ya en los 300°C la degradación se da en la lignina. Las hemicelulosas son menos resistentes al calor debido a su estructura y ramificación porque se eliminan fácilmente de la cadena principal y se degradan en compuestos volátiles (Yang et al., 2007) (26) Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13).

Al hornear a temperaturas aproximadas a los 300°C, el aumento de la lignina se da linealmente, porque se elimina la hemicelulosas, lo que incide que el poder calorífico aumente también. Nhuchhen et al. (2014) (22). Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13). En acuerdo con el autor anterior, los pellets torrefactados a temperaturas que oscilan entre los 290°C, presentaron las mejores características energéticas.

2.3.2 El cloro y otros elementos químicos en el proceso de torrefacción.

Actualmente, uno de los parámetros más importantes es el contenido de cloro en los pellets, debido a que el cloro se considera un componente nocivo para el medio ambiente, y

las regulaciones son muy estrictas al respecto. Por lo tanto, incluso si una especie tiene un buen potencial energético para producir biocombustibles, puede descartarse. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13). En el estudio de Lu et al. (2019), se afirma que el elemento cloro (Cl) puede eliminarse hasta un 90%, si se somete a unas temperaturas de 200 a 360°C, ya que a estas temperaturas se logra transformar el cloro en forma de gas.

Otros estudios afirman que parte de los porcentajes de elementos como el cloro (Cl), nitrógeno (N) y azufre (S) se presentan en cantidades muy pequeñas en los pellets, por lo cual se pueden ignorar a la hora de simplificar los cálculos. (Miranda et al., 2009) (27) por el contrario, autores como Duca et al. (2014) (28), afirman que el cloro no se puede ignorar, puesto que este produce problemas de corrosión en los equipos.

2.3.3 La humedad, el contenido de energía y las cenizas, factores claves en el proceso de torrefacción.

2.3.3.1 Humedad

Si la humedad higroscópica que poseen los pellets torrefactados disminuye mucho, se debe a la exclusión de la adhesión de componentes químicos de la biomasa y la degradación térmica, lo que incide directamente en la reducción de la absorción de humedad higroscópica presente en los pellets, debido a que se reducen los grupos hidroxilos (-OH) disponibles con los enlaces de hidrógenos con moléculas de agua y concentración de carbono. Phanphanich y Mani, (2011) (29). Cuando los pellets han disminuido su concentración de humedad, se mejora su calidad, pues su alta higroscopicidad evita su desintegración e hinchamiento, acorta la actividad microbiana en el proceso de almacenamiento y elude que se reduzca el poder calorífico líquido. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13).

2.3.3.2 Contenido de energía

La higroscopicidad, la densidad a granel y el poder calorífico son propiedades a evaluar en los pellets torrefactados, según la calidad de estos se puede predecir parámetros a tener en cuenta en el proceso de torrefacción y la potencialidad en el uso de la energía. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13). Según Rodríguez y Rousset (2019) (30) un pellet que ya ha sido expuesto al proceso de torrefacción, pierde un 10% de contenido de energía y un 30% de su masa inicial, en conclusión, la pérdida de masa es mucho mayor que la pérdida de energía. El proceso de torrefacción depende de una energía externa, la cual puede alcanzar un 80% de autonomía mediante la recirculación del gas durante el proceso de generación de calor, mientras que el 20% restante de la energía debe pasar por fuentes externas. Pirraglia et al., (2012) (31).

2.3.3.3. Cenizas

La reducción de la eficiencia del quemador, la disminución de generación de calor, la suciedad y el aumento de costos de mantenimiento de herramientas que producen el porcentaje de cenizas es indeseable en el sector energético, por ello cuando se dice procesar pellets de alta calidad, se refiere a que sus contenidos de porcentajes de cenizas sean bajos. (García et al., 2018) (32).

2.4. Propiedades generales físicas, químicas y mecánicas de los pellets

La variación en las propiedades de los pellets es significativa, ya que factores como la temperatura, la presión atmosférica, la humedad, y las materias primas son fundamentales para determinar la calidad del pellet. La durabilidad es una de las propiedades importantes del objeto comprimido, si este presenta una baja durabilidad las tensiones mecánicas durante

el transporte y manipulación del pellet no serán competentes, y por consiguiente se generan finos y se dificultara el uso de este elemento. Este parámetro también se ve afectado principalmente por el contenido de lignina, que es un parámetro importante que contribuye a la ligadura de partículas. Otro factor determinante es la humedad de la materia prima, ya que la alta humedad dificulta la compactación y los pellets resultantes son frágiles y se pueden quebrar. (García, 2010) (32) Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13).

2.4.1 Parámetros de calidad físicos, químicos y mecánicos para evaluar los pellets.

La esfericidad, la relación superficie/volumen y el diámetro de los pellets, determinan el aspecto físico de los pellets, por lo cual, un pellet de forma cilíndrica definida posee un diámetro y una relación superficie/volumen mayor, con una esfericidad menor. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13). Si se quiere evaluar la variabilidad de las propiedades de los pellets, se encuentran estipuladas una serie de normas que permiten su clasificación. Según Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13), las normas alemanas Deutsches Institut Für Normung (DIN) EN 14961-2 (2011b), son las más comunes y con las cuales se basan la mayoría de los estudios, afirma de igual manera que no es de carácter obligatorio aun basarse en las normas del país donde se piensa hacer el estudio, se puede acoplar la norma más común, como lo es la alemana. En las siguientes tablas, se describe a partir de la norma alemana Deutsches Institut Für Normung (DIN) EN 14961-2 (2011) los parámetros para la elaboración de pellets de biomasa maderables (Ver Tabla 2), y de biomasa no maderable (Ver Tabla 3).

Parámetros de calidad originados de biomasas maderables DIN EN 14961-2

Propiedad	Categoría (Clasificación en cuanto al origen)		
	A1	A2	B
H (%)	< 0,6	≤ 0,6	< 0,07
S (%)	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,04
N (%)	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0
Densidad a granel (kg m ⁻³)	≥ 600	≥ 600	≥ 600
PCL (kcal kg⁻¹)	3.947 ≤ PCL ≤ 4.545	3.900 ≤ PCL	3.828 ≤ PCL ≤ 4.545
Finos (%)	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
Durabilidad mecánica (%)	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 96,5
Cenizas (%)	≤ 0,7	≤ 1,5	≤ 3,0
Humedad base seca (%)	≤ 11,1	≤ 11,1	≤ 11,1
Humedad base húmeda (%)	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Longitud (mm)	3,15 ≤ L ≤ 40	3,15 ≤ L ≤ 40	3,15 ≤ L ≤ 40
Diámetro (mm)	6 +/- 1	6 +/- 1	6 +/- 1

Tabla 2. Parámetros de calidad físicos y químicos para pellets originados de Biomosas maderables; DIN EN 14961-2. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13).

Tabla 3. Parámetros de calidad originados de biomosas no maderables DIN EN 14961-6

Propiedad	Categoría (Clasificación en cuanto al origen)	
	A	B
H (%)	< 0,20	< 0,30
S (%)	≤ 0,20	≤ 0,20
N (%)	≤ 1,5	≤ 2,0
Densidad a granel (kg m-3)	≥ 600	≥ 600
PCL (kcal kg-1)	≥ 3.373	≥ 3.158
Finos (%)	≤ 2,0	≤ 3,0
Durabilidad mecánica (%)	≤ 97,5	≥ 96,0
Cenizas (%)	≤ 5	≤ 10
Humedad base seca (%)	≤ 13,6	≤ 17,6
Humedad base húmeda (%)	≤ 12	≤ 15
Longitud (mm)	3,15 ≤ L ≤ 40	3,15 ≤ L ≤ 40
Diámetro (mm)	6 +/- 1	6 +/- 1

Biomosas no maderables; DIN EN 14961-2. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020).

2.4.2 Porcentaje de humedad, glicerina y densidad los pellets

Entre más bajo sea el contenido de humedad en los pellets este generara una producción de energía igual o mayor a 5 kwh/kg. González, W. A., López, D., & Pérez, J. F. (2019) (33). Si la humedad y el contenido de glicerol aumentan, la resistencia a la tracción también tendera a aumentar. González, W. A., López, D., & Pérez, J. F. (2019) (33).

Según García, (2015) (32), mientras que el carbono fijo aumenta, el contenido de material volátil disminuye. Esta conducta se origina porque al aumentar el contenido de humedad, el aumento de la temperatura debe ser mayor para lograr la densificación de la biomasa, lo que implica un aumento en las recirculaciones de la biomasa en la herramienta de la peletizadora. Por tanto, la liberación de gases volátiles durante el proceso de densificación es ventajosa y el nivel de calentamiento de las muestras de biomasa aumenta a un nivel superior.

Para lograr determinar o predecir los costos de almacenamiento y transporte de los pellets, la densidad aparente de estos juega un papel fundamental. Se obtiene dividiendo la relación en peso de sólidos secos por el volumen de sólidos más el volumen de poros. González, W. A., López, D., & Pérez, J. F. (2019) (33). Si aumenta el contenido de humedad y glicerol, la densidad aparente disminuye, esto refleja una relación inversamente proporcional. García (2015) (32).

2.4.3 Carbón, elementos y compuestos químicos

En cuanto al cambio de carbono fijo, cantidad de carbono que queda en la biomasa después de perder todas las sustancias volatilizadas en el proceso, diferentes al contenido de cenizas, se puede explicar por la diferencia porcentual entre lignina y extracto. Porque, en

otras palabras, cuanto mayor es el contenido de lignina, mayor es el contenido de carbono fijo (Demirbaş, 2003) (34) Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13). Lo anterior indica que un combustible con un valor de carbono fijo más alto se quemará o se consumirá más lentamente, porque es un componente no volátil que se oxida en estado sólido.

Los elementos mayoritarios presentes en la biomasa (hidrogeno, carbono, azufre, nitrógeno y oxígeno) son relevantes en la producción de bioenergía. Según (Paula et al., 2011) (35) para tener un mejor rendimiento y uso de biocombustible, se debe poseer un pellet con un alto contenido de carbono e hidrógeno y bajos valores de oxígeno y cenizas. El equilibrio en la formación de CO₂ y H₂O y la liberación de energía se debe a las altas concentraciones de hidrogeno y carbono. (Oberberger & Thek, 2010) (36).

Para producir bioenergía lo ideal es que la madera (biomasa) tenga un alto porcentaje de carbono e hidrógeno, y un bajo porcentaje de oxígeno y cenizas, razón por la cual ha aparecido repetidamente la relación entre la composición de estos elementos y el poder calorífico. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13). Los elementos como el azufre en valores mayores a 0,1 %, se ven ligados a la corrosión de las herramientas (estufas) que son utilizadas para el proceso de combustión de la madera, ya que se forman sales alcalinas mientras ocurre la transformación. El oxígeno y el nitrógeno también se consideran como una barrera, ya que, si estos elementos aumentan sus porcentajes, el valor calorífico de la biomasa disminuye. Los extractos y la lignina son variables importantes de la parte energética, porque el bajo porcentaje de las dos cuantificaciones puede excluir especies en la producción de bioenergía, ya que se reducirá el valor calorífico. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13).

2.5 Biomasa *Pennisetum purpureum* M.M

Pennisetum, comúnmente conocida como hierba elefante, hierba Napier o hierba de Uganda, es una planta herbácea originaria de las llanuras tropicales de África. Es una planta perenne alta, de 2 a 4,5 m de altura (raramente más de 7,5 m), con hojas aserradas de 30 a 120 cm de largo y de 1 a 5 cm de ancho. El pasto elefante recibe su nombre del hecho de que es el alimento favorito de estos animales.

Son hierbas perennes; tallos de hasta 800 cm de largo, 10-25 mm de ancho, erectos, generalmente escasamente ramificados, base decumbente; entrenudos sólidos, generalmente glabros, glabros o hispídos. Vainas ligeramente aquilladas, glabras o hirsutas; lígula de 1,5-3,5 mm de largo, con membrana ciliada; limbo de hasta 125 cm de largo, 40 mm de ancho, plano, glabro o piloso. Inflorescencia compuesta, espigas terminales y axilares, espigas de hasta 30 cm de largo, 10-20 mm de ancho, amarillas o raramente moradas, raquis rayado, piloso, recto, con base de tallo distinta, agrupado con 1 -5 espiguillas, tallo corto, tallo hacia arriba hasta 0,5 mm, peluda, muchas setas, 10-15 mm de largo, rugosa, interior hasta 40 mm, escasamente ciliada o rugosa; Espiguillas 4.5-7 mm de largo, sésiles o pediceladas hasta 1 mm, caudadas hasta 2.6 mm; primera gluma ausente o hasta 0.7 mm de largo, obtusa o aguda, nervada, segunda gluma 1.5-2.6 mm de largo, 1-nervada, aguda; inferior flósculos generalmente estambres, anteras de 2,7-3,6 mm de largo, ápice puberulento; lemma inferior de 4-5,2 mm de largo, trinervada, acuminada; canto medial inferior de 4-5 mm de largo; lemma superior de 4,6-7 mm de largo, brillante y parecida al papel en la parte inferior 3/4, membranoso en el 1/4 superior, nervios ásperos; ausencia de láminas; anteras de 2,7-3,6 mm de largo.

Es muy productivo y se puede utilizar tanto como alimento para ganado (principalmente rumiantes como cabras Mara alfalfa en cabras lecheras) como como biocombustible. Es muy susceptible a las bajas temperaturas, de hecho, las heladas lo matan. Por lo general, se cosecha después de las heladas invernales y se quema en centrales eléctricas. Se ha propuesto como plaga del barrenador norteamericano porque atrae a este insecto.

Debido a su potencial de colonización y grave amenaza para las especies autóctonas, hábitats o ecosistemas, esta especie ha sido incluida en el Inventario Español de Especies Exóticas Invasoras, regulado por el Real Decreto 630/2013, de 2 de agosto, por el que se prohibía en Canarias su introducción a el medio natural, la posesión, el transporte, el tráfico y el comercio. Reza, M. S et al 2020 (37).

2.5 Biomasa *Pinus patula* S.C.

Es una especie arbórea de las Pináceas, Pueden llegar de 20 a 40 m de altura, corteza papirácea, escamosa y rojiza. Sus hojas cuelgan como flecos. Tiene unos conos duros y escamosos que cuelgan en grupos de 3 a 6.

Crece desde los 24° a 18° de latitud norte y entre los 1800 y 2700 m sobre el nivel del mar. No soporta grandes periodos de temperaturas tan bajas como -10 °C, pero puede sobrevivir en climas más fríos por poco tiempo. Es moderadamente tolerante a la sequía, en este ámbito es superior que *Pinus taeda*. El rango de lluvias va desde los 750 a 2000 mm anuales, y ocurre principalmente en verano pero en el estado de Veracruz en la Sierra Madre Oriental su hábitat es lluvioso todo el año.

Cultivos y usos

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

Se le explota principalmente por su buena calidad de papel que proporciona y se le ha introducido en diversas partes del mundo.

Se ha plantado en grandes altitudes en Ecuador (3500 m), Bolivia, Colombia (3300 m), Kenia, Tanzania, Angola, Zimbabue, Papúa Nueva Guinea, Hawái (3000 m). En Hawái está reemplazando a los herbazales alpinos nativos. Es cultivado en más bajas altitudes que en su país de origen: Sur de Brasil, Sudáfrica, India, y en las provincias argentinas de Córdoba y San Luis³ es plantado con fines de forestación para crear bosques artificiales en tierras que anteriormente estaban cubiertas por matorrales. Ha sido introducido cerca del nivel del mar: Ha sido introducido en Nueva Zelanda con propósitos comerciales y está totalmente naturalizado. También se le ha introducido en el Reino Unido como ornamental y crece bien.

P. patula ha sido introducida en diferentes países fuera de su rango de origen, en algunos de ellos se ha convertido en una especie invasora, como en Australia, Colombia, Malawi y Sudáfrica.

En Australia se ha introducido en los estados de Victoria y Nueva Gales del Sur donde se expande naturalmente por el viento y es muy favorecido por las lluvias que son más abundantes en verano.

En Colombia, fue introducido a mediados del siglo XX debido a su uso forestal, sin embargo, se ha convertido en una invasora que amenaza a los páramos y bosques andinos debido a que su presencia está asociada a la pérdida de biodiversidad de plantas y biota del suelo. Palacios-Cruz, D. J (2020) (38).

2.7 Biomasa *Eucalyptus Globulus* L:

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

Es una especie arbórea de la familia de las mirtáceas, originaria del sureste de Australia y Tasmania.

Estos árboles crecen generalmente hasta 30 o 55 metros de altura. Los mayores ejemplares de esta especie están en la isla de Tasmania y miden 90,7 metros. Hay registros antiguos de árboles aún más altos, llegando a 101 metros. El Avó de Chavín (Viveiro), con cerca de 7,6 metros de circunferencia en la base y 61,8 metros de altura, es el eucalipto blanco más alto de la península ibérica y uno de los más altos de Europa.

Es natural de Australia. El género es uno de los árboles más conocidos de la flora australiana ya que por su rápido crecimiento se ha extendido por todo el mundo para su aprovechamiento industrial.

Prefiere suelos ligeramente ácidos y zonas frescas y húmedas. No resiste el frío intenso y es un poco sensible a las sequías prolongadas. Se ha cultivado intensamente para eliminar la humedad en zonas pantanosas. Florece en septiembre - octubre.

Es natural de Australia y de Tasmania, donde se pueden encontrar más de 300 especies del género *Eucalyptus*. Por la rapidez de crecimiento, se puede encontrar cultivado en muchas regiones del mundo para la producción de madera, fabricación de pulpa de papel y obtención de aceite esencial. Ha sido especialmente utilizado para sanear zonas pantanosas al eliminar la humedad de las mismas con la consiguiente erradicación de sus plagas de insectos, principalmente mosquitos, y de las enfermedades que transmiten. Su uso ha supuesto una gran ayuda para el control del paludismo en muchas zonas de Asia, América del Sur y el sur de Europa.

Por otra parte, esta capacidad de absorción del agua, convierte a los eucaliptos en especies muy agresivas para el medio ambiente al transformar los ecosistemas por desecación de la tierra donde se plantan. Se utiliza ampliamente como árbol de jardín (Silvia 2022) (39).

2.8 Biomasa *Zea mays L.*:

El maíz (*Zea mays L.*) es una de las plantas más importantes del reino vegetal, existen distintas teorías que intentan explicar su origen, la más aceptada es que proviene del municipio de Coxcatlán, en el Valle de Tehuacán, Estado de Puebla en el centro de México.

Desde la antigüedad, el maíz además de ser un alimento esencial para distintas culturas, era considerado como un elemento “sagrado”, pues antes se mencionaba que los dioses lo tomaron para formar al hombre. En la actualidad el maíz cuenta con una gran cantidad de especies, siendo México el sitio con mayor diversificación, ya que en el país se pueden encontrar mazorcas de distintos tamaños, colores y formas.

El maíz es el cereal más producido en el mundo, por lo que se destaca de otros cultivos. En los últimos 50 años, la producción de este grano ha ido en aumento, convirtiéndose en el grano más importante del planeta, esto ocurre por la gran variedad de productos que se obtienen a partir de él, tanto para la industria alimentaria como para el uso industrial, el cual ha ido en aumento en las últimas dos décadas.

En lo que se refiere a las propiedades del maíz, encontramos que se trata de un cereal ideal para disminuir y luchar contra los niveles de colesterol alto, a su vez aporta energía, además es rico en vitaminas del grupo B (B1 y B3 principalmente), fósforo y magnesio

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

En términos botánicos pertenece a la familia de las Poáceas (Gramíneas), por lo que se considera un pasto gigante domesticado, de origen tropical mexicano. La planta es usada para producir granos y forraje, los cuales constituyen la base para la elaboración de un buen número de alimentos, tanto para nuestra especie como para otros animales, así como para la industria farmacéutica y manufacturera

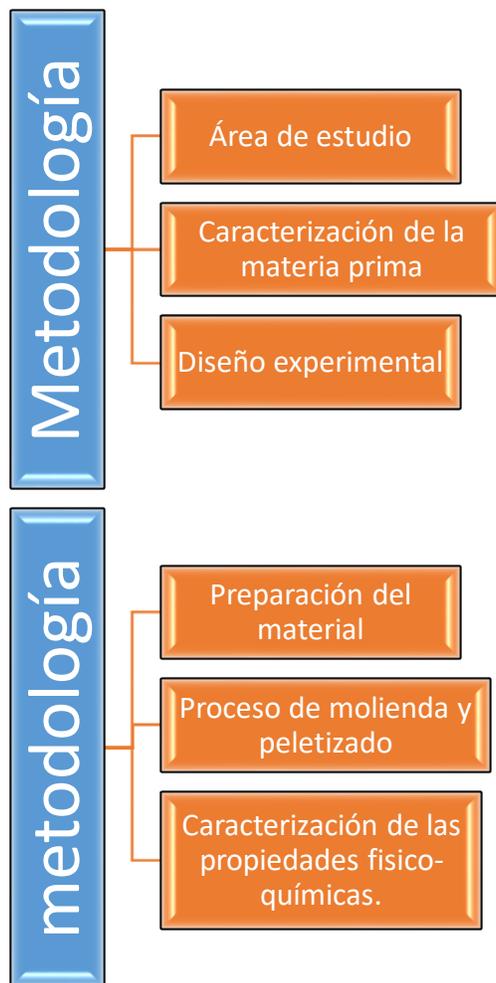
El maíz es una planta anual con gran desarrollo vegetativo, tallo nudoso y macizo, contiene de quince a treinta hojas alargadas y abrasadoras, es una planta monoica, es decir que cada planta posee flores masculinas y femeninas, además es una planta que exige un clima relativamente cálido y agua en cantidades adecuadas, principalmente durante la floración.

El maíz se adapta en una amplia variedad de suelos, donde puede producir buenas cosechas empleando las variedades adecuadas y utilizando las técnicas de cultivo apropiadas. El cultivo requiere suelos de tipo intermedio: con buen drenaje, sueltos, aireados, planos o ligeramente quebrados. No son aconsejables suelos arcillosos debido a su alta retención de humedad, ya que esta condición disminuye el aire del suelo esencial, para el desarrollo de la planta. Valenzuela, J. V. C., (2019) (40).

3. METODOLOGÍA

En la figura 1 se muestra el proceso desarrollado para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el proyecto.

Figura 1. Fases de la metodología desarrollada. Ruiz A; 2022



3.1 Área de estudio

3.1.1 Residuos madereros:

La biomasa se obtuvo en el municipio de Málaga Santander, en el cual se cuenta con una gran variedad de carpinterías, de las cuales se escogerán 2 (Maderas Mafracol Calle 29#10-22, y Sidemex. carrera 10 12 46) de ellas se recogerán semanalmente los residuos (5kg) de aserrín y viruta de *Eucalyptus globulus L* y *Pinus patula S.C*, durante 5 semanas.

De la carpintería Maderas Mafracol se recolecto virutas y aserrín de madera de *Eucalyptus globulus L*, y de la carpintería Sidemex se recolecto virutas y aserrín de madera de *Pinus patula S.C*.

3.1.2 Material vegetal de *Pennisetum purpureum M.M*:

Este material fue tomado de plantas previamente establecidas por estudiantes de la carrera de zootecnia, estas plantas se encuentran en un lote de 100m² que se divide en dos partes iguales, en uno de los dos lotes la plantación corresponde a pasto de corte de 120 días, y la otra mitad corresponde a pasto de corte de 90 días, de cada mitad será extraída una muestra respectiva de 1m², teniendo en cuenta que se cortara el pasto con una podadora manual, desde la parte del tallo que se encuentre más cerca al suelo.

La ubicación de este lote esta la parte trasera de las instalaciones de la sede de la Uis Málaga, predios pertenecientes a la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. : 6° 42' 39 "N; 72° 43' 35" W

3.1.3 Bagazo de maíz *Zea mayz L*:

Este material fue tomado de la finca denominada Ojo de Agua en la vereda de Calichal del municipio de Málaga Santander. 6° 43' 34" N; 72° 43'30" W

3.2 Caracterización de la materia prima:

3.2.1 Análisis elemental:

Es un proceso en el cual se determinan los contenidos totales de los elementos mayores como lo son el Carbono (C), Hidrógeno (H), Nitrógeno (N) y Azufre (S). Dicho análisis se llevó a cabo en un analizador elemental en el Laboratorio de Reconversión Ganadera y Agroforestal de la sede UIS Málaga.

3.2.2 Contenido de fibra:

Es una prueba que determina la cantidad total de celulosa, hemicelulosas y lignina presente en la materia prima (bagazo de maíz *Zea mays L*, residuos madereros de *Eucalyptus globulus L* y *Pinus patula S.C* y, material vegetal de *Pennisetum purpureum M.M*). Este procedimiento se realizó en un extractor de fibras en el Laboratorio de Reconversión Ganadera y Agroforestal. Universidad industrial de Santander, siguiendo la norma TAPPI T 222 os-7422.

3.2.3 Potencial energético (kcal/kg de MS):

El contenido de energía se determinó en un calorímetro en el Laboratorio de Reconversión Ganadera y Agroforestal.

3.3 Diseño experimental:

Se manejó un diseño completamente al azar, con tres materiales (bagazo de maíz *Zea mays L*, material vegetal de *Pennisetum purpureum M.M*, y residuos como aserrín y viruta de *Eucalyptus globulus L* y *Pinus patula S.C*), cada uno de los anteriores materiales se vio sometido a el tratamiento de pelletizado, y en cada tratamiento se consto con 4 repeticiones por cada tipo de biomasa.

Los registros de las variables analizadas serán sometidos a un análisis de varianza (ANOVA), cuando haya diferencias ($P < 0.05$) se utilizará la prueba de rangos múltiples de Tukey para la separación de medias y se realizarán análisis de correlación y modelos de regresión.

3.4 Preparación del material:

Los materiales o biomásas se mezclaron en su totalidad, es decir, los 5 kg de viruta y aserrín recolectados durante las cinco semanas fueron depositados en un fardo o quilma de capacidad de 30 kg, para esto se utilizaran dos quilmales, uno para la mezcla de viruta y aserrín de *Eucalyptus globulus L* y otro para la mezcla de viruta y aserrín de *Pinus patula S.C*, a estas biomásas no se les aplico ningún tratamiento como secado y demás.

En el caso del material vegetal de *Pennisetum purpureum M.M* este se sometió a una previa deshidratación la cual se realizó en un invernadero en la universidad industrial de Santander- sede Málaga, por un lapso de tiempo de 30 días. Adicionalmente se midió y peso cada uno de los tallos con el respectivo conteo de sus hojas, con la finalidad de generar una relación tallo-hoja.

El material de bagazo de maíz *Zea mays L* se recolecto directamente después de la recogida del maiz, se extrajo del suelo la caña junto con sus hojas y cascarones, también se

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

debió someter a una previa deshidratación la cual se realizó en un invernadero en la universidad industrial de Santander- sede Málaga, por un lapso de tiempo de 30 días.

Las biomasas se sometieron a procesos de trituración y cribado. En esta etapa, todas las materias primas se molieron y tamizaron para obtener los diferentes tamaños de partículas requeridos por el proceso experimental.

Se utilizó una trituradora industrial para moler biomasa, la cual se encuentra en predios pertenecientes a la Universidad Industrial de Santander Sede Uis Málaga (ilustración 3). Posteriormente, se tamizo en los tamices No. 16 y No. 50 (ilustración 4) según las normas ASTM E-11 dispuestas en el laboratorio de la Universidad industrial de Santander en la sede Málaga.

Ilustración 3. Molino industrial



Ilustración 4. Tamices número 16 y 50; Tomado de Rincón, S., & González, A. (2014) (41)



3.5 Proceso de prensado o peletización.

Ilustración 5. Peletizadora



Tomada de Rincón, S., & González, A. (2014) (41).

Las biomásas trituradas y tamizadas se sometieron a una presión de 40 bares, es decir la máxima presión que proporcionaba la prensa utilizada, puesto que elaborar pellets con una presión menor a 40 bares implicara una menor resistencia y duración. Este proceso se realizó por medio de una prensa peletizadora Rincón, S., & González, A. (2014) (41). (Ilustración 5).

Para las biomásas maderables de *Pinus patula S.C* y *Eucalyptus globulus L.* se introdujo en la peletizadora una mezcla de biomasa más agua, la mezcla estuvo constituida por un kilogramo de biomasa pulverizada y 720 mililitros de agua.

Para las biomásas no maderables como el Bagazo de Maiz *Zea mayz L* y *Pennisetum purpureum* de 120 y 90 días se introdujo en la peletizadora una mezcla de biomasa más agua, la mezcla estuvo constituida por un kilogramo de biomasa y 810 milímetros de agua.

Según Videla et al (2007) (43) es recomendable pesar, medir y que se halle la densidad de los pellets en el momento justo (Momento inicial) en el que se originaron los pellets, para que después de 72 horas (Momento final) de secado natural se haga el mismo

procedimiento con el fin de determinar que influencia directa tiene el agua sobre las tres variables anteriormente ya nombradas.

3.6 Caracterización de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los pellets

Una vez obtenidos los pellets, se caracterizaron sus propiedades físicas, químicas y mecánicas tales como: densidad, contenido de humedad, resistencia al impacto, contenido de cenizas, compresibilidad, material volátil, resistencia al agua etc. Como se describe abajo:

3.6.1 Densidad:

Para determinar la densidad de un pellet, se determinó su masa y volumen. La masa se calculó mediante una balanza analítica, y la altura y el diámetro del pellet (cilindro) se midieron con calibradores digitales para determinar el volumen, para el proceso de determinación de densidad se tomaron 12 ejemplares por cada muestra, es decir 60 pellets.

El volumen y la densidad se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = m/v$$

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Donde:

ρ = densidad del pellet

v= volumen del pellet

m= masa del pellet

r= radio del pellet

h= altura del pellet

3.6.2 Contenido de humedad:

Para determinar el contenido de humedad los pellets fueron pesados y llevados a un horno a 105°C por 24 h, posteriormente fueron puestos en un desecador por 30 min y se pesaron con el fin de evaporar todo su contenido de agua, se repitió el procedimiento anterior disminuyendo el tiempo tanto en el horno, como en el desecador, de la siguiente manera: 2 h en el horno y 30 min en el desecador, 30 min en el horno y 30 min en el desecador, 10 min en el horno y 10 min en el desecador. Rincón, S., & González, A. (2014) (41). El porcentaje de humedad se halló usando 9 ejemplares por muestra es decir 45 en total, estos 45 fueron divididos en grupos de tres para cumplir con los tiempos y temperaturas a las que se deben someter, la humedad se determinó con la siguiente formula:

$$\% \text{ Humedad} = ((\text{Masa Inicial} - \text{Masa Final}) / \text{Masa Inicial}) * 100$$

Donde:

Masa inicial= peso en base seca

Masa final= peso después de sometimiento al horno

3.6.3 Resistencia al impacto (% Durabilidad) (mecánica):

Se tomará como el porcentaje de durabilidad del pellet. Para la realización de este experimento se dejó caer el pellet desde una altura de 1.85 m sobre una superficie lisa cuatro veces, tomando en cada caída el trozo de mayor tamaño. El procedimiento se realizó con cuatro pellets de cada combinación para dar una mayor veracidad a los resultados. Este experimento se basó en las pruebas realizadas por Rincón, s., & González, a. (2014) (41). El

porcentaje de durabilidad es la relación entre la masa final tras las cuatro caídas y la masa inicial, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Durabilidad mecánica} = (\text{Masa final} / \text{Masa inicial}) * 100$$

3.6.4 Esfuerzo de compresión mecánica:

En este experimento se tomaron dos pellets de cada composición, se les midió su diámetro y altura y se procedió a hacer la prueba. Para determinar el esfuerzo de compresión se colocó el pellet entre dos placas, donde la placa que se ubicaba en la parte superior aplica una fuerza de forma constante por medio de una prensa hidráulica, hasta que se genere una falla por la formación de grietas y producir su ruptura. El esfuerzo de compresión es tomado como la máxima presión que puede soportar un pellet antes de su ruptura. Rincón, S., & González, A. (2014) (41).

3.6.5 Material volátil:

Para determinar el material volátil de los pellets, estos fueron pesados y puestos en una estufa hasta completar su proceso de quemado, luego se dejaron enfriar y se determinó su masa final. Este se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula. Rincón, S., & González, A. (2014) (41).

$$\% \text{ Masa perdida} = ((\text{Masa inicial} - \text{Masa final}) / \text{Masa Inicial}) * 100$$

$$\% \text{ Volatilidad} = \% \text{ Masa perdida} - \% \text{ Humedad.}$$

Donde:

Masa Inicial= peso en base húmeda.

Masa final= peso en base seca.

3.6.6 Cenizas:

Se utilizó la norma UNE 14775 EX: 01. Método para la determinación del contenido de cenizas. Biocombustibles sólidos. Se pesó una pequeña cantidad de la muestra (2g) en una balanza de precisión. Se desecará y posteriormente se incinerará a $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en una mufla durante 6 horas.

3.6.7 Resistencia al agua:

Cada muestra del pellet ya peletizado y seco, fue pesada en una gramera, luego se sumergió en un vaso de agua a una temperatura de 15°C , el tiempo que debió ser sometida la muestra fue de 30 seg en el agua, luego será extrajo la muestra y se volvió a pesar para saber el porcentaje de agua que resiste, la formula a aplicar para hallar estos resultados será la siguiente. American Society of Agricultural Engineers, ASAE según lo refieren los autores (Lindley and Vossoughi, 1989) (43).

$$\text{Resistencia al agua} = ((\text{peso final} - \text{peso inicial}) / \text{peso final}) * 100$$

Donde:

Peso final= peso después de sumergir la muestra en agua.

Peso inicial= peso de la muestra luego de ser peletizado y secada.

3.7 Proceso de quemado:

3.7.1 Método tradicional:

Los pellets (2 por cada material) fueron puestos sobre un recipiente de metal y posteriormente pasados a una estufa convencional. Se tomó la variación de la temperatura de

la resistencia de la estufa en un intervalo de tiempo definido hasta su punto de calcinación.

Rincón, S., & González, A. (2014) (41).

3.7.2 Torrefacción:

Los pellets (3 por cada material) fueron puestos en una mufla, se tomaron variaciones de temperatura y seguidamente los lapsos de tiempo que necesito el material para lograr su respectiva calcinación.

Una vez fabricados los pellets y realizados los estudios de caracterización de las propiedades físico-químicas, por medio de los procedimientos descritos anteriormente, se hizo un análisis de resultados, para su respectiva interpretación.

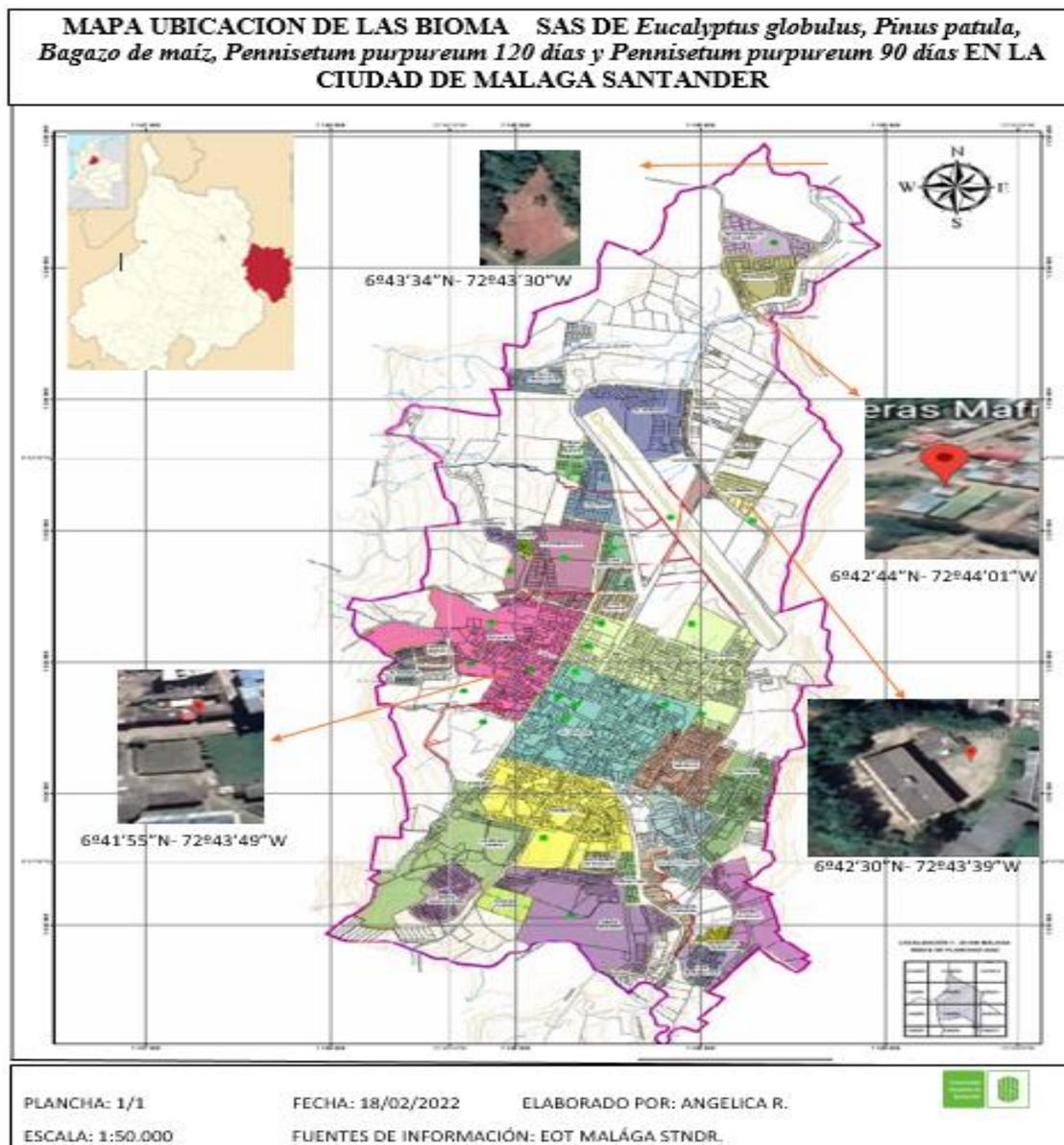
Metodologías Laboratorio de reconversión ganadera y agroforestal.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 Área de estudio:

Ilustración 6. MAPA UBICACIÓN DE LAS BIOMASAS DE *Eucalyptus globulus L*, *Pinus patula S.C*, *Bagazo de maíz Zea mayz L*, *Pennisetum purpureum 120 días* y *Pennisetum purpureum 90 días* EN LA CIUDAD DE MÁLAGA SANTANDER.

R. Angélica 2022.



El mapa anterior se logra observar la ubicación específica de los lugares donde se logró obtener los 5 diferentes tipos de biomasas.

Según la georreferenciación de las plataformas de Earth explorer y Google Earth se puede determinar que según la norte:

La ubicación de la finca de Ojo de agua de la vereda Calichal se ubica en el plano espacial en coordenadas: 6° 43' 34" N; 72° 43'30" W; que según sus coberturas siguiendo la metodología de la Corin Land Cover su clasificación como primer nivel será (2. Territorios agrícolas), de segundo nivel se clasificará en (2.4 Áreas agrícolas heterogéneas) y como tercer nivel será (2.4.1 Mosaicos de cultivos). Por consiguiente su nomenclatura será (2; 2.4; 2.4.1) TERRITORIOS AGRÍCOLAS DE ÁREAS AGRÍCOLAS HETEROGÉNEAS CON MOSAICO DE PASTOS Y CULTIVOS.

La ubicación de las carpinterías Sidemex y Maderas Mafracol se ubican en el plano espacial en coordenadas: 6° 41' 55" N; 72° 43' 49" W y 6° 42' 44"; 72° 44' 01" W, que según sus coberturas siguiendo la metodología de la Corin Land Cover su clasificación como primer nivel será (1 Territorios Artificializados), de segundo nivel será (1.1 Zonas Urbanizadas), y como tercer nivel será (1.1.1 Tejido Urbano Continuo). Por consiguiente su nomenclatura será (1; 1.1; 1.1.1) TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS CON ZONAS URBANIZADAS CON TEJIDO URBANO CONTINUO. Por último la ubicación de las plantas de Pennisetum purpureum corresponde a las coordenadas: 6° 42' 39 "N; 72° 43' 35" W, y según la metodología aplicada anteriormente, la nomenclatura para esta cobertura será: 2.Territorios

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

agrícolas, 2.3 Pastos, 2.3.1 Pastos; Por consiguiente será (2; 2.3; 2.3.1) TERRITORIOS AGRÍCOLAS CON PASTOS LIMPIOS.

A partir de este punto se aclara que las respectivas abreviaturas para tablas, gráficas y demás, serán de la siguiente manera, adicionalmente es muy importante recalcar que, LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA PRESENTO DIFERENCIAS ESTADÍSTICAS ($P < 0.05$) PARA TODAS SUS VARIABLES, DONDE SE OBTUVIERON RANGOS ENTRE 0.0001 HASTA 0.1980, ES DECIR QUE SE ENCUENTRAN DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS RANGOS DE ESTAS VARIABLES.

Eg: Eucalyptus globulus L

Pp: Pinus patula S.C

Pp120: Pennisetum purpureum 120 días.

Pp90: Pennisetum purpureum 90 días.

Bm: Bagazo de maíz Zea mayz L.

4.2 Caracterización de la materia prima.

4.2.1 Análisis Elemental:

Tabla 4. Análisis elemental de las 5 Biomosas; Laboratorio de conversión ganadera, 2022.

Muestra	%Nitrógeno (N)	%Carbono (C)	%Hidrógeno (H)	%Azufre (S)	Lignina

<i>Eg</i>	0.021	56.87	5.79	0	23,
E		A	A		4 A
<i>Pp</i>	0.038	56.00	5.49	0	21,
D		A	B		9 B
B	0.051	45.46	4.17	0	15,
m	C	C	D		8 C
<i>Pp</i>	0.92	48.11	4.75	0	10,
90	A	B	C		1 E
<i>Pp</i>	0.064	39.43	3.92	0	14,
120	B	D	E		5 D

CV: coeficiente de variación. Medias en columnas seguidas por letras

diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$), prueba de rangos múltiples de Duncan.

4.2.1.1 Análisis elemental a partir de parámetros madereros.

El análisis de Duncan's arrojo que las variables (N, H, Lignina) no poseen relación alguna con las medias de sus variables, en cambio la variable (C) presenta relación de variables medias entre las biomásas Eg y Pp es decir que no presenta diferencias significativas.

A partir de los valores obtenidos en los laboratorios de análisis elemental y en base a los parámetros de calidad físicos, químicos, y mecánicos para pellets originados de biomásas no maderables y maderables conforme a la ley DIN EN 14961-2. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13). Se deduce para materiales maderables que el *Eucalyptus globulus L* se

clasifica totalmente con la categoría A1 plus (la mejor calidad), que hace referencia a que la procedencia de su madera es fina, virgen y sin ningún proceso químico, lo que genera altos porcentajes de hidrogeno, bajos porcentajes de nitrógeno y por consiguiente según la teoría arrojará niveles muy bajos de cenizas. (Ver tabla 5). Pinilla Suárez; et al (2021) (44).

Con respecto al material maderable de *Pinus patula S.C*, su clasificación es de un 67% en la categoría A1 y un 33% en la categoría A2, esto quiere decir que su procedencia logro ser aturdida químicamente, lo que generara niveles un poco más altos de nitrógeno y más bajos de hidrogeno que afectaran el resultado de la combustión, es decir el residuo de cenizas será un poco mayor a la de la categoría A1. (Ver tabla 5). Pinilla Suárez; et al (2021) (44).

Tabla 5. Categorías para pellets de procedencia maderera según la norma DIN EN 14961-2; Ruiz A. 2022

CATEGORÍAS			
MATERIAL	%N	%S	%H
<i>Eucalyptus globulus</i>	A1	A1	A1
<i>Pinus patula</i>	A2	A1	A1

4.2.1.2 Análisis elemental a partir de parámetros no madereros.

Para materiales no maderables como el bagazo de maíz *Zea mayz L.*, y *Pennisetum purpureum* de 90 y 120 días, la categorización arrojo que los tres materiales pertenecen a la categoría A, esta hace referencia a la creación de pellets con bajos contenidos de hidrogeno,

y altos contenidos de nitrógeno, lo que generara una combustión más rápida y un restante de cenizas medio. (Ver tabla 6). Sartori, R. S. (2022) (45).

Tabla 6. Categorías para pellets de procedencia no maderera según la norma DIN EN 14961-2; Ruiz A. 2022

CATEGORÍAS			
MATERIAL	%N	%S	%H
BAGAZO DE MAÍZ	A	A	A
PENNISETUM PURPUREUM 90	A	A	A
PENNISETUM PURPUREUM 120	A	A	A

4.2.1.3 Análisis de carbón y compuestos químicos

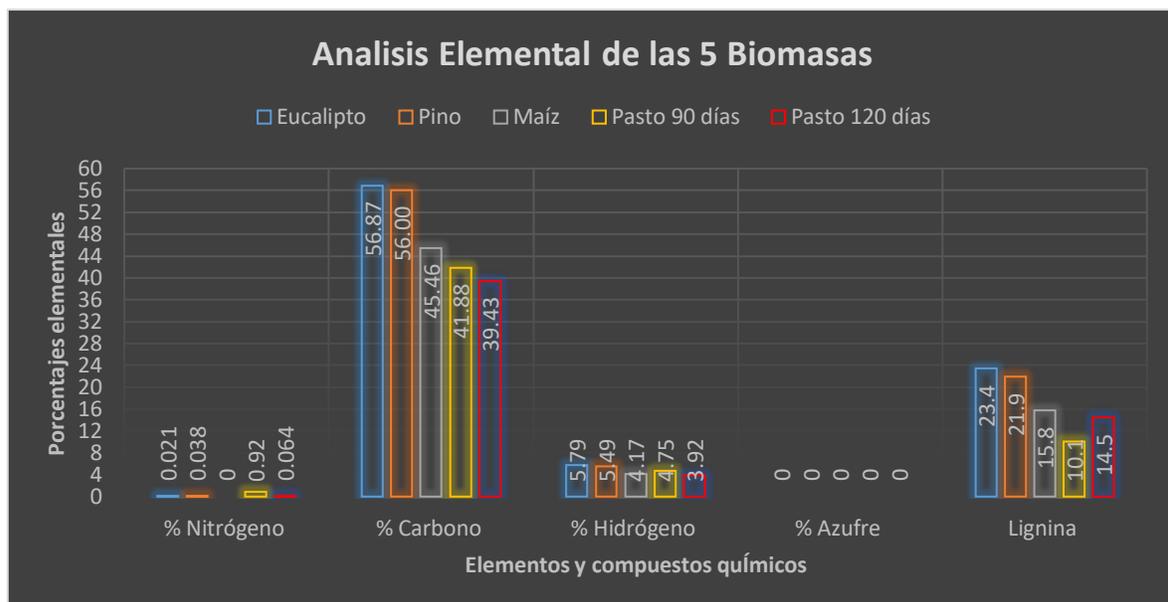
En la grafica 1 se logra observar que la especie con mas altos contenidos de carbono corresponde a *Eucalyptus globulos L* seguida por el *Pinus patula S.C*, el Pp90 días, Bagazo de maiz *Zea mayz L* y Pp120 días, y junto con los porcentajes de lignina se da una relacion lineal con respecto a los contenidos de carbono en los 4 primeros materiales, es decir a mayor porcentaje de lignina, mayor porcentaje de carbono. Según Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13), la relación anterior indica que los pellets de *Eucalyptus*, *Pinus* y *Bagazo de maiz*, poseen un combustible con un valor de carbón muy alto que se quemara y/o se consumirá más lentamente, porque es un componente no volátil, lo que generara un largo lapso de

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

tiempo para su calcinación, adicionalmente los altos porcentajes de hidrogeno que relativamente tambien son lineales con base en el carbón y la lignina hacen que los pellets de Eucalyptus, Pino y maiz respectivamente sean biocombustibles de alto rendimiento que no generaran residuos notorios, es decir altos porcentajes de cenizas.

Según la matriz de correlación de la estadística aplicada a el diseño completamente al azar, se logra argumentar que el carbón, el hidrogeno y el material volátil poseen una relación del 98%, es decir que son variables que se complementan la una de la otra. Con ello las predicciones anteriormente ya nombradas logran tomar un porcentaje mayor de veracidad.

Grafica 1. Análisis elemental de las 5 biomásas; Ruiz A. 2022



4.2.2 Análisis y Contenido de fibra.

Tabla 7. Análisis y Contenido de Fibras de las 5 biomasas; Laboratorio de Reconversión ganadera y Agroforestal; 2022.

Muestra	FDN	FDA	Lignina
Eg	89,2	77,4	23,4 A
A	A		
Pp	84,09	71,73	21,9 B
B	B		
Bm	72,38	48,25	15,8 C
C	C		
Pp90	63,1	43,69	10,1 D
E	D		
Pp120	69,44	46,58	14,5 E
D	E		

CV: coeficiente de variación. Medias en columnas seguidas por letras

diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$), prueba de rangos múltiples de

Duncan.

El análisis de Duncan's arrojó que las variables (FDN, FDA Y Lignina) no poseen relación alguna con las medias de sus variables.

A partir de la tabla anterior se logra deducir que la Biomasa Eg, es la que presenta mayores porcentajes de FDN (Fibra detergente neutra), FDA (Fibra detergente ácido) y lignina, Seguida de las muestras de Pp, que según González Velandia, K. D et al 2019 (46),

sus valores de celulosa, hemicelulosas y lignina componentes de los FDA y FDN están en los rangos aptos para clasificarse como una madera dura, y los pellets a partir de estas maderas duras suelen ser de mejor calidad , ya que los compuestos nombrados anteriormente generan cohesión, lo que produce altas densidades, bajos porcentajes de humedad y un gran porcentaje de compactibilidad, que favorece el lapso de tiempo de calcinación de los pellets, haciendo de esta un proceso lento donde se irradiara más calor. Rigual Hernández, V. D. L. Á. (2019) (47).

El Bm y los dos tipos de Pp 90 y 120 poseen los menores valores de FDN- FDS y lignina, pese a esto sus valores los hacen categorizar como una biomasa alta. Sierra Aguilar, Y. (2018). La diferencia entre los pellets de maderas duras y estos serán la calidad de cohesión, su densidad y el lapso de tiempo para la calcinación, ya que estas biomásas no maderables no tendrán el mismo rendimiento que las maderables, por otra parte, los pellets de residuos no maderables generan más temperatura de calor, es decir su proceso de calcinación será más rápido, pero alcanzara temperaturas más altas. Tobón R. (2020) (48).

Según la matriz de correlación de la estadística aplicada al diseño completamente al azar, se logra argumentar que los FDN- FDA y Lignina poseen una relación del 98%, es decir que son variables que se complementan la una de la otra. Adicionalmente a esto, las variables nombradas anteriormente poseen una relación del 99% con respecto al proceso de quema, porcentaje que corrobora y argumenta las predicciones de párrafos anteriores.

4.2.3 Análisis de potencial energético. (PCL)

Tabla 8. Potencial energético o potencial calorífico de las 5 Biomosas.

Laboratorio de Reconversión ganadera y Agroforestal; 2022.

Muestra	Energía (cal/g)
Eg	3834,91
A	
Pp	4237,6
B	
Bm	3011,23
C	
Pp90	3520,81
D	
Pp120	3453,55
E	

CV: coeficiente de variación. Medias en columnas seguidas por letras

diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$), prueba de rangos múltiples de

Duncan.

El análisis de Duncan's arrojó que la variable energía no posee relación alguna con las medias de sus variables en base a los 5 tipos de biomosas diferentes.

Los mayores valores de potencial energético o potencial calorífico corresponden a las biomosas Eg y Pp respectivamente, y acoplándonos a la norma **DIN EN 14961** de biomosas

maderables se deduce que ambos pertenecen a categoría A1 es decir que son pellets con las mejores condiciones para comercializar, ya que a mayor potencial energético, menores porcentajes de humedad y cenizas. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020) (13), seguidamente y acoplándonos a la misma norma y al mismo autor, pero basándonos en categorizaciones de pellets a partir de productos no maderables se infiere que las biomásas Bm, Pp90 y Pp 120 pertenecen a las categorías B –A—A respectivamente, esto quiere decir que el potencial energético de Bm es insuficiente para ser un pellet de alta calidad, por correspondiente sus valores de humedad y cenizas serán un poco mayores en comparación con las otras 4 biomásas, con respecto a los pastos, su categorización los ubica como pellets de alto potencial energético, lo que conlleva a bajos porcentajes de humedad y cenizas.

4.3. Resultados molienda y tamizado de las muestras.

Los cinco tipos de biomásas acogieron el siguiente proceso con el fin de transformasen en pequeños volúmenes cilíndricos llamados pellets.



4.4.1 Material de *Eucalyptus globulus L* y *Pinus patula S.C.*

El total de muestra recogido durante las 5 semanas fue de 25kg por cada biomasa, luego de la molienda y tamizado (N° 16) las muestras quedaron pesando 19 kg de *Eucalyptus globulus L* y 20kg de *Pinus patula*, la pérdida en esta transformación fue de 24% y del 20% respectivamente. Según Aguinalde González et al; 2019 (49) las pérdidas a nivel industrial en la molienda corresponden a el 5% en lugares cerrados donde no se logra la penetración del viento, y a su vez pueden recuperarse con procesos y maquinaria avanzada.

El porcentaje de pérdidas de las biomásas usadas, se debió a la cantidad de polvo que expulso la moledora y el tamizado ya que estos procesos se llevaron a cabo a campo abierto.

Basándonos en la clasificación de biomásas de la tabla 1, se deduce que estas son biomásas naturales.

Ilustración 7. Biomosas de *Pinus patula* S.C y *Eucalyptus globulus* L. tamizadas.



4.3.2 Material *Pennisetum Purpureum* 90 y 120 días.

Este material fue pesado y medido en el momento justo después de ser cortado, con el fin de generar una relación tallo hoja, después de 30 días se pesó nuevamente para saber su nuevo peso, los resultados de esto se muestran a continuación.

Tabla 9. Relación tallo hoja Biomasa *Pennisetum purpureum* 120 días Ruiz A. (2022)

Pp120, Altura promedio 4.80 m, Diámetro promedio 7,2 cm, Área 1m²			
Rama	Peso tallo-hoja (kg)	Numero de hojas	Relación tallo /hoja
1	1,555	37	0,042027027
2	1,21	35	0,034571429
3	1,165	32	0,03640625
4	1,036	31	0,033419355
5	1,85	20	0,0925
6	1,1	16	0,06875

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

7	1,23	36	0,034166667
8	1,11	37	0,03
9	1,5	30	0,05
10	0,59	20	0,0295
11	2,183	43	0,050767442
12	0,38	20	0,019
13	0,618	27	0,022888889
14	0,701	30	0,023366667
15	0,653	30	0,021766667
16	0,455	20	0,02275
17	0,822	27	0,030444444
18	0,18	16	0,01125
19	0,19	15	0,012666667
20	0,285	15	0,019
21	1,9	30	0,063333333
22	1	27	0,037037037
23	0,32	10	0,032
24	0,425	11	0,038636364
25	0,475	20	0,02375
26	0,54	25	0,0216
27	0,12	14	0,008571429
28	0,19	17	0,011176471
29	0,475	22	0,021590909

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

30	0,603	28	0,021535714
31	0,62	26	0,023846154
32	0,357	21	0,017
33	0,455	23	0,019782609
34	0,2	20	0,01
35	0,265	10	0,0265
36	0,245	10	0,0245
37	0,1	19	0,005263158
38	0,53	25	0,0212
39	0,124	15	0,008266667
40	0,315	19	0,016578947
41	0,285	17	0,016764706
42	0,32	20	0,016
43	0,13	15	0,008666667
44	0,302	19	0,015894737
Totales	29,109	1000	0,001194736

La relación que se dio en la biomasa Pp120 es que por cada kilogramo de tallos, se obtienen 0,0012 kilogramos de hojas, el total de kilogramos de esta biomasa en base húmeda fue de 29,109 kilogramos, y luego de su proceso de secado su peso fue de 9,163 siendo el peso final perdido de 19,946 kg que corresponden a un 68,52%, este porcentaje hace referencia a la reducción de la biomasa, y su porcentaje para el proceso de molienda, es decir

el porcentaje aprovechable desde la base humedad fue de 31,48% Según la FAO (50) en pastos es normal que las pérdidas oscilen entre el 50%- 70% de la base húmeda.

Tabla 10. Relación tallo hoja de Pennisetum purpureum 90 días Ruiz A. (2022)

Rama	Pasto 90 días, Altura promedio 3,2m; Diámetro promedio 8,5cm , Área 1m ²		
	Peso tallo- hoja (kg)	Numero de hojas	Relación tallo-hojas
1	1,16	20	0,058
2	1,04	21	0,04952381
3	0,68	20	0,034
4	0,63	18	0,035
5	0,78	21	0,03714286
6	0,935	12	0,07791667
7	0,75	20	0,0375
8	0,669	20	0,03345
9	0,715	18	0,03972222
10	0,89	19	0,04684211
11	0,6	16	0,0375
12	0,48	12	0,04
13	0,24	6	0,04
14	0,635	16	0,0396875
15	0,225	6	0,0375
16			

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

17	0,405	6	0,0675
18	0,59	21	0,02809524
19	0,592	15	0,03946667
20	0,245	11	0,02227273
21	0,375	21	0,01785714
22	0,486	21	0,02314286
23	0,42	44	0,00954545
24	0,22	14	0,01571429
25	0,315	14	0,0225
Totales	14,077	412	0,88987953

La relación que se dio en la biomasa Pp90 es que por cada kilogramo de tallos, se obtienen 0,8898 kilogramos de hojas, el total de kilogramos de esta biomasa en base húmeda fue de 14,077 kilogramos, y luego de su proceso de secado su peso fue de 3,468 kilogramos siendo el peso perdido de 10,609kg que corresponden a un 75,36%, este porcentaje hace referencia la reducción de la biomasa, y su porcentaje para el proceso de molienda, es decir el porcentaje aprovechable desde la base húmeda fue de 24,64%. Según la FAO (50) en pastos es normal que las pérdidas oscilen entre el 50%-78% de la base húmeda.

Después del secado de las muestras se procedió a la molienda y tamizado, los nuevos resultados para Pp 120 fueron $9,163 - 6,3432 = 2,8198$ kg, lo que quiere decir que la pérdida en este proceso fue de 25,26% y en total desde la base húmeda la pérdida de esta biomasa fue de 78,21%.

En la biomasa Pp90 el resultado después de la molienda y tamizado fue de 3,468kg - 1,010kg = 2,458 Kg, de lo que se deduce que la pérdida en este proceso fue de 29,12% y en total desde la base húmeda la pérdida de esta biomasa fue de 82,53%

Estas biomosas según la tabla 1 se clasifican en biomosas térmicas.

4.3.3 Material de Bagazo de Maíz *Zea mays L*

Esta biomasa según la clasificación de la tabla 1, pertenece a la categorías de biomosas térmicas, inicialmente de esta muestra se pesaron 10 kg en base humedad, luego de su deshidratación su peso fue de 7,9 kg, lo que quiere decir que el peso perdido por deshidratación fue de 2,1kg que corresponde al 21% de la biomasa, luego de los procesos de molienda y tamizado, la biomasa quedo pesando 6,3 kg lo que corresponde a un 25,93%, finalmente la pérdida total de esta biomasa fue de 63%. Las pérdidas en el bagazo de maíz en el proceso de tamizado y molienda fue de 19% en espacios al aire libre, de igual manera el señor Cabrera Vásquez, E. A. 2022 (51), afirma que el secado del maiz puede tener entre el 30% y el 35%, porcentajes que se asemejan a nuestros resultados.

4.4 Resultados y análisis de las propiedades físico químicas y mecánicas de las 5 biomosas.

4.4.1 Densidades al momento del peletizado (Mi) y después de secado al ambiente natural por 72 hrs. (Mf).

TABLA 11. DENSIDADES AL MOMENTO DE PELETIZADO E LA BIOMASAS *EUCALYPTUS*

GLOBULUS L; ANGÉLICA R. 2022

EG MOMENTO DEL PELETIZADO

REPLICAS	Masa	Radio	Altura	Volumen	Densidad
	(g)	cm	(h) cm	m ³	g/cm ³
1	0,2097	0,82	0,8	1,68992552	0,124088309
2	0,279	0,82	1,1	2,32364759	0,120069842
3	0,299	0,82	1,1	2,32364759	0,128677
4	0,328	0,82	1,1	2,32364759	0,141157377
5	0,3389	0,82	1,2	2,53488828	0,133694255
6	0,3402	0,82	1,3	2,74612897	0,123883475
7	0,3407	0,82	1,32	2,788377108	0,122185769
8	0,3501	0,82	1,4	2,95736966	0,118382225
9	0,3597	0,82	1,8	3,80233242	0,09459983
10	0,3669	0,82	1,9	4,013573111	0,091414804
11	0,3691	0,82	1,91	4,03469718	0,091481463
12	0,3909	0,82	2	4,224813801	0,092524788
TOTAL					0,116377757

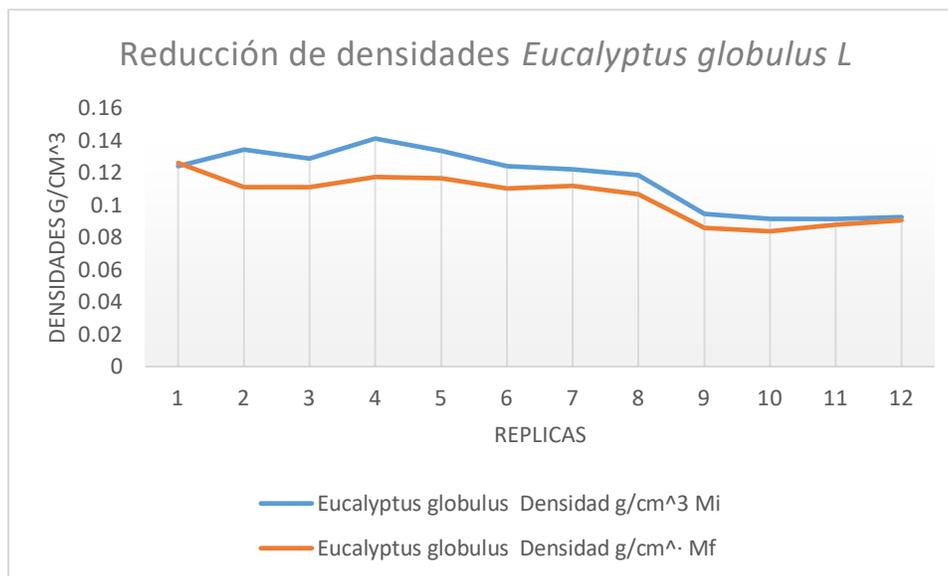
Tabla 12. Densidades de *Eucalyptus globulus L* después de 72 hrs en secado

natural: Angélica R. 2022

EG 72 HRS EN SECADO NATURAL

REPLICAS	Masa (g)	Radio cm	Altura (h) cm	Volumen cm ³	Densidad g/cm ³
1	0,213	0,82	0,8	1,68992552	0,12604106
2	0,258	0,82	1,1	2,32364759	0,11103233
3	0,258	0,82	1,1	2,32364759	0,11103233
4	0,273	0,82	1,1	2,32364759	0,1174877
5	0,295	0,82	1,2	2,53488828	0,11637594
6	0,303	0,82	1,3	2,74612897	0,11033713
7	0,312	0,82	1,32	2,78837711	0,11189304
8	0,316	0,82	1,4	2,95736966	0,10685171
9	0,326	0,82	1,8	3,80233242	0,08573685
10	0,336	0,82	1,9	4,01357311	0,08371593
11	0,354	0,82	1,91	4,03469718	0,08773893
12	0,382	0,82	2	4,2248138	0,09041819
TOTAL					0,10488843

Grafica 2. Reducción de densidades del Mi y Mf de la biomasa de *Eucalyptus globulus* L; Angélica R. 2022.



A partir del gráfico y de las tablas, se logra inferir que los pellets 2, 3, 4 y 5 poseen las más altas densidades y las más altas pérdidas por su relación directa con respecto a las demás. El comportamiento de pérdida de densidades en los pellets del momento inicial (0,116377757 g/cm³) en base a los pellets del momento final (0,104888427 g/cm³) corresponde a una pérdida total de 0,011489331 g/cm³, es decir que luego de 72 horas la densidad en general de los pellets se reduce un 9,87%.

Tabla 13. Densidades al momento del peletizado de *Pinus patula* S.C; Angélica R.
2022.

PP MOMENTO DEL PELETIZADO

REPLICAS	Masa (g)	Radio cm	altura (h) cm	Volumen m ³	Densidad g/cm ³
1	0,180	0,82	0,8	1,68992552	0,106513577
2	0,2114	0,82	1,1	2,32364759	0,090977651
3	0,2446	0,82	1,3	2,74612897	0,089070835
4	0,2622	0,82	1,3	2,74612897	0,095479856
5	0,2896	0,82	1,3	2,74612897	0,105457538
6	0,2898	0,82	1,3	2,74612897	0,105530368
7	0,2994	0,82	1,5	3,16861035	0,094489371
8	0,3096	0,82	1,6	3,37985104	0,09160167
9	0,3102	0,82	1,6	3,37985104	0,091779193
10	0,318	0,82	1,63	3,443223247	0,092355324
11	0,3501	0,82	1,9	4,013573111	0,087229008
12	0,394	0,82	1,98	4,182565663	0,094200553
TOTAL					0,095390411

Tabla 14 Densidades después de 72 hrs de secado natural *Pinus patula* S.C;

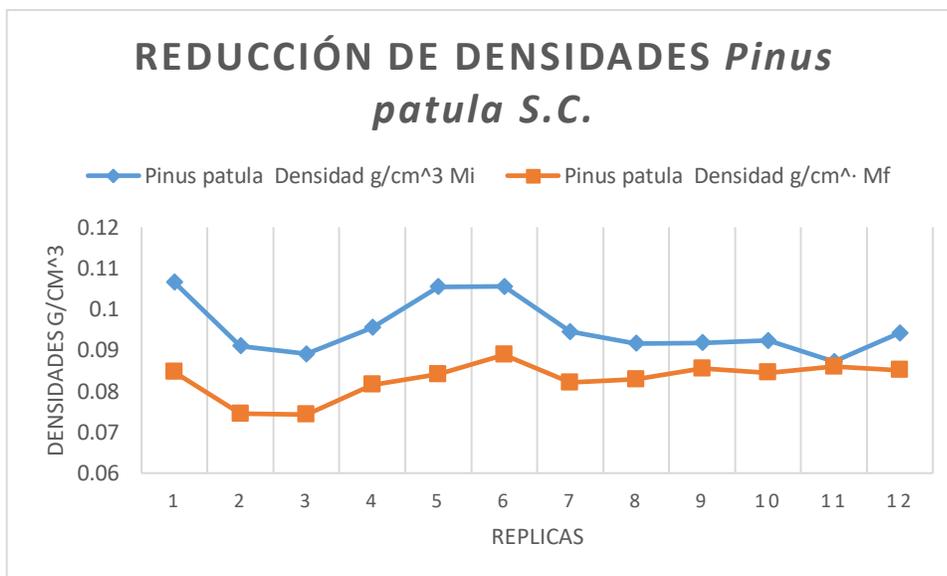
Angélica R. 2022.

PP DESPUES DE 72 HRS DE SECADO NATURAL

REPLICAS	Masa	Radio	Altura	Volumen	Densidad
	(g)	cm	(h) cm	cm ³	g/cm ³
1	0,143	0,82	0,8	1,68992552	0,08461911
2	0,173	0,82	1,1	2,32364759	0,07445191
3	0,204	0,82	1,3	2,74612897	0,07428639
4	0,224	0,82	1,3	2,74612897	0,08156937
5	0,231	0,82	1,3	2,74612897	0,08411841
6	0,244	0,82	1,3	2,74612897	0,08885235
7	0,26	0,82	1,5	3,16861035	0,0820549
8	0,28	0,82	1,6	3,37985104	0,08284389
9	0,289	0,82	1,6	3,37985104	0,08550673
10	0,291	0,82	1,63	3,44322325	0,08451383
11	0,345	0,82	1,9	4,01357311	0,08595832
12	0,356	0,82	1,98	4,18256566	0,08511522
TOTAL					0,0828242

Grafica 3. Reducción de densidades de Mí y Mf de la biomasa de *Pinus patula*

S.C; Angélica R. 2022.



A partir de las gráficas y tablas anteriormente de la biomasa de *Pinus patula* S.C, se logra inferir que los pellets con mayores densidades y más abruptos cambios directos de densidades corresponden a los primeros 6 pellets, ya luego el comportamiento de reducción de estos es muy similar en los pellets restantes (7-12), El comportamiento de pérdida de densidades en los pellets del momento inicial (0,095390411g/cm³) en base a los pellets del momento final (0,0828242 g/cm³) corresponde a una pérdida total de 0,01261552 g/cm³, es decir que luego de 72 horas la densidad en general de los pellets de Pp se reduce un 13,23%.

Tabla 15. Densidades al momento del peletizado de la biomasa Bagazo de Maiz Zea

mayz L; Angélica R. 2022.

BM AL MOMENTO DEL PELETIZADO

REPLICAS	Masa (g)	Radio (cm)	Altura (h) cm	Volumen cm ³	Densidad g/cm ³
-----------------	-------------	---------------	------------------	----------------------------	-------------------------------

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
TÉRMICA.

1	0,17	0,82	1	2,1124069	0,080476919
2	0,185	0,82	1,1	2,32364759	0,079616204
3	0,1897	0,82	1,1	2,32364759	0,081638886
4	0,1902	0,82	1,1	2,32364759	0,081854065
5	0,1903	0,82	1,1	2,32364759	0,0818971
6	0,1942	0,82	1,2	2,53488828	0,076610871
7	0,1993	0,82	1,3	2,74612897	0,072574887
8	0,1994	0,82	1,4	2,95736966	0,06742478
9	0,243	0,82	1,4	2,95736966	0,082167611
10	0,2507	0,82	1,5	3,16861035	0,079119858
11	0,2601	0,82	1,6	3,37985104	0,076956054
12	0,3203	0,82	1,8	3,80233242	0,084237769
TOTAL					0,078714584

**Tabla 16. Densidades después de 72 hrs de secado natural de la biomasa bagazo de
maiz Zea mayz L; Angélica R. 2022.**

BAGAZO DE MAÍZ DESPUES DE 732 HRS DE SECADO NATURAL.

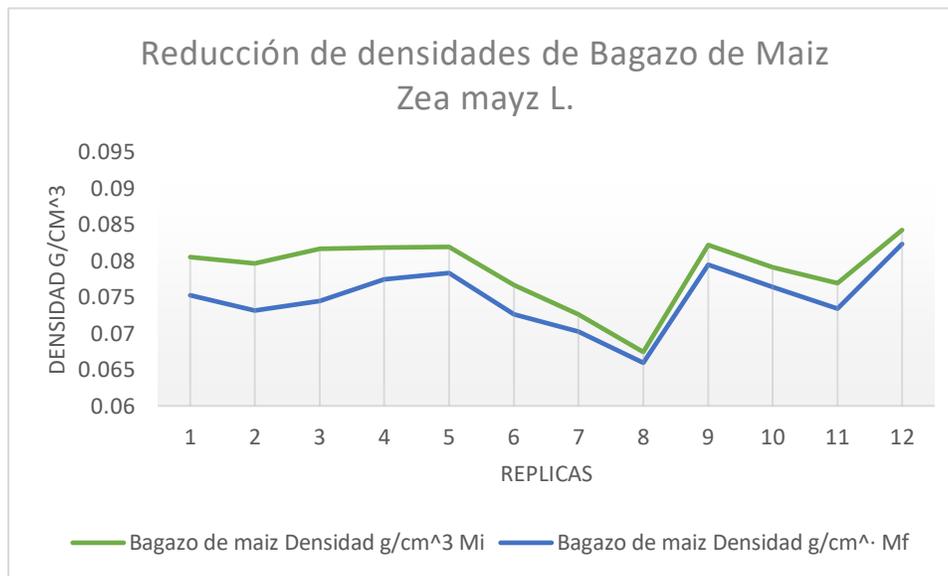
REPLICAS	Masa (g)	Radio (cm)	Altura (h) cm	Volumen cm ³	Densidad g/cm ³
1	0,159	0,82	1	2,1124069	0,07526959
2	0,17	0,82	1,1	2,32364759	0,07316084
3	0,173	0,82	1,1	2,32364759	0,07445191
4	0,18	0,82	1,1	2,32364759	0,07746441

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

5	0,182	0,82	1,1	2,32364759	0,07832513
6	0,184	0,82	1,2	2,53488828	0,07258703
7	0,193	0,82	1,3	2,74612897	0,07028075
8	0,195	0,82	1,4	2,95736966	0,06593697
9	0,235	0,82	1,4	2,95736966	0,0794625
10	0,242	0,82	1,5	3,16861035	0,07637417
11	0,248	0,82	1,6	3,37985104	0,07337601
12	0,313	0,82	1,8	3,80233242	0,08231789
TOTAL					0,07491727

Grafico 4. Reducción de densidades del Mi y el Mf de la biomasa de Bagazo de Maiz;

Angélica R. 2022.



A partir de la gráfica y tablas de la biomasa de Bagazo de Maiz Zea mayz L., se logra deducir que, las densidades más altas y con cambios más abruptos son las densidades de los

primero 4 pellets, luego la pérdida de densidades se nivel a partir del pellet número 5. El comportamiento de pérdida de densidades en los pellets del momento inicial (0,078714584 g/cm³) en base a los pellets del momento final (0,074917268 g/cm³) corresponde a una pérdida total de 0,003797316 g/cm³, es decir que luego de 72 horas la densidad en general de los pellets se reduce un 4,82%.

Tabla 17. Densidades al momento del peletizado de la biomasa *Pennisetum purpureum* 90 días; Angélica R. 2022.

PP 90 DÍAS AL MOMENTO DEL PELETIZADO.

REPLICAS	Masa (g)	Radio (cm)	Altura (h) cm	Volumen cm ³	Densidad g/cm ³
1	0,1367	0,82	1	2,1124069	0,064712911
2	0,1734	0,82	1,1	2,32364759	0,074624053
3	0,1873	0,82	1,4	2,95736966	0,063333307
4	0,2145	0,82	1,4	2,95736966	0,072530669
5	0,2365	0,82	1,5	3,16861035	0,074638398
6	0,2446	0,82	1,5	3,16861035	0,077194724
7	0,2745	0,82	1,6	3,37985104	0,081216597
8	0,2861	0,82	1,6	3,37985104	0,084648701
9	0,3257	0,82	2	4,224813801	0,077092155
10	0,3499	0,82	2,01	4,24593787	0,082408177
11	0,358	0,82	2,3	4,858535871	0,07368475
12	0,3899	0,82	2,5	5,281017251	0,073830473

TOTAL

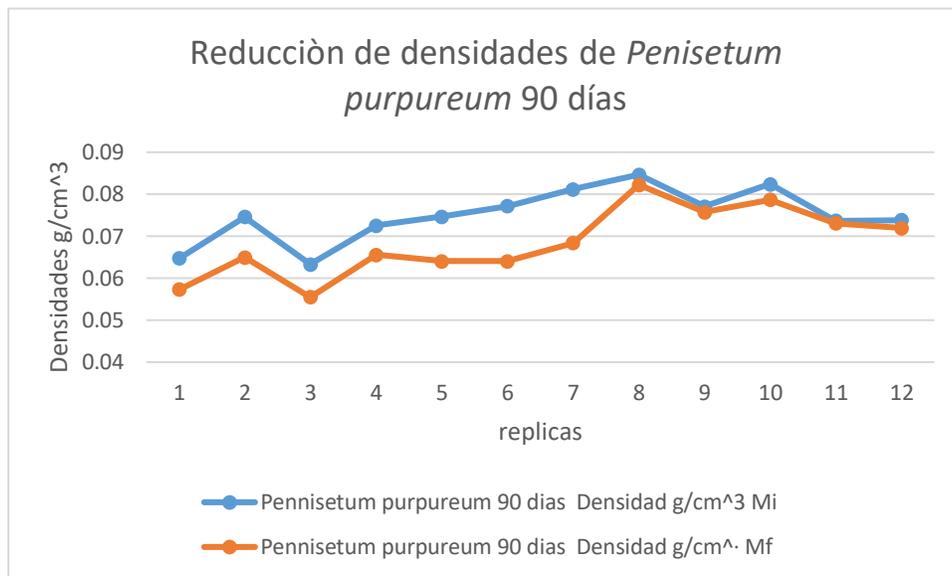
0,074992909

**Tabla 18. Densidades después de 72 hrs de secado natural de la biomasa de
Pennisetum purpureum 90 días; Angélica R. 2022.**

PP90 DÍAS DESPUÉS DE 72 HRS DE SECADO NATURAL

REPLICAS	Masa (g)	Radio (cm)	Altura (h) cm	Volumen cm ³	Densidad g/cm ³
1	0,121	0,82	1	2,1124069	0,05728063
2	0,151	0,82	1,1	2,32364759	0,06498404
3	0,164	0,82	1,4	2,95736966	0,05545468
4	0,194	0,82	1,4	2,95736966	0,06559883
5	0,203	0,82	1,5	3,16861035	0,06406594
6	0,203	0,82	1,5	3,16861035	0,06406594
7	0,231	0,82	1,6	3,37985104	0,06834621
8	0,278	0,82	1,6	3,37985104	0,08225215
9	0,32	0,82	2	4,2248138	0,07574298
10	0,334	0,82	2,01	4,24593787	0,07866342
11	0,355	0,82	2,3	4,85853587	0,07306728
12	0,38	0,82	2,5	5,28101725	0,07195583
TOTAL					0,06845649

Grafica 5. Reducción de densidades de Mi y el Mf de la biomasa *Pennisetum purpureum* 90 días; Angélica R. 2022



A partir de la gráfica y tabla anteriores de la biomasa de Pp90 días, se logra deducir que las mayores densidades y pérdidas de estas, se ven reflejadas en los 7 primeros pellets, luego la relación se vuelve un poco más homogénea. El comportamiento de pérdida de densidades en los pellets del momento inicial (0,074992909 g/cm³) en base a los pellets del momento final (0,068456495 g/cm³) corresponde a una pérdida total de 0,006536415 g/cm³, es decir que luego de 72 horas la densidad en general de los pellets se reduce un 8,72%.

Tabla 19. Densidades de la biomasa de *Pennisetum purpureum* 120 al momento de la peletización; Angélica R. 2022.

PP 120 DÍAS AL MOMENTO DEL PELETIZADO

REPLICAS	Masa (g)	Radio (cm)	Altura (h) cm	Volumen cm ³	Densidad g/cm ³
1	0,1994	0,82	0,9	1,90116621	0,104882992
2	0,2213	0,82	1,1	2,32364759	0,095238194
3	0,233	0,82	1,1	2,32364759	0,100273381
4	0,249	0,82	1,21	2,556012349	0,09741737
5	0,2503	0,82	1,3	2,74612897	0,091146484
6	0,2663	0,82	1,33	2,809501177	0,094785509
7	0,2694	0,82	1,5	3,16861035	0,085021498
8	0,2701	0,82	1,6	3,37985104	0,079914765
9	0,2912	0,82	1,6	3,37985104	0,086157643
10	0,3009	0,82	1,73	3,654463937	0,082337657
11	0,3256	0,82	1,82	3,844580558	0,084690643
12	0,3578	0,82	2,01	4,24593787	0,084268779
TOAL					0,090511243

Tabla 20. Densidades después de 72 hrs de la Biomasa *Pennisetum purpureum*

120 días; Angélica R.2022.

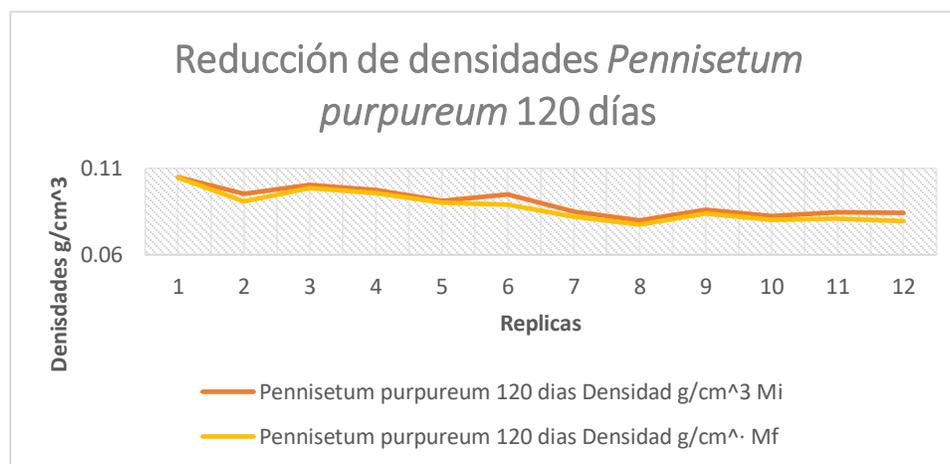
PP120 DÍAS DESPUES DE 72 HRS DE SECADO AL NATURAL

REPLICAS	Masa (g)	Radio cm	Altura (h) cm	Volumen cm ³	Densidad g/cm ³
-----------------	-------------	-------------	------------------	----------------------------	-------------------------------

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
TÉRMICA.

1	0,199	0,82	0,9	1,90116621	0,10467259
2	0,211	0,82	1,1	2,32364759	0,09080551
3	0,229	0,82	1,1	2,32364759	0,09855195
4	0,245	0,82	1,21	2,55601235	0,09585243
5	0,248	0,82	1,3	2,74612897	0,09030894
6	0,25	0,82	1,33	2,80950118	0,08898377
7	0,26	0,82	1,5	3,16861035	0,0820549
8	0,262	0,82	1,6	3,37985104	0,07751821
9	0,283	0,82	1,6	3,37985104	0,0837315
10	0,293	0,82	1,73	3,65446394	0,08017592
11	0,311	0,82	1,82	3,84458056	0,08089309
12	0,338	0,82	2,01	4,24593787	0,0796055
TOTAL					0,08776286

Grafica 6. Reducción de densidades del Mi y Mf en la biomasa de *Pennisetum purpureum* de 120 días; Angélica R. 2022.



A partir de la gráfica y tablas anteriores de la biomasa de *Pennisetum purpureum* 120 días se logra inferir que fueron los pellets más constantes es decir, que su reducción de densidades se dio de manera homogénea en casi todas las réplicas, a excepción del pellet número 6 que obtuvo la mayor pérdida de densidad. . El comportamiento de pérdida de densidades en los pellets del momento inicial (0,090511243g/cm³) en base a los pellets del momento final (0,087762859 g/cm³) corresponde a una pérdida total de 0,002748384 g/cm³, es decir que luego de 72 horas la densidad en general de los pellets se reduce un 3,03%.

Tabla 21. Densidades de las 5 biomásas en el Mi y Mf; Angélica R. 2022.

Densidades Promedio de las 5 Biomásas (g/cm³)					
Momento	<i>Eg</i>	<i>Pp</i>	<i>Bm</i>	<i>Pp 90 días</i>	<i>Pp 120 días</i>
Momento Inicial (Mi)	0,11637776	0,09543972	0,07871458	0,07499291	0,09051124
					A
Momento Final (Mf)	0,10488843	0,0828242	0,07491727	0,06845649	0,08776286
					B

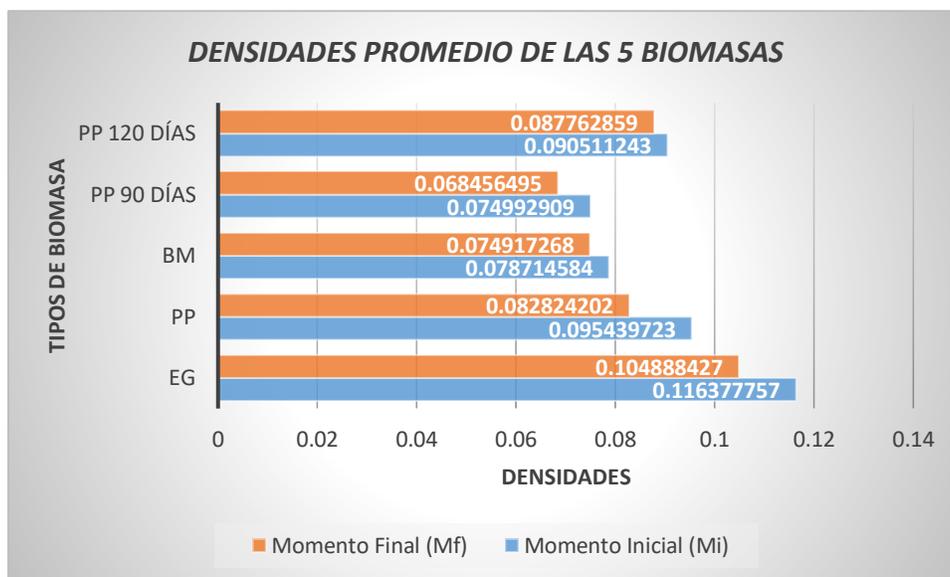
CV: coeficiente de variación. Medias en columnas seguidas por letras

diferentes son significativamente diferentes (p<0.05), prueba de rangos múltiples de

Duncan.

El análisis de Duncan`s arrojo que la variable densidad no posee relación alguna con las medias de sus variables en base a los 5 tipos de biomásas diferentes.

Grafica 7. Densidades promedio de las 5 Biomasa en Mi y Mf; Angélica R. 2022.



Según la gráfica y tabla anterior, las mayores densidades tanto en el momento inicial como en el momento final, pertenecen a la biomasa natural de *Eucalyptus globulus L*, la densidades más bajas tanto en su momento inicial como en su momento final corresponden a la de la biomasa de *Pennisetum purpureum* 90 días

Según la norma DIN EN 14961-6 donde se categoriza la calidad de los pellets de especies maderables y no maderables decreta que para especies maderables como lo es el *Eucalyptus globulus L* y el *Pinus patula S.C* poseen la densidad necesaria para estipularse como pellets de categoría A1, es decir que son pellets con las mejores capacidades de compactación, por consiguiente sus contenidos de humedad, cenizas y esfuerzo de compresión serán muy altos.

Para pellets de especies no maderables, como los es el caso de el Bagazo de Maiz *Zea mayz L.* y Pp90 y Pp120 días, según la misma nota se categorizan también como pellets tipo

A1 pero con la gran diferencia que las variables anteriormente ya nombradas no van a poseer el mismo rango máximo. Pegoretti Leite De Souza 2020 (13).

Adicionalmente se logra notar que las menores reducciones de densidades en un secado previo al natural por un lapso de 72 horas la obtuvo la biomasa de *Pennisetum purpureum* de 120 días.

4.5 Análisis y resultados de Humedad para los diferentes tipos de biomasa.

**Tabla 22. Humedades de las 5 biomasa a los 10 min; 30 min y 2h en horno;
Angélica R. 2022.**

Humedad 10 min horno- 10 min desecador			
Biomasa	Masa	Masa	%
	inicial (g)	final (g)	Humedad
Eucalyptus globulus	2	1,875	6,25
Pinus patula	2	1,904	4,8
Bagazo de Maiz	2	1,894	5,3
Pennisetum purpureum 90	2	1,916	4,2
días			
Pennisetum purpureum 120	2	1,866	6,7
días			
Humedad 30 min horno- 30 min desecador			

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

Biomasa	Masa inicial (g)	Masa final (g)	% Humedad
Eucalyptus globulus	2	1,871	6,45
Pinus patula	2	1,827	8,65
Bagazo de Maiz	2	1,881	5,95
Pennisetum purpureum 90 días	2	1,854	7,3
Pennisetum purpureum 120 días	2	1,835	8,25
Humedad 2h horno- 30 min desecador			
Biomasa	Masa inicial (g)	Masa final (g)	% Humedad
Eucalyptus globulus	2	1,853	7,35
Pinus patula	2	1,817	9,15
Bagazo de Maiz	2	1,853	7,35
Pennisetum purpureum 90 días	2	1,854	7,3
Pennisetum purpureum 120 días	2	1,823	8,85

Tabla 23. Humedad a las 24 hrs de los 5 diferentes tipos de biomasa Angélica

R. 2022.

Humedad 24h horno- 30 min desecador			
Biomasa	Masa inicial (g)	Masa final (g)	%Humedad
<i>Eucalyptus globulus</i>	2	1,838	8,1
	2	2	8,15
	2	1,837	8,15
Promedio Eg			8,133333333 A
<i>Pinus patula</i>	2	1,81	9,5
	2	1,811	9,45
	2	1,81	9,5
Promedio Pp			9,483333333 B
Bagazo de Maiz	2	1,833	8,35
	2	1,847	7,65
	2	1,844	7,8
Promedio Bm			7,933333333 C
Pennisetum purpureum 90 días	2	1,813	9,35
	2	1,811	9,45
	2	1,815	9,25
Promedio P90			9,35 D

Pennisetum	2	1,804	9,8
purpureum 120 días			
	2	1,811	9,45
	2	1,811	9,45
Promedio 120			9,6 E

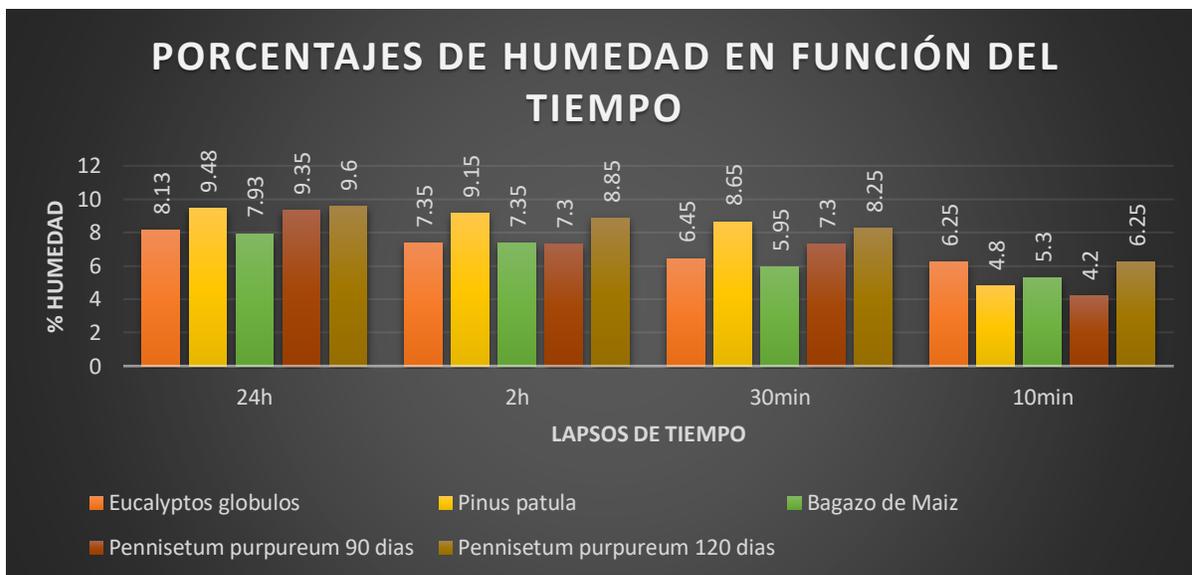
CV: coeficiente de variación. Medias en columnas seguidas por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$), prueba de rangos múltiples de Duncan.

El análisis de Duncan's arroja que la variable humedad no posee relación alguna con las medias de sus variables en base a los 5 tipos de biomásas diferentes.

Tabla 24. Promedios de las humedades 10min, 30min, 2h, 24h, de las 5 Biomásas; Angélica R. 2022.

<i>Promedio de humedades%</i>	<i>24h</i>	<i>2h</i>	<i>30min</i>	<i>10min</i>
<i>Eucalyptus globulus L</i>	8,13	7,35	6,45	6,25
<i>Pinus patula S.C</i>	9,48	9,15	8,65	4,8
<i>Bagazo de Maiz Zea mayz</i>	7,93	7,35	5,95	5,3
<i>L</i>				
<i>Pennisetum purpureum 90 días</i>	9,35	7,3	7,3	4,2
<i>Pennisetum purpureum 120 días</i>	9,6	8,85	8,25	6,25

Grafica 8. Porcentajes de Humedad en función del tiempo de las 5 biomásas;
Angélica R. 2022.



Según las gráficas y tablas anteriormente expuestas se logra deducir que las menores humedades corresponden a la biomasa de *Eucalyptus globulus L* y Bagazo de maiz *Zea mayz L*, predicción acertada con respecto a los contenidos de densidad anteriormente ya descritos.

Por otra parte se logra denotar que los cambios de humedad entre los 10 minutos y las 2 horas en bastante notorio, mientras que después de las 2 horas a las 24, con el lapso de tiempo tan abrupto, la pérdida de humedad no es muy amplia.

Según la norma en la que hemos venido trabajando la DIN EN 14961-1 para especies maderables como el *Eucalyptus globulus L* y el *Pinus patula S.C* se deduce que su humedad se encuentra por debajo del 11% lo que las hace categorizar en tipos de pellets A1.

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

Para especies no maderables como pp90, pp120 y Bagazo de maiz la misma norma estipula que valores por debajo del 13% pertenecen a la categoría de pellets A1, estos tres tipos de biomasa cumplen con el requisito,

Gracias a la reducción de la humedad los pellets mejoraran su calidad para desintegrarse.

En este momento se logra determinar que las predicciones de altos contenidos de fibra, potencial energético, análisis elemental y densidades con respecto a la humedad han sido una respuesta verídica positiva, ya que hasta el momento la especie de *Eucalyptus globulus L* ha sido una biomasa potencial para la generación de pellets. Zapata Saad, A. J. (2016) (52).

4.6 Porcentaje de durabilidad de los pellets de las 5 biomosas

Porcentaje de durabilidad de los 5 tipos de biomosas					
	1	2	3	4	Promedio %
<i>Eucalyptus globulus</i>	36,9791667	98,630137	55,8739255	63,7362637	63,8048732 A
<i>Pinus patula</i>	63,5555556	56,6210046	56,744186	34,7826087	52,9258387 B
Bagazo de Maiz	99,3710692	97,5369458	97,5903614	98,7261146	98,3061228 C
<i>Pennisetum purpureum</i> 90 días	79,1489362	98,1395349	88,8392857	98,9189189	91,2616689 D

Pennisetum purpureum 120 días	84,5070423	59,3406593	48,7179487	99,5918367	73,0393718 E
--------------------------------------	------------	------------	------------	------------	--------------

Tabla 25. Porcentajes de durabilidad de los 5 tipos de biomazas; Angélica R.

2022

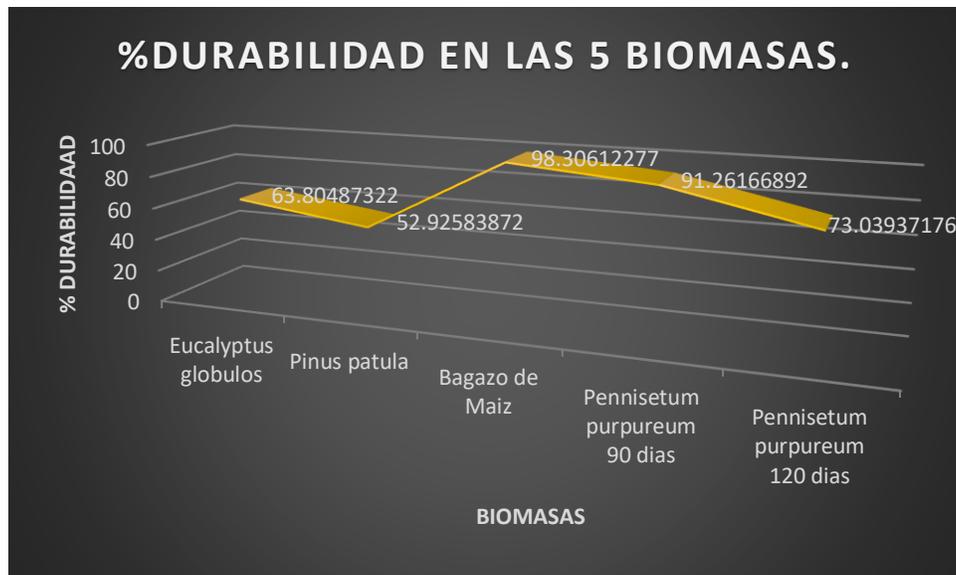
CV: coeficiente de variación. Medias en columnas seguidas por letras

diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$), prueba de rangos múltiples de

Duncan.

El análisis de Duncan's arrojó que la variable porcentaje de durabilidad no posee relación alguna con las medias de sus variables en base a los 5 tipos de biomazas diferentes.

Grafica 9. % Durabilidad en las 5 biomazas; Angélica R. 2022



Según las tablas y la gráfica la biomasa con más durabilidad mecánica es el bagazo de maiz Zea mayz L, esta biomasa después de compactada es la más resistente a los golpes;

y según la norma DIN EN 14961-1 de especies no maderables, es la única biomasa que clasifica en durabilidad de tipo A1, puesto que seguida a este porcentaje se encuentra la biomasa de Pp90, pero por su valor de porcentaje y según la norma no clasifica para la categoría, sino para la categoría B, junto con los demás tipos de biomásas. Esto quiere decir que los pellets de tipo B, serán un problema en temas de empaçado, apilado y transporte, ya que tenderán a des compactarse y desintegrarse. Husain et (2018) (56).

Este porcentaje de durabilidad mecánica se ve muy sujeto a la masa de los pellets, es notorio que entre más pese el pellets, su durabilidad va a ser menor, ya que la fuerza que se aplica en el recorrido será mayor a medida que aumenta su peso, por consiguiente sus velocidades, aceleraciones e impacto serán más fuertes. Murcia Palacios, D. A., & González Vera, A. F. (2020) (57).

4.7 Esfuerzo de compresión

TABLA 26. Esfuerzo de compresión de los diferentes tipos de biomásas;

Angélica R. 2022.

<i>Biomasa</i>	<i>Altura de los pellets cm</i>	<i>Radio Pellets cm</i>	<i>Volumen pellets cm³</i>	<i>Fuerza de Compresión (N)</i>
<i>Eucalyptus globulus L</i>	1,51	0,82	3,189734419	24828,79 A
<i>Pinus patula S.C</i>	1,331	0,82	2,811613584	15344,84 B

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

Bagazo de Maiz	1,22	0,82	2,577136418	29331,89
mayz L				C
Pennisetum purpureum	1,43	0,82	3,020741867	16966,74
90 días				D
Pennisetum purpureum	1,618	0,82	3,417874365	15501,64
120 días				E

CV: coeficiente de variación. Medias en columnas seguidas por letras

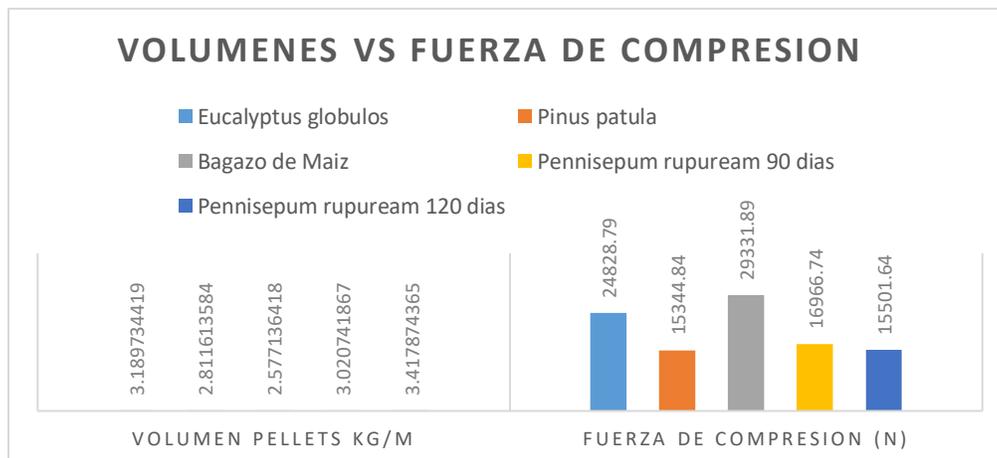
diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$), prueba de rangos múltiples de

Duncan.

El análisis de Duncan's arrojo que la variable esfuerzo de compresión no posee relación alguna con las medias de sus variables en base a los 5 tipos de biomásas diferentes.

Grafica 10. Volúmenes Vs Fuerza de compresión de los 5 tipos de biomásas.

Angélica R. 2022



Las gráficas y tablas muestran que las biomásas más resistentes antes de su momento de ruptura son las el Bagazo de maiz con capacidad de resistir 29331, 89 Newton de fuerza, seguido por el Pp120 con capacidad de resistir 24828,79 Newton de fuerza.

Los otros tres tipos de biomasa poseen casi el 60% de fuerza que soportan las dos biombras anteriormente ya descritas. La capacidad de soportar altas fuerzas antes del momento de ruptura, se debe al contenido de lignina, entre más altas sean estos valores mayores serán las probabilidades que resistencia a la compresión, pero no solo la lignina es la variable significativa, la humedad también juega un papel muy importante, entre menor cantidad de humedad se encuentre mayores serán las capacidades de esfuerzo. Pegoretti Leite Souza 2020 (13).

Según nuestros resultados las mayores cantidades de lignina las poseen las especies Eg y Pp, y según la discusión deberían ser las biombras con mayor capacidad de esfuerzo. ¿Por qué no lo son?, la respuesta se encuentra refutada en el trabajo del señor González-Díaz, et al 2019 (52) es muy posible que los pellets que se hallan escogido para esta muestra hayan constado de grietas que hicieron que la capacidad de aguante al esfuerzo disminuyera, y es correcto, ya que al momento del hacer las pruebas uno de los dos pellets resistió casi todo el peso del total del promedio de los dos pellets.

Adicionalmente es de notar que pequeñas cantidades de volúmenes de estas biombras compactadas tienen una amplia capacidad para lograr resistir fuerzas de compresión tan concentradas la relación denota que a mayor volumen mayor resistencia.

Según la investigación de Rojas Correa, V. (2020) (46). Sus fuerzas de deformidad oscilan entre 2,3 y 3 kg N, resultados son menores a los de nuestra investigación.

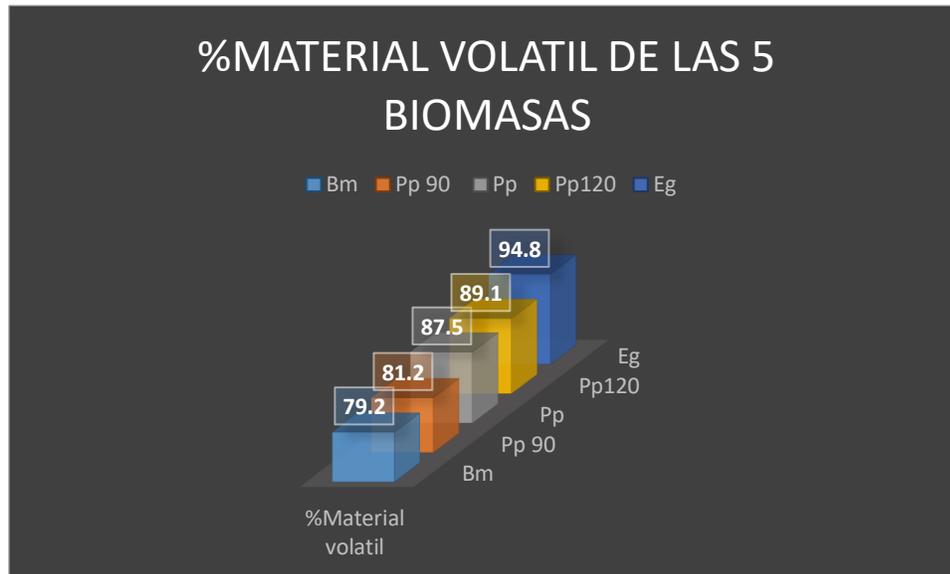
4.8 Material volátil análisis y resultados.

Tabla 27 Porcentaje de material volátil de las 5 especies de biomasa; Angélica

R. 2022.

Biomasa	Replicas	Masa Base Húmeda	Masa Base Seca	Masa Cenizas	%humedad	%Masa final	% Material volátil
Eucalyptus globulos	1	0,259	0,248	0,005	4,25	98,0694981	93,82
	2	0,227	0,219	0,004	3,52	98,2378855	94,71
	3	0,12	0,118	0,003	1,67	97,5	95,83
Promedio Eg							94,79
Pinus patula	1	0,229	0,221	0,013	3,49	94,3231441	90,83
	2	0,163	0,157	0,024	3,68	85,2760736	81,60
	3	0,251	0,249	0,023	0,80	90,8366534	90,04
Promedio Pp							87,49
Bagazo de Maiz	1	0,191	0,187	0,036	2,09	81,1518325	79,06
	2	0,243	0,236	0,034	2,88	86,0082305	83,13
	3	0,184	0,179	0,04	2,72	78,2608696	75,54
Promedio Bm							79,24
Pp 120	1	0,282	0,278	0,019	1,42	93,2624113	91,84
	2	0,203	0,201	0,03	0,99	85,2216749	84,24
	3	0,203	0,2	0,015	1,48	92,6108374	91,13
Promedio Pp 120							89,07
Pp 90	1	0,108	0,106	0,028	1,85	74,0740741	72,22
	2	0,149	0,148	0,021	0,67	85,9060403	85,23
	3	0,216	0,208	0,022	3,70	89,8148148	86,11
Promedio Pp90							81,19

Grafica 11. % de material volátil de las 5 biomásas; Angélica R. 2022



El contenido de material volátil es de vital importancia en la velocidad de combustión, ya que en un combustible rico en materiales volátiles conllevará a que estos se desprendan más rápido, produciéndose una disminución en su masa y formándose gases que arden rápidamente, por tanto debe haber una menor producción de hollín, monóxido de carbono e hidrocarburos y se esperaría una combustión completa. De otro lado, el alto contenido de material volátil ayuda a que la llama en el proceso de combustión sea de mayor longitud. Por consiguiente, al tener los pellets un alto porcentaje de volatilidad (> 50%), se demuestra que estos arden con gran facilidad, generando una llama en el proceso de combustión de muy buena calidad. También se comparó el porcentaje de material volátil (MV) con la investigación de Gallipolliti et al 2018 (50), en donde registraron un 60.90% de MV, indicando que el porcentaje reportado en esta investigación de nuestras 5 biomásas es mucho mayor.

Loa altos porcentajes de material volátil representan menores porcentajes de cenizas y menores porcentajes de contaminación ambiental, ya estos altos valores no generan humo, principal residuo gaseoso que logra contaminar.

Según la matriz de correlación de la estadística aplicada a el diseño completamente al azar, se logra argumentar que el hidrogeno y el material volátil poseen una relación del 83%, es decir que son variables que se complementan la una de la otra, a mayor porcentaje de hidrogeno mayores porcentajes de material volátil, esta relación es verídica, ya que la biomasa de *Eucalyptus globulus L.* es la que contiene los mayores porcentajes de hidrogeno y los mayores porcentajes de material volátil.

4.9 Análisis y resultados de %Cenizas

Tabla 28 Promedio de cenizas de las 5 biomosas; Angélica R. 2022

Biomasa	Replica	Peso	Peso	%Ceniza
s	s	Base Húmeda	Cenizas	s
Pp	1	2	0,03	1,5
	2	2	0,028	1,4
	3	2	0,026	1,3
Promedio Pp				1,4
A				
Bm	1	2	0,05	2,5
	2	2	0,051	2,6

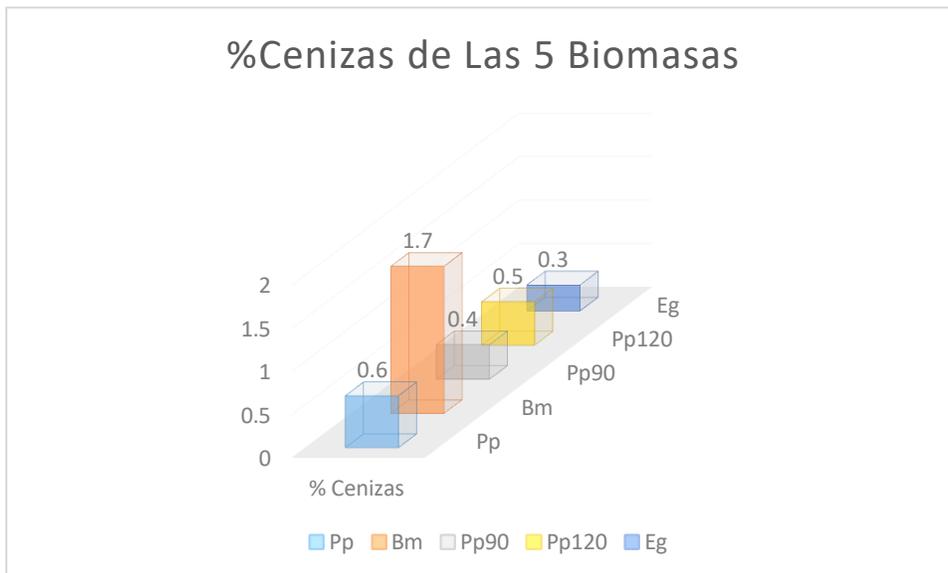
CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

	3	2	0,059	3,0
Promedio Bm				2,7
				B
Pp90	1	2	0,02	1,0
	2	2	0,021	1,1
	3	2	0,019	1,0
Promedio Pp90				1,0
				C
Pp 120	1	2	0,017	0,9
	2	2	0,015	0,8
	3	2	0,009	0,5
Promedio Pp 120				0,7
				D
Eg	1	2	0,006	0,3
	2	2	0,005	0,3
	3	2	0,004	0,2
Promedio Eg				0,3
				E

CV: coeficiente de variación. Medias en columnas seguidas por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$), prueba de rangos múltiples de Duncan.

El análisis de Duncan's arrojó que la variable porcentaje de cenizas no posee relación alguna con las medias de sus variables en base a los 5 tipos de biomásas diferentes.

Graficas 12. Porcentajes de cenizas de las 5 Biomosas; Angélica R. 2022.



Las cenizas generadas durante la combustión del biocombustible, es clave para determinar la calidad, y aunque también va a depender del equipo donde se quema el pellet, en condiciones de diseño óptimas, el porcentaje de cenizas sobre la masa total de pellets debe ser inferior al 0,7% en biomosas maderables, estos según la norma DIN EN 14961-1, con respecto a esto nuestras biomosas Eg y Pp poseen valores de 0,3 y 0,6, lo que conlleva a la producción de pellets de categoría tipo A.

Con respecto a la misma norma y para especies no maderables, nuestras biomosas de Pp 90 y Pp120 respetan los valores estipulados, es decir valores entre rangos menores a 0,5, dado como resultado pellets de tipo A1.

El bagazo de maiz *Zea mayz L.* es la única biomasa que no respeta los rangos de la norma, conllevando a si a ser un pellet de tipo B, es decir un pellet poco favorable para la venta y transporte. Pegoretti de Souza 2020 (13).

Según contenidos de lignina, densidad, fibras, análisis elemental y humedad, corroboran que la especie de *Eucalyptus globulus L* es la pionera en esta variable (Cenizas), dependiente de las variables nombradas anteriormente.

4.10 Análisis y Discusión de Resistencia a la humedad.

Tabla 29 Variables para hallar la resistencia a la húmeda de las 5 biomasas; Angélica R. 2022.

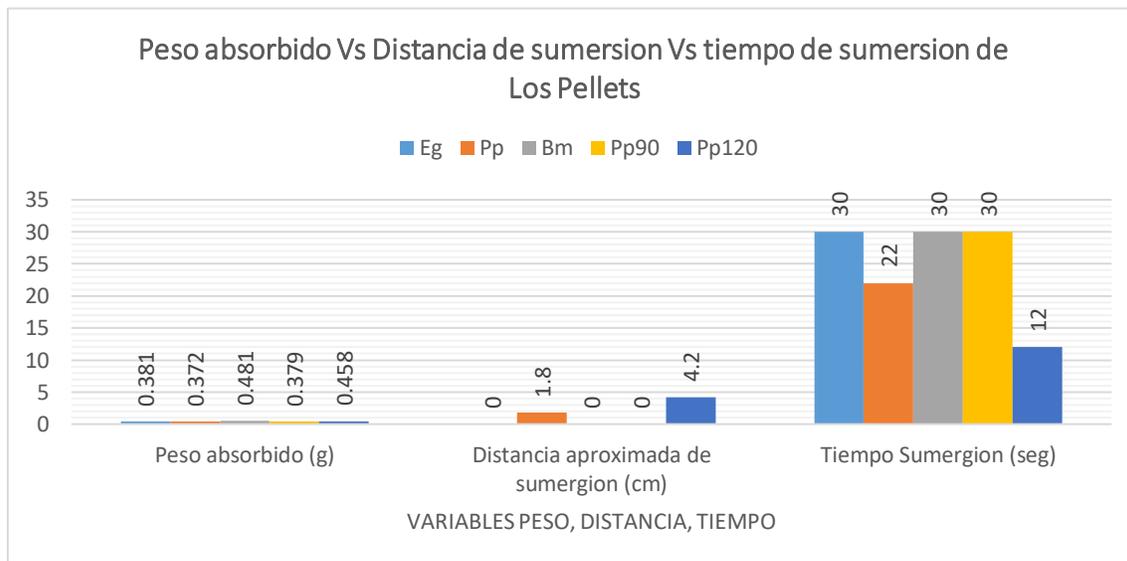
Biom sas	Peso Inicial del pellet	Pes o final del pellet	Peso absorbido (g)	Distan cia aproximada de sumersión (cm)	Tiem po Sumersión (seg)
Eg	0,22 3	0,6 04	0,381 A	0	30
Pp	0,14 3	0,5 15	0,372 B	1,8	22
Bm	0,15 5	0,6 36	0,481 C	0	30
Pp90	0,18 4	0,5 63	0,379 B	0	30
Pp120	0,24 4	0,7 02	0,458 D	4,2	12

CV: coeficiente de variación. Medias en columnas seguidas por letras

diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$), prueba de rangos múltiples de Duncan.

El análisis de Duncan's arrojó que la variable resistencia a la húmeda contiene dos biomasas que no poseen diferencias significativas, estas pertenecen a las biomasas Pp y Pp 90 días, las tres restantes biomasas poseen diferencias significativas.

Grafica 13. Peso absorbido Vs Distancia de sumersión Vs tiempo de sumersión de Los Pellets de las 5 biomosas; Angélica R. 2022.



A partir de las gráficas y las tablas se puede denotar que la especie *Eucalyptus globulus L* logro soportar 0, 381 gramos de agua, sin lograr sumergirse durante un lapso de 30 seg, el Bagazo de maiz *Zea mayz L*. fue la biomasa que logro soportar casi 3 veces su peso seco en absorción de agua sin lograr sumergirse en un lapso de 30 seg, situación que también le sucedió al Pp90 días.

La resistencia a la absorción son mayores en las tres biomosas anteriormente ya nombradas, esto se logra gracias a la densidad y la buena compactación se poseen desde el momento del pelletizado estas 3 biomosas, porque sus contenidos de lignina, y baja humedad hacen que la compactación del pellets sea mayor, dejando así pocos espacios porosos. Pegoretti de Souza 2020 (13).

4.11 Análisis y resultados de procesos de calcinación.

4.11.1 Calcinación en estufa convencional.

A: Tiempo en que el pellet se encendió totalmente

B: Tiempo de calcinación.

Tabla 30 Tiempo de calcinación de las 5 biomásas en estufa convencional.

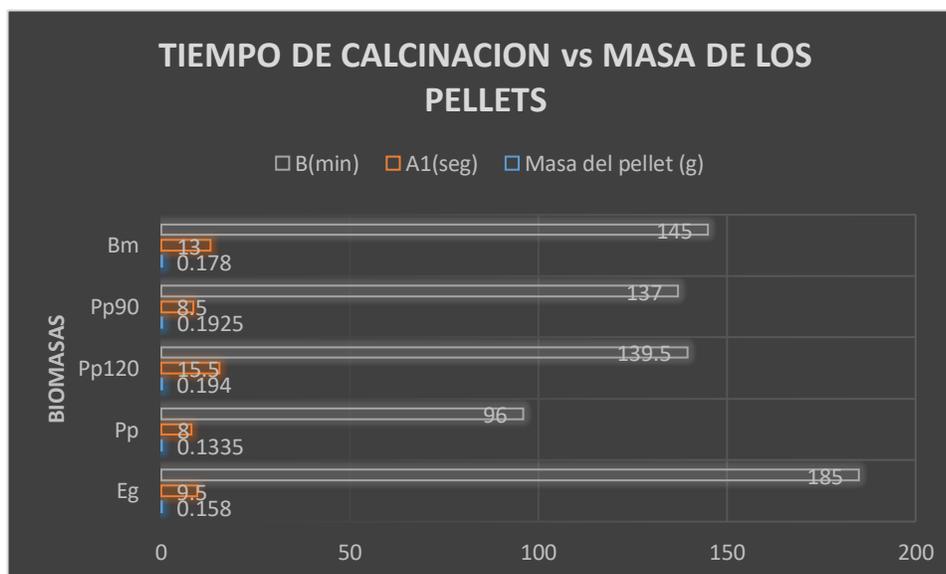
Estufa convencional 80°C				
Biomasa	Replica	Masa del pellet (g)	A (seg)	B(min)
Eg	1	0,142	8	177
	2	0,174	11	185
Promedio Eg		0,158	9,5	181
A				
Pp	1	0,143	7	90
	2	0,124	9	102
Promedio Pp		0,1335	8	96
B				
Pp120	1	0,18	18	139
	2	0,208	13	140
Promedio Pp120		0,194	15,5	139,5
C				
Pp90	1	0,186	10	128
	2	0,199	7	146

Promedio Pp90		0,1925	8,5	137
D				
Bm	1	0,158	13	138
	2	0,198	13	152
Promedio Bm		0,178	13	145
E				

CV: coeficiente de variación. Medias en columnas seguidas por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$), prueba de rangos múltiples de Duncan.

El análisis de Duncan's arrojó que la variable tiempo de calcinación en estufa convencional no posee relación alguna con las medias de sus variables en base a los 5 tipos de biomasas diferentes.

Grafica 14. Tiempo de calcinación en estufa convencional Vs Masa de los pellets de las 5 biomasas; Angélica R. 2022.



Los tiempos de calcinación fueron bastante largos, la mayor capacidad de aguante de calcinación hasta el momento de cenizas fue la biomasa Eg con 185 minutos de duración y un peso de 0,158g, seguida por el bagazo de maiz con 145 min y un peso de 0,178g.

Los Pp90 y 120 tienen una similitud en su tiempo de calcinación, los minutos de diferencia son 2,5min siendo Pp120 el más resistente con un peso de 0,194.

La biomasa de Pp fue la menor en resistir el proceso de calcinación.

En 4 de las 5 biomásas se da la relación que a mayor peso o masa de las muestras mayor es el tiempo de calcina, pero este no depende solamente del peso del pellet, también se debe a el contenido de humedad y el poder energético, que como ya fue expuesto, la biomasa de Eg se llevó los mayores rangos el poder energético, material volátil y los menores rangos en humedad, valores óptimos para un mejor proceso de calcinación.

Es necesario aportar que la duración de calcinación en estufa convencional pudo verse tan larga por la intervención del aire, humedad relativa etc. Raúl Andrés Molina Benavides 2017 (30).

Según la matriz de correlación de la estadística aplicada a el diseño completamente al azar, se logra argumentar que el carbón, y el proceso de quemado ya sea en estufa convencional o torrefacción, posee una relación de 93%, es decir que son variables que se complementan la una de la otra. Las biomásas que poseen mayores porcentajes de carbono, por consiguiente van a tener mayores tiempos para su proceso de calcinación, esto argumenta

y corrobora los párrafos anteriormente ya nombrados, donde se destaca la biomasa de *Eucalyptus globulus L* por sus altos valores de carbono y su largo proceso de quemado.

4.11.2 Calcinaciones por torrefacción

Tabla 31. Temperaturas y Calcinación de las 5 Biomosas por torrefacción.

Angélica R. 2022

Torrefacción

<i>Tiempo</i>	Temperatura(°C)	Cenizas
<i>Mufla (m)</i>		
4	200	Pp90
8	203	Pp120
12	200	Bm
20	205	O
40	207	Pp
48	210	Eg

En esta tabla se logra ver la reducción de tiempo de la calcinación de las 5 biomosas, el cambio de temperatura y tiempo hace un proceso lento o rápido de calcinación es decir, si la temperatura fuese constate 200°C, los tiempos para para calcinación de biomosas Pp120 Pp y Eg aumentarían, lo mismo sucede con la temperatura, se da una relación inversamente proporcional.

No obstante tanto por calcinación con estufa convencional, como por torrefacción la biomasa Eg es la que posee la capacidad de resistir y generara calor por un lapso de tiempo relativamente largo en comparación a las 4 biomosas restantes.

La calcinación por torrefacción es menor, porque el medio donde suele suceder esta transformación de materia, es un espacio cerrado donde no penetren factores bióticos como el aire y la humedad relativa, además el control de la temperatura es exacto.

5. CONCLUSIONES

Los altos porcentajes de hidrogeno, los bajos porcentajes de nitrógeno, altos porcentajes de lignina y altos porcentajes de carbono según el análisis elemental generaran un nivel bajo de cenizas y viceversa. En este caso los mejores porcentajes de análisis elemental los obtuvo la biomasa de *Eucalyptus globulus L*, por consiguiente esta biomasa debería ser la que menos % de cenizas arrojara, y en consecuencia según los resultados, la teoría es afirmativa, ya que esta biomasa arrojó los menores % de cenizas 0,03.

Los contenidos de FDA, FDN, lignina y porcentajes de humedad son las variables que afectan positiva o negativamente la compactibilidad de los pellets ya que a mayores porcentajes de FDA; FDN; lignina y menores porcentajes de humedad la adhesión de las paredes será mayor, esto se ve reflejado en las densidades de los pellets, siendo el de mayores densidades el *Eucalyptus globulus L* y el de menores densidades el Pp 90 días

Las pérdidas de material tanto en el proceso de secado molienda y tamizado, en casi todas las biomásas fueron en un rango del 50%-80%, esto es debido a factores bióticos como el aire y la humedad relativa.

Según los lapsos de tiempo que se tomaron para determinar humedades, se puede concluir que la pérdida de humedad en el horno es mayor durante las primeras 2h, la reducción de estas humedades mejoro la desintegración de los pellets, pero esta investigación

resultado que la durabilidad y la compresión no dependieron de esta variable, puesto que el Eg y Pp fueron las biomásas con menores humedades, pero no fueron las más aptas para las pruebas mecánicas.

Los pellets de bagazo de maiz *Zea mayz L.* fueron los que resistieron los más grandes porcentajes de durabilidad y compresión, esto se debe a que el material debe contener algún compuesto químico que logre hacer su que su compactibilidad sea muy robusta.

Las 5 biomásas demostraron ser muy fuertes en el proceso de calcinación en estufa convencional, lo que es favorable, puesto que los pellets son más utilizados en procesos de quemado manual, todos lograron lapsos de tiempo bastantes largos, siendo sus masas y volúmenes muy diminutos, esto tambien se debe a los altos porcentajes de potencial energético y material volátil.

Las 5 biomásas logran acoplarse a los rangos que estipulan las normas estas biomásas podrán ser comercializadas y transportadas sin ningún problema ya que su categorización se encuentra en A1, a diferencia del bagazo de maiz *Zea mayz L.* que se encentra en A/B, además de ser un producto totalmente eficaz generando energía térmica, aporta beneficios tambien a nivel ambiental, gracias a sus altos niveles de material volátil, la contaminación por emisiones de humo es casi nula.

La biomasa de *Eucalyptus globulus L* fue la que más se destacó en las propiedades tanto físicas químicas y mecánicas.

6. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se recomienda, estudio de suelos para ver el aporte nutricional a las diferentes biomásas que se recolecten

Hacer los procesos de molienda y tamizado en lugares cerrado y con la mejor maquinaria posible para disminuir las perdidas en polvo.

Comparar diferentes especies de eucalipto para denotar si se encuentran cambios significativos o no

Antes de hacer las pruebas de durabilidad y compresión revisar muy bien que los pellets no posean grietas para que este porcentaje sea más certero

Al momento del peletizado cambiar la mezcla como por ejemplo con melaza y otros, para lograr encontrar diferencias en sus cantidades de humedad y porcentajes de durabilidad y compresión.

Generar un análisis económico, y ambiental de la implementación de los pellets en algún ámbito laboral de nuestra región que su principal base de abastecimiento sea el carbón.

Para futuras investigaciones se recomienda el uso de especies invasoras como biomasa para la generación de energía térmica, con ello se reduce el daño que estas hacen a los bosques y se le saca un provecho benéfico económico potencial

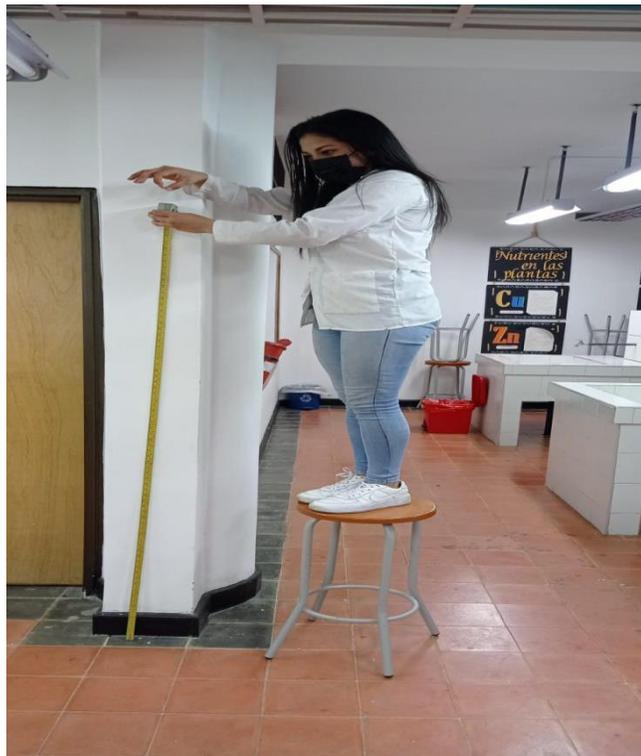
ANEXOS

TODAS LAS IMÁGENES SON DE LA AUTORIA DE LA TESISISTA

Humedad (Peso de la muestras, 24h horno, 30 minutos desecador)



Resistencia al impacto (1,85m)



Esfuerzo de compresión (Fuerzas aplicadas hasta su ruptura)



Cenizas

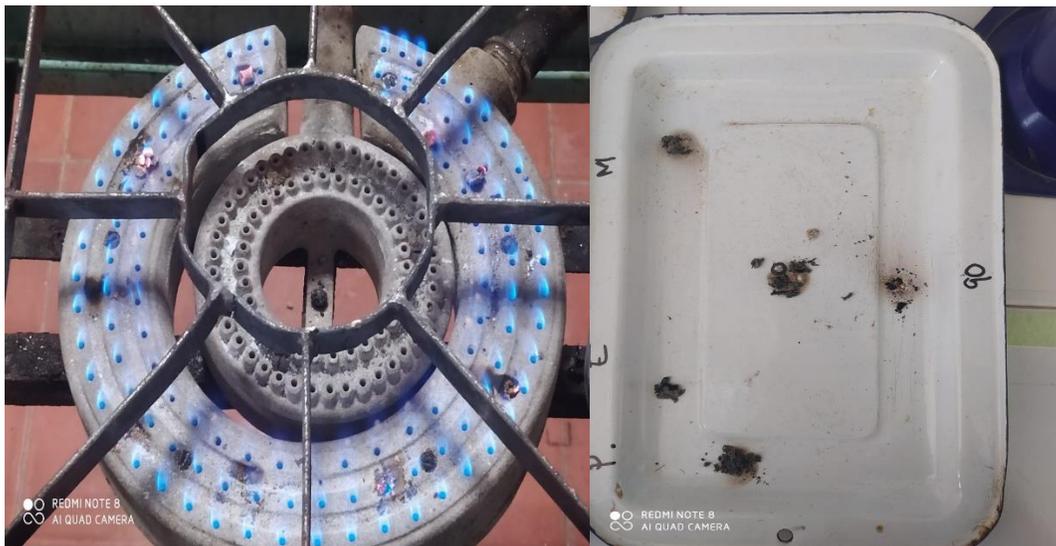


Resistencia a la humedad



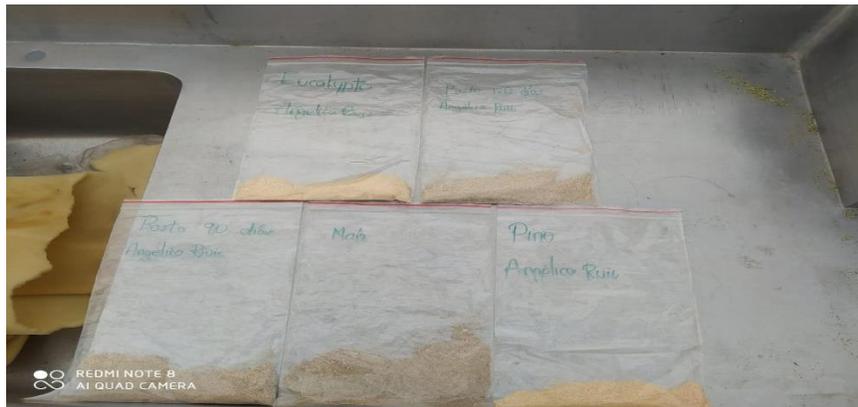
Proceso de quemado

(Estufa convencional –Torrefacción)



CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MECÁNICA DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA.

(QUIMALES- TAMIZADO- SECADO – PELLESTS)



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Restrepo Villada, C. E., & Pimiento Ramírez, J. A. (2018). *Análisis comparativo de la huella de carbono necesaria para la asimilación de las emisiones generadas por la producción del agregado pétreo arena gruesa, utilizando residuos de construcción y demolición (RCD) y de extracción a cielo abierto* (Bachelor's thesis, Escuela de Ingenierías).
2. García Naranjo, G. (2018). *Análisis de viabilidad financiera de un proyecto de generación de electricidad a partir de carbón en Colombia* (Master's thesis, Maestría en Administración Financiera).
3. Bayona Velásquez, E. M. (2016). Exportaciones de carbón y crecimiento económico en la región minera del caribe colombiano. *Revista de economía del caribe*, (17), 1-38.
4. Salazar Yépez, M. A., & Chávez López, A. M. (2018). Diseño del sistema de transporte de carbón para la mina La Maga ubicada en el departamento de Santander.
5. Kana Livandro, R. A., & Malaga Mayta, G. R. (2019). Análisis de riesgo a la salud por exposición de cenizas de carbón de piedra en las ladrilleras artesanales en Yarabamba–Arequipa 2018.
6. Aguilar Sierra, J. M., & Tulcán Álvarez, E. A. (2018). *Estudio del potencial energético de la cascara de arroz ecuatoriano peltizado para su uso como combustible* (Bachelor's thesis, Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química).
7. Bertoglio, C., Figueira, A., Morris, J., & Lafflito, C. (2020). Estudio de potencialidad para el reemplazo de GLP por pellets de madera a base de residuos

forestindustriales aplicado a la provincia de Entre Ríos, Argentina. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 45, 63-69.

8. Iriarte, T. I. P. (2014). Impacto ambiental del polvillo del carbón en la salud en Colombia. *Revista CES Salud Pública*, 5(1), 77-81.

9. Oviedo Doria, H. R., Rodelo De Avila, C. E., & Sierra Hernández, J. D. (2019). Incidencia en la salud y el medio ambiente por el tráfico y/o circulación del carbón en la comunidad del barrio Siape de la ciudad de Barranquilla.

10. Cardoso, A. (2016). Pasivos ambientales de la minería de carbón en Colombia: una aproximación desde la ecología política. *Ecología Política*, (51), 94-98.

11. Correa Álvarez, P. F., González, D., & Pacheco Alemán, J. G. (2016). Energías renovables y medio ambiente: su regulación jurídica en Ecuador. *Revista Universidad y Sociedad*, 8(3), 179-183.

12. Polo Vanegas, A. J. (2019). Evaluación del uso de la biomasa del departamento del Huila en la producción de biocombustible densificado (pellet) de alto poder calorífico.

13. Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020). Evaluación de propiedades de diferentes especies con potenciales energéticos para la elaboración de pellets de calidad con fines energéticos.

14. McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource technology*, 83(1), 47-54

15. Hernández, C. A. S., Antonio, C. G., Trejo, J. F. G., & Pérez, A. A. F. (2020). Revalorización de residuos agrícolas para la producción de pellets combustibles en el estado de Querétaro. *DIGITAL CIENCIA@ UAQRO*, 13(1), 36-45.

16. Callejas, E. S., & Quesada, V. G. (2009). Los Biocombustibles. El Cotidiano núm. 157, 75- 82

17. BADRAN, I. M. R. (2019). Producción de pellets de cascarilla de arroz con máximo contenido energético.

18. Uslu, A., Faaij, A., & Bergman, P. (2008). Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*, 33(8), 1206-1223.

19. Whittaker, C., Shield, I. (2016). 10 - Short rotation woody energy crop supply chains, Editores: Jens Bo Holm-Nielsen, Ehiازه Augustine Ehimen, *Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining*, Woodhead Publishing, 217-248.

20. Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215–232.

21. Mostafa, M., Hu, S., Wang, Y., Su, S., Hu, X., Elsayed, S., & Xiang, J. (2019). The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 332-348. doi: 10.1016/j.rser.2019.01.053

22. Nhuchhen, D., Basu, P., & Acharya, B. (2014). A Comprehensive review on biomass torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2014, 1–56. Doi.org/10.5171/2014.506376.

23. Ghiasi, B., Kumar, L., Furubayashi, T., Lim, C. J., Bi, X., Kim, C. S., & Sokhansanj, S. (2014). Densified biocoal from woodchips: Is it better to do torrefaction before or after densification. *Applie*

24. Zanuncio, A. J. V., Nobre, J. R. C., Motta, J. P., & Trugilho, P. F. (2014). Química E colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Mill ex maiden termorretificada. *Revista Arvore*, 38(4), 765–770. Doi.org/10.1590/S0100-67622014000400020.

25. Shang, L., Nielsen, N. P. K., Dahl, J., Stelte, W., Ahrenfeldt, J., Holm, J. K., Thomsen, T., & Henriksen, U. B. (2012). Quality effects caused by torrefaction of pellets made from Scots pine. *Fuel Processing Technology*, 101, 23–28. Doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.03.013.

26. Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of 141 hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788. Doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013

27. Miranda, M. T., Arranz, J. I., Rojas, S., & Montero, I. (2009). Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest. *Fuel*, 88(11), 2106–2112. Doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.015.

28. Duca, D., Riva, G., Foppa, Pedretti, E., Toscano, G. (2014). Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certification. *Fuel*, 135(2014), 9-14. doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.042.

29. Phanphanich, M., & Mani, S. (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102(2): 1246– 1253. Doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.028.

30. Rodriguez, T. O., Rousset, P. L. (2019). Effects of torrefaction on energy properties of *Eucalyptus grandis* Wood. *Cerne*, 15(4), 446- 452.

31. Pirraglia, A., Gonzalez, R., Saloni, D., Wright, J., & Denig, J. (2012). Fuel properties and suitability of *Eucalyptus benthamii* and *Eucalyptus macarthurii* 135 for torrefied wood and pellets. *BioResources*, 7(1), 217–235. Doi.org/10.15376/biores.7.1.0217-0235.

32. Garcia, D. (2010). Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil. (Tesis de maestría). Universidad Estadual Paulista, São Paulo, Brasil.

33. González, W. A., López, D., & Pérez, J. F. (2019). CARACTERIZACIÓN FÍSICA-QUÍMICA-ENERGÉTICA DE PELLETS DE HOJARASCA RESIDUAL COMO BIOCOMBUSTIBLE RENOVABLE. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*.

34. Demirbaş, A. (2003). Relationships between heating value and lignin, fixed carbon, and volatile material contents of shells from biomass products. *Energy Sources*, 25(7), 629–635. Doi.org/10.1080/00908310390212336

35. Paula PROTÁSIO, T., BUFALINO, L., JÚNIOR, M. G., da Silva CÉSAR, A. A., & TRUGILHO, P. F. CLASSIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS DE BIOMASSA VEGETAL PARA A PRODUÇÃO DE BIOENERGIA CLASSIFICATION OF PLANT BIOMASS FUELS FOR THE PRODUCTION OF BIOENERGY.

36. Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The pellet handbook: The production and thermal utilisation of pellets*. London: Earthscan, 593 p.

37. Reza, M. S., Afroze, S., Bakar, M. S., Saidur, R., Aslfattahi, N., Taweekun, J., & Azad, A. K. (2020). Biochar characterization of invasive *Pennisetum purpureum* grass: effect of pyrolysis temperature. *Biochar*, 2(2), 239-251.

38. Palacios-Cruz, D. J., Héctor, M., Ángeles-Pérez, G., Fierros-González, A. M., & Santiago-García, W. (2020). Sistema de crecimiento y rendimiento para evaluar sumideros de carbono en bosques de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. bajo aprovechamiento forestal. *Agrociencia*, 54(2), 241-257.

39. Silva, M. R. F., McHugh, I., Neto, A. P., Pauwels, V. R. N., Cartwright, I., & Daly, E. (2022). Trading a little water for substantial carbon gains during the first years of a *Eucalyptus globulus* plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 318, 108910.

40. Valenzuela, J. V. C., Bolaños, H. J. A., Gualoto, M. M. P., Chávez, J. D. C., & Vizquete, D. R. S. (2019). Caracterización morfológica y agronómica de dos genotipos de maíz (*Zea mays* L.) en la zona media de la parroquia Malchinguí. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 11(1), 40-49.

41. Rincón, S., & González, A. (2014). Estudio de factibilidad para la fabricación de pellets a partir de material lignocelulósico proveniente de palma de aceite.

42. Videla, C., & Tapia, P. (2007). Efecto del secado en ambiente de servicio en la evolución de las propiedades mecánicas de hormigones livianos estructurales. *Revista ingeniería de construcción*, 22(2), 123-137.

43. American Society of Agricultural Engineers, ASAE según lo refieren los autores (Lindley and Vossoughi, 1989).

44. Pinilla Suárez, J. C., Luengo Vergara, K., Lobo Quilodrán, F., Navarrete, T., & Navarrete, F. (2021). Normativas aplicables a la producción de pellet en Chile.

45. Sartori, R. S. (2022). *A indústria de Pellet de madeira para uso interno e exportação no Brasil* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

46. González Velandia, K. D., Daza Rey, D., Caballero Amado, P. A., & Chadae Martínez, G. (2019). Evaluación de las propiedades físicas y químicas de residuos sólidos orgánicos a emplearse en la elaboración de papel. *Luna Azul*, (43), 499-517.

47. Rigual Hernández, V. D. L. Á. (2019). Pretratamientos en una etapa, multietapa y proceso "one-pot" de madera de pino y eucalipto, basados en el empleo de líquidos iónicos apróticos, próticos y bioderivados.

48. LÓPEZ CHALARCA, L. T., VEGA RODRÍGUEZ, L. Y., RENDÓN COLORADO, C. D., & TOBÓN ROJAS, S. E. B. A. S. T. I. Á. N. (2020). Caracterización de los residuos de la industria maderera para su aprovechamiento en diferentes aplicaciones. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 104-124.

49. Aguinalde González, X., Garry, J. M., Pucciarelli, I. E., & Rodríguez Bosque, J. M. (2019). Producción de Pellet de madera a base de residuos y subproductos de la industria forestal.

50. LA FAO, U. C. E. (1990). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

51. Martin-Dominguez, V., Cabrera, P. I. A., Eidt, L., Pruesse, U., Kuenz, A., Ladero, M., & Santos, V. E. (2022). Production of Fumaric Acid by *Rhizopus arrhizus* NRRL 1526: A Simple Production Medium and the Kinetic Modelling of the Bioprocess. *Fermentation*, 8(2), 64.

52. Arévalo, R., Zapata, S., Canalís, P., Rezeau, A., & Royo, J. BEHAVIOR OF TORREFIED VERSUS FRESH WOODY PELLETS IN A FIXED-GRATE REACTOR: COMPARISON OF COMBUSTION PARAMETERS AND FOULING AND SLAGGING TENDENCY.

53. Sierra Aguilar, Y. (2018). Producción de enzimas ligninolíticas por basidiomicetes incubados en rastrojo de maíz y análisis de la biomasa resultante como alimento en rumiantes.

54. Raúl Andrés Molina Benavides^{1*}, Fernando Silva Aguilar², Sandra Perilla Duque³ y Hugo Sánchez Guerrero 2016

55. Rojas Correa, V. (2020). Análisis de los residuos maderables generados en la ciudad de Medellín y su factibilidad para el aprovechamiento energético en la industria.

56. Lu, P., Huang, Q., Bourtsalas, A. C. (Thanos., Themelis, N. J., Chi, Y., & Yan, J. (2019). Review on fate of chlorine during thermal processing of solid wastes. *Journal of Environmental Sciences*, 78, 13–28. Doi.org/10.1016/j.jes.2018.09.003.

57. Fernández-Puratich, H., Oliver-Villanueva, J. V., 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.