UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ELABORACIÓN DE COMBUSTIBLE SOLIDO A PARTIR DE RESIDUOS DE LA MADERA Y PULPA DE PAPEL RECICLADO

TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR

Hebe del Carmen Araúz López

PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

TUTOR

Ing. Silvano Cruz Sánchez

Managua, Nicaragua 2021

i. Dedicatoria

A Dios:

Dedicado principalmente a Dios por sobre todas las cosas por haberme permitido llegar hasta aquí, porque gracias a su inmenso amor y misericordia logre culminar mis estudios universitarios.

A la Virgen María:

A Nuestra Madre Santísima la Virgen María, que con su inmenso amor llenó mi corazón y mi vida para luchar y seguir el camino correcto hasta esta etapa de mi vida.

A mi esposo e hija:

Dedicado también a mi esposo e hija que son mi fuerza y la fuente de amor que siempre necesito.

A toda mi familia:

A toda mi familia por su apoyo, cariño y amor a lo largo de mi vida, soy parte de ellos y ellos son parte de mí.

Gracias por el apoyo moral y económico que me brindaron lo largo de mis estudios.

ii. Agradecimiento

A Dios:

Agradezco a Dios principalmente, ya que sin él nada puedo y con él todo lo puedo. “Todo lo puedo en Cristo que me fortalece” (Filipenses 4:13).

A la Virgen María:

A Nuestra Madre Santísima la Virgen María, por su amor y fortaleza brindada en cada instante de mi vida y por guiarme por buenos caminos hasta alcanzar mis metas.

A mi esposo e hija:

Dedicado también a mi esposo e hija ellos son el motor, el pilar y el gran apoyo que siempre necesito. Por darme la fuerza y el ánimo que muchas veces me faltaron.

A mi madre:

A mi madre por su esfuerzo y sacrificio a lo largo de mi vida, por formarme de la mejor manera posible y por su apoyo incondicional.

A Picho:

Edgardo López, porque en mi niñez miré ese ejemplo a quise algún día seguir, él de un gran profesional esforzado y que ha superado muchos obstáculos en su vida.

A mi abuelita Paula:

A mi abuelita Paula Rizo, porque, aunque ya no está con nosotros es la estrella y luz que siempre iluminará mi corazón y mi vida.

A mis profesores:

A mis profesores porque con sus conocimientos pudieron formarme y enseñarme de la mejor manera posible, especialmente a la profesora Maritza Sánchez, que en paz descanse, por su apoyo y cariño. A las profesoras Larissa y Sika por sus excelentes conocimientos, consejos y apoyo moral.

iii. Resumen

Inicialmente se caracterizó mediante análisis de laboratorio la materia prima utilizada en la elaboración de las briquetas, analizando el contenido de humedad y cenizas presentes en el aserrín de pino y papel reciclado. Posteriormente se determinó el proceso productivo para la elaboración de las briquetas.

Antes de elaborar las briquetas se realizó un diseño experimental para el cual se utilizó el software Minitab 19, donde los factores considerados para el desarrollo de las mezclas fueron el aserrín de pino, papel reciclado y el porcentaje de humedad presente en el producto final.

En el caso de los niveles fueron considerados un nivel alto y un nivel bajo para cada componente, para el caso de la humedad se consideró como límite inferior 5% y límite superior 15%, en el caso del aserrín de pino y el papel se consideró para ambos límites inferiores 25% y límite superior 75%.

Una vez terminada la elaboración de las briquetas se procedió a evaluar mediante pruebas de laboratorio y cálculos las propiedades físicas y químicas, donde se realizó inicialmente un análisis físico de las briquetas y posteriormente se realizaron pruebas de laboratorio para evaluar la variación de humedad en el prensado, variación de humedad en el secado y medición del poder calorífico.

Para finalizar se realizó un estudio mediante pruebas de ebullición del agua para comparar la eficiencia energética de las briquetas obtenidas con otras especies de leña utilizada. Las especies maderables roble, guanacaste, quebracho y eucalipto fueron analizadas con el fin de determinar su rendimiento como combustible a través de parámetros como tiempo de cocción y cantidad de combustible usado.

Los resultados de la prueba mostraron que las especies como el roble y quebracho tomaron un tiempo de 4 minutos en llevar al punto de ebullición al agua. La briqueta con mezcla 6.93% humedad, 68.07% aserrín de pino y 25% papel reciclado, le tomo 4.2 minutos en llevar al agua al punto de ebullición, sin embargo, el eucalipto y guanacaste requirieron de 6.2 y 9 minutos respectivamente.

iv. Índice de contenido

i. Dedicatoria 1
ii. Agradecimiento 2
iii. Resumen 4
iv. Índice de contenido 5
v. Índice de tablas 8
vi. Índice de figuras 9
I. Introducción 10
II. Objetivos 11
2.1 Objetivo general 11
2.2 Objetivos específicos 11
III. Marco de referencia 12
3.1 Biomasa 12
3.1.1. Tipo de biomasa 12
3.1.2. Composición química y física 12
3.1.3. Contenido de humedad 13
3.1.4. Humedad en briquetas 13
3.1.5. Porcentaje de cenizas 13
3.1.6. Poder calorífico 14
3.1.7. Densidad aparente 14
3.1.8. Procesos de conversión 14
3.2. Información general de la leña 16
3.2.1. Especies más utilizadas para leña 16
3.3. Descripción de la materia prima 17
3.3.1 Industria forestal de aserríos en Nicaragua 17
3.3.2. Industria forestal de segunda y tercera transformación 18
3.3.3. Información general del aserrín 18
3.3.3.1. Celulosa 19
3.3.3.2. Lignina 19
3.3.3.3. Ceniza 19
3.3.4. Propiedades cuantitativas 20
3.4. Aglomerantes 20
3.4.1. Clasificación de los aglomerantes 20
3.5. Generalidades sobre el papel 22
3.6. Briquetas 22

3.6.1. Métodos para fabricación de briquetas 23
3.6.2. Descripción del proceso productivo de las briquetas 23
3.6.2.1. Recepción de la materia prima 24
3.6.2.2. Selección y pesado de materia prima 24
3.6.2.3. Secado 24
3.6.2.4. Briqueteado 24
3.6.2.4.1. Briqueteado por extrusión 25
3.6.2.4.2. Briqueteado por impacto de un pistón 25
3.6.2.5. Cortado y enfriado 25
3.6.2.6. Empaquetado 25
3.7. Balance de materia y energía 26
3.8. Experimentos de mezclas 26
IV. Materiales y métodos 27
4.1. Tipo de investigación 27
4.1.1. Tipo de estudio 27
4.1.2. Universo y muestra 27
4.2. Pruebas de laboratorio para aserrín de pino y pulpa de papel 28
4.2.1. Determinación de la humedad del aserrín de pino y papel 28
4.2.2. Medición de cenizas del aserrín de pino y papel 30
4.3. Diseño de experimento 31
4.4. Etapas del proceso experimental de elaboración de briquetas a partir de aserrín de pino y papel reciclado. 33
4.5. Elaboración de cálculos. 39
4.5.1. Cálculo del volumen de la briqueta 39
4.5.2. Variación de humedad en el prensado 39
6.4.3 Variación de humedad en el secado 40
4.5.3 Medición del poder calorífico 41
4.5.4 Preparación del equipo 41
4.5.4.1 Prueba preliminar 41
4.5.4.2. Prueba principal 42
4.5.4.3. Prueba complementaria 42
4.6. Prueba de ebullición del agua 43
V. Presentación y discusión de resultados 44
5.1 Evaluación y análisis de pruebas de laboratorio 44
5.1.1. Porcentaje de humedad en aserrín 44

5.2. Porcentaje de humedad en el papel 44
5.2.3 Porcentaje de cenizas del aserrín. 45
5.2.4 Porcentaje de cenizas en el papel 46
5.3 Elaboración de cálculos del análisis físico de las briquetas 47
5.3.1. Variación de humedad en el briqueteado 48
5.3.2. Variación de humedad en el secado 49
5.3.3. Variación de densidad total de las briquetas 50
5.3.4. Variación de peso en las briquetas 51
5.4. Análisis del diseño experimental DOE mezclas 52
5.4.1. Regresión para mezclas: poder calorífico vs. humedad, aserrín de pino y papel reciclado. 54
5.4.2. Respuesta del análisis del diseño en minitab 59
5.5 Análisis prueba de ebullición del agua 61
5.5.1. Prueba de ebullición del agua 61
VI. Conclusiones 64
VII. Recomendaciones 65
VIII. Nomenclatura 66
8.1. Acrónimos 66
IX. Bibliografía 67
X. Anexo 70
10.1. Balance de materia en la selección y pesado 71
10.2. Balance de materia en el almacenado de materia prima seca 71
10.3. Balance de materia en el mezclado 71
10.4. Balance de materia en el briqueteado 71
10.5. Balance de materia en el secado 71
10.5.1 Materia prima briqueteado antes del secado 71
10.5.2 Materia prima briqueteado después del secado 72
10.6. Balance de materia en el empaquetado 72

v. Índice de tablas

Tabla 3.1. Proceso de conversión de biomasa en energía 15
Tabla 3.2. Composición química del aserrín 18
Tabla 3.3. Características físicas del aserrín 19
Tabla 3.4 Clasificación de los aglomerantes 21
Tabla 4.1. Planteamiento del diseño experimental DOE mezclas 31
Tabla 4.2. Resultados del diseño DOE mezclas 32
Tabla 5.1. Porcentaje de humedad del aserrín 44
Tabla 5.2. Porcentaje de humedad en papel reciclado 45
Tabla 5.3. Porcentaje de cenizas del aserrín 45
Tabla 5.4. Porcentaje de cenizas del papel reciclado 46
Tabla 5.5. Calculo del volumen de las briquetas 47
Tabla 5.6. Variación de humedad en el briqueteado 48
Tabla 5.7. Variación de humedad en el secado 49
Tabla 5.8. Variación de densidad total de las briquetas 50
Tabla 5.9. Variación de peso de las briquetas 51
Tabla 5.10. Resultados de prueba de calorimetría 52
Tabla 5.11. Coeficientes de regresión estimados para poder calorífico 54
Tabla 5.12. Resumen del modelo 54
Tabla 5.13. Parámetros para optimización de respuesta 59
Tabla 8.1 Nomenclatura 66
Tabla 8.2. listado de acrónimos 66
Tabla 10.1 Toma de datos en pruebas de calorimetría 73
Tabla 10.2 Equipos utilizados 74
Tabla 10.3. Materiales utilizados 76

vi. Índice de figuras

Figura 4.1. Diagrama de elaboración experimental de briquetas 33
Figura 4.1.1. Toma de muestra de aserrín 34
Figura 4.1.2. Toma de muestra de papel 34
Figura 4.1.3. Selección de aserrín de pino 35
Figura 4.1.4. Selección de papel reciclado 35
Figura 4.1.5. Mezclado de materiales 36
Figura 4.1.6. Material briqueteado 37
Figura 4.2. Diagrama de flujo del proceso experimental 38
Figura 5.1. Diseño simplex en cantidades 53
Figura 5.2. Graficas de residuos para poder calorifico 55
Figura 5.3. Gráfica de rastreo de respuesta de cox 56
Figura 5.4. Gráfica de contorno de mezcla para poder calorífico 57
Figura 5.5. Gráfica de superficie de mezcla de poder calorífico 58
Figura 5.6 Optimización de respuesta 60
Figura 5.7. Tiempo de cocción por especie de combustible sólido 62
Figura 5.8. Consumo de combustible sólido 63
Figura 10.1. Proceso experimental para elaboración de briquetas 70

I. Introducción

El uso desmedido de las fuentes de energía convencionales ha provocado un gran impacto ambiental y por consiguiente las alteraciones en el clima como el calentamiento global son cada vez más grandes, es por ello que la disminución en el consumo de combustibles fósiles y el aumento en el uso de energías sustentables, debe ser considerado como una prioridad.

Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada en el área centroamericana. Se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho mayor y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín (PNUD, 2002).

En el caso del papel, gran cantidad de residuo de diferentes industrias no es reciclado y es arrojado al medio ambiente, provocando suciedad en calles y predios sin tener ninguna utilización.

La leña es la principal fuente de energía en la matriz energética de Nicaragua, constituyendo un poco más del 55% del consumo total de energía. En muchas comunidades se utiliza la leña para quemarla y generar calor en el desarrollo de diferentes actividades entre ellas cocinar, cocer ladrillos, etc. En muchos casos esta leña es extraída de los árboles jóvenes que no tienen la madurez para ser aprovechados adecuadamente provocando impacto en el ecosistema forestal (FAO J. J., 2003).

El presente trabajo monográfico, brinda la posibilidad de producir briquetas a partir de aserrín de pino y papel reciclado como aditivo aglomerante, para lograr un combustible sólido con un alto poder calorífico, como fuente de energía económica y renovable que ayude a proteger el medio ambiente y contribuya a evitar la deforestación de los bosques.

II. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Obtener briquetas de forma experimental a partir de aserrín de pino y papel reciclado, para su uso como combustible sólido.

.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la materia prima, a través del análisis de laboratorio en la elaboración de briquetas.

- Determinar las condiciones experimentales para la elaboración de briquetas a partir de aserrín de pino y papel reciclado.

III. Marco de referencia

3.1 Biomasa

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía, o las provenientes de la agricultura; (residuos de maíz, café, arroz), del aserradero; (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos; (aguas negras, basura orgánica y otros) (Murcia, 2020).

La mayoría de los desechos de aserrío son aprovechados para generación de calor, en sistemas de combustión directa, en algunas industrias se utilizan para la generación de vapor. Los desechos de campo en algunos casos, son usados como fuente de energía por comunidades aledañas, pero la mayor parte no es aprovechada por el alto costo del transporte (FAO 2. O., 2001)

3.1.1. Tipo de biomasa

Los recursos biomásicos se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular. Por ejemplo: Los desechos forestales indican el uso de los procesos de combustión directa o procesos termo-químicos, los residuos animales indican el uso de procesos anaeróbicos (bioquímicos) (CAVAMA, 2013).

3.1.2. Composición química y física

Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar; por ejemplo: Los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado “gas pobre”, que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar (FAO F, O. 2001).

3.1.3. Contenido de humedad

El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, lo que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía (PNUD, 2002).

3.1.4. Humedad en briquetas

Mientras menor sea la humedad del material inicial, la fricción en el proceso aumenta y con ello se incrementa la demanda de energía. Los límites de humedad dependen del material y el tipo de "briqueteadora" que se utiliza, normalmente se acepta como humedad óptima alrededor de 7 %, permitiéndose como límite inferior 5 % y como superior 15 %. En algunos casos específicos se reporta hasta 20 % de humedad estas limitaciones de humedad y el control de la homogeneidad del proceso, exigirían en muchos casos el secado como paso previo o al menos el control de la humedad (Trujillo, 2010).

3.1.5. Porcentaje de cenizas

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, ésta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado (CAVAMA, 2013).

3.1.6. Poder calorífico

Es la cantidad de calor generado por una combustión completa de una masa específica en presencia de oxígeno (UNE-EN ISO, 2018).

El poder calorífico representa la energía de combustión del carbono e hidrógeno de la materia orgánica y del azufre pirítico y en parte del orgánico. El poder calorífico se determina en una bomba calorimétrica y por ello es una medición directa del calor generado por la combustión completa de masa (UNE-EN ISO, 2018).

Este análisis da una medida del poder calorífico superior (PCS) porque todo el calor generado lo recibe el calorímetro, ya que el vapor de agua que resulta se condensa entregando su energía de evaporación. En el poder calorífico neto (PCN), se asume que el vapor de agua generado por las reacciones no se condensa en el sistema de combustión y por ende este calor latente no se recupera (UNE-EN ISO, 2018).

3.1.7. Densidad aparente

Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión, y eleva los costos del proceso (PNUD, 2002).

3.1.8. Procesos de conversión

Antes de que la biomasa pueda ser usada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización. A menudo, la biomasa es convertida en formas derivadas tales como carbón vegetal, briquetas, gas, etanol y electricidad.

Las tecnologías de conversión incluyen desde procesos simples y tradicionales, como la producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra; hasta procesos de alta eficiencia como la dendro energía y la cogeneración (FAO J. J., 2003).

A continuación, en la tabla 3.1. se presentan los procesos de conversión de biomasa más relevantes: (PNUD, 2002).

Tabla 3.1. Proceso de conversión de biomasa en energía

Tipo de biomasa	Características físicas	Procesos de conversión	Usos
Material orgánico de alto contenido de humedad.	Estiércoles Residuos de alimentos Efluentes industriales Residuos urbanos	Digestión anaeróbica y fermentación alcohólica	Motores de combustión Turbinas de gas Hornos y calderas Estufas domésticas
Materiales lignocelulósicos (cultivos energéticos, residuos forestales de cosechas y urbanos).	Astillas Pellets Briquetas Leños Carbón vegetal	Densificación Combustión directa Pirolisis Gasificación	Estufas domesticas Hornos y calderas Motores de combustión Turbinas de gas

Fuente: Manual sobre energía renovable, Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América Central (PNUD, 2002).

3.2. Información general de la leña

Históricamente en Nicaragua, la mayor parte del suministro de leña ha sido obtenido a través de la destrucción de los bosques, los que han ido retrocediendo debido al continuo avance de la frontera agrícola. Esta situación ha obligado a los usuarios rurales de la leña a recorrer distancias cada vez más alejadas de los centros poblacionales (FAO ,J. T. 2003).

La leña es la principal fuente de energía en la matriz energética de Nicaragua, constituyendo un poco más del 55% del consumo total de energía. En el ámbito urbano, la leña y el carbón llegan a los hogares por medio de pulperías o vendedores ambulantes encontrándose a este nivel una gran variedad de medidas de las formas de comercialización, que van desde la raja grande hasta los manojitos. La pequeña industria artesanal que equivale al 57%, compra volúmenes grandes que pueden ser el flete, la carreta o la camionada, que incluyen, desde troncos grandes hasta ramas pequeñas. El restante 43% de la leña, es captado directamente por los consumidores rurales y también urbanos (FAO J. J., 2003).

3.2.1. Especies más utilizadas para leña

El uso de las diferentes especies es variable, dependiendo principalmente de la disponibilidad, de las costumbres y preferencias, las cuales cambiaron con respecto a la zona y tipo de usuario (FAO 2. O., 2001).

En Masaya las especies que más se consumen en el sector residencial son el Cornezuelo y Espino de Playa, principalmente en forma de manojos, que proceden de las zonas de extracción de la zona norte del país. En cambio, los productos que provienen de la zona de Carazo en chapas y rajas son utilizadas por la pequeña industria debido a que presentan mayor eficiencia; (panadería, tortillería, restaurantes) y prefieren especies como el Quebracho, Madero Negro, Brasil y Madroño (FAO 2. O., 2001).

3.3. Descripción de la materia prima

3.3.1 Industria forestal de aserríos en Nicaragua

La industria forestal nicaragüense está basada prácticamente en la primera transformación de la madera, para el año 2002 la industria forestal de primera transformación estaba compuesta de 76 aserríos. Esta industria ha pasado de 108 aserríos en el año de 1997 a 76 en el 2002. Las zonas que cuentan con mayor capacidad de aserrío son Estelí (9), la RAAN (13), la RAAS (4) y Nueva Segovia (16) (CAVAMA, 2013).

De acuerdo al INAFOR, de los 76 aserríos el 33% corresponde a aserríos circulares y el 77% a aserríos sinfín. De acuerdo a un diagnóstico realizado sobre empresas forestales del total de aserríos 13 de ellos son empresas que se encuentran integradas verticalmente desde el manejo y aprovechamiento forestal hasta la fabricación de productos y su comercialización. Cabe destacar que la mayoría de estos aserríos son prácticamente obsoletos, sin embargo, algunos operan con instalaciones y equipos modernos y cuentan con maquinarias de apoyo como cepilladoras y machimbradoras (CAVAMA, 2013).

En general la industria de primera transformación enfrenta problemas de obsolescencia de los equipos, altos niveles de desperdicio: (se estima que el rendimiento de madera en rollo a madera aserrada es del 50%), baja utilización de residuos y retazos, poca industrialización de diámetros pequeños y subutilización de la capacidad instalada. La capacidad instalada en aserrío a nivel nacional se estima en 620,213 m^3 anuales (CAVAMA, 2013).

3.3.2. Industria forestal de segunda y tercera transformación

La industria de segunda transformación está caracterizada por ser en su totalidad Pequeñas y Medianas Empresas forestales (Pymes). Se estima que en el país existe alrededor de 3,033 de este tipo de empresas, las cuales operan en su mayoría en el sector urbano o fuera del límite urbano y muy pocas en el sector rural. En el sector rural se encuentran ubicadas 608 (Pymes) que se dedican a la producción primaria. El 76% de estas industrias operan con materia prima procedente de los bosques latifoliados y un 24% con materia prima procedente de coníferas. No existen registros o datos sobre empresas dedicadas a la producción de productos no maderables del bosque (CAVAMA, 2013).

En cuanto a fábricas de muebles, se estima que en el país existen alrededor 2,311 (Pymes). El 55% de estas fábricas se encuentran ubicadas en las principales ciudades, que concentran a la mayor parte de la población, como son Managua, Masaya, León, y Chinandega. Una característica peculiar de estas empresas es que funcionan como pequeños talleres de pedidos y manejan un limitado inventario tanto de materia prima como de productos finales (CAVAMA, 2013).

3.3.3. Información general del aserrín

Es un material particulado que se genera como residuo de la operación de aserrado. En la tabla 3.2 se detallan las propiedades cuantitativas del aserrín.

Tabla 3.2. Composición química del aserrín

Componentes	%
Celulosa	43.10 – 45.61
Lignina	28.41 – 31.27
Sustancias solubles en agua	2.79 – 3.90
Sustancias solubles en benceno-etanol	3.08 – 4.71
Ceniza	0.48 – 0.68

Fuente: Estudio de pre factibilidad para la instalación de una planta industrial para la producción de briquetas en Iquitos (Tuesta, 2012).

3.3.3.1. Celulosa

La celulosa es un polisacárido compuesto exclusivamente de moléculas de glucosa; es rígido, insoluble en agua, y contiene desde varios cientos hasta varios miles de unidades de glucosa. La celulosa es la biomolécula orgánica más abundante ya que forma la mayor parte de la biomasa terrestre (Tuesta, 2012).

3.3.3.2. Lignina

Es un polímero presente en las paredes celulares de las plantas. La lignina está formada por compuestos aromáticos, La molécula de lignina presenta un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos; (cumarílico, coniferílico y sinapílico) (Tuesta, 2012).

3.3.3.3. Ceniza

La ceniza es el producto de la combustión del material, compuesto por sustancias inorgánicas no combustibles, como sales minerales. Parte queda como residuo en forma de polvo depositado en el lugar donde se ha quemado el combustible y parte puede ser expulsada al aire junto con el humo. La ceniza de madera tiene un alto contenido de potasio, calcio, magnesio y otros minerales esenciales para ellas (Tuesta, 2012). La tabla 3.3 describe las características físicas del aserrín.

Tabla 3.3. Características físicas del aserrín

Características	Descripción
Dimensiones	0.2 – 30 mm (granulometría)
Densidad	200 – 650 Kg/m³
Humedad	40 – 90%

Fuente: Estudio de pre factibilidad para la instalación de una planta industrial para la producción de briquetas en Iquitos (Tuesta, 2012).

3.3.4. Propiedades cuantitativas

El aserrín se encuentra ubicado en las mismas instalaciones industriales dedicadas al aserrado de madera. En muchas de estas instalaciones el aserrín se encuentra formando montículos al aire libre (FAO J. J., 2003).

3.4. Aglomerantes

Los aglomerantes son elementos que se utilizan para unir o compactar compuestos, mediante reacciones químicas que se dan con agua y aire. Las propiedades de estos son de adherirse y moldearse juntos con otros materiales para protegerlos, endurecerlos y así alcanzar resistencias mecánica. (Murcia, 2020).

Por lo general, las biomasas residuales como compuestos lignocelósicos, aportan la lignina propia como aglutinante, no comportándose así el aserrín que necesita de un aglutinante para que mantengan sus propiedades como sólidos compactados durante su manipulación, transporte, almacenaje, dosificación y combustión (Trujillo, 2010).

3.4.1. Clasificación de los aglomerantes

Los aglomerantes se pueden clasificar dependiendo de su naturaleza, procedencia, polímeros o su combustión. A continuación, en la tabla 3.4. se muestra la clasificación de los aglomerantes. Se muestra que el papel es un aglomerante de origen natural de origen orgánico.

Tabla 3.4 Clasificación de los aglomerantes

Polímeros	De acuerdo a su origen	Por su combustión
Naturales Almidón de maíz, gelatina, goma, acacia y ácido alginíco, etc.	**Orgánicos** Alquitrán, estiércol animal, manteca, aguas servidas, residuales o barro, gelatina , papel , restos y residuos de pescado, algas y almidones.	**Combustibles** Albuminatos, alcoholes, almidones, alquitranes, azucares, breas, cola, etc.
Sintéticos El polivinilpirrolidona PVP, la metílcelulosa, etílcelulosa, alcohol polivinilíco, etc.	**Inorgánicos** Limo, arcilla, barro, cemento, cal etc.	**No combustibles** Borato de sodio, cal y cal hidratada, cemento, cloruro de magnesio, escayola, silicato de sodio, sílice, yeso, etc.
Azucares La glucosa (dextrosa), sacarosa y sorbitol.		

Fuente: Desarrollo de briquetas de borra de café y un aglomerante a diferentes composiciones porcentuales para ser utilizadas como combustible sólido alternativo (Murcia, 2020).

3.5. Generalidades sobre el papel

El papel es un material constituido por una delgada lámina elaborada a partir de pulpa de celulosa, una pasta de fibras vegetales molidas suspendidas en agua, generalmente blanqueada, y posteriormente secada y endurecida, a la que normalmente se le añaden sustancias como polipropileno o polietileno con el fin de proporcionarle características especiales. Las fibras que lo componen están aglutinadas mediante enlaces por puente de hidrógeno. También se denomina; papel, hoja, o folio, a un pliego individual o recorte de este material (Aviles, 2019).

Unos dos tercios de la pasta de madera del mundo se produce mediante diversos procedimientos químicos que se caracterizan por la separación química de la lignina y la celulosa, que forma la pasta de madera.

3.6. Briquetas

Las briquetas son bloques renovables y ecológicos utilizados para generación de energía calórica, estás se conocen también como biomasa sólida. Se pueden realizar a base de: residuos de arroz, café, coco, caña de azúcar, pulpa de papel, aserrín, entre otros. Las briquetas generalmente tienen forma cilíndrica, también se fabrican cuadrangulares, rectangulares, hexagonales, entre otras, estás pueden ser macizas o huecas. El diámetro es mayor a 5 cm y la longitud oscila entre 50-80 cm y proporcional al diámetro (Tuesta, 2012).

3.6.1. Métodos para fabricación de briquetas

Existen dos métodos principales para fabricar briquetas, con aglutinante o sin él. Es más conveniente sin aglutinante, pero para ello se requieren prensas complicadas y costosas, equipos de secado y mucha energía.

La fabricación de briquetas con un aglutinante como alquitrán, brea o asfalto requiere procesos industriales de alta presión para producir briquetas a partir de antracita, coque pulverizado y en menor medida polvo de carbón.

Tales procedimientos son también complejos y costosos y aunque no son adecuados para las zonas rurales, podrían ser muy útiles para proyectos estatales centrales o locales, sobre todo en países con madera y residuos agrícolas abundantes (Trujillo, 2010).

Los métodos de fabricación de briquetas más apropiados para las poblaciones rurales son los que se basan en los desechos y materiales de construcción disponibles. La fabricación debería realizarse en prensas manuales hechas en el lugar. La briqueta hecha a mano se mantiene unida sobre todo gracias al material aglutinante. Según las disponibilidades locales, los combustibles orgánicos más apropiados para servir de aglutinantes son la resina, el alquitrán, el estiércol animal, el fango de alcantarillado y los desechos de pescado (Trujillo, 2010).

3.6.2. Descripción del proceso productivo de las briquetas

Para la transformación del aserrín hacia un producto comercial como son las briquetas, se debe iniciar con el acondicionamiento y pesado de la materia prima. Una vez realizado esto se debe someter al aserrín a distintas operaciones orientadas a obtener un producto final de óptima calidad que cumpla con los requisitos del mercado consumidor (Tuesta, 2012).

3.6.2.1. Recepción de la materia prima

La materia prima recepcionada en la planta industrial estará constituida por el aserrín procedente de los grandes complejos aserraderos. El aserrín será trasladado a las instalaciones en vehículos de carga, será colocado en el piso hasta la siguiente etapa (Tuesta, 2012).

3.6.2.2. Selección y pesado de materia prima

El aserrín es removido manualmente con ayuda de rastrillos para separar los trozos de madera o cualquier cuerpo extraño. Posteriormente se colocará en sacos para ser pesado (Tuesta, 2012).

Por lo general, el tamaño de la partícula tiene menor importancia y mientras más largas éstas sean, se facilita el amarre o tejido. Para la formación de briquetas se acepta que: “Sólo lo que puedas palear, lo podrás briquetear”. En general, el material a briquetear idealmente deberá contener partículas largas y cortas. La longitud misma de la partícula dependerá del material y diámetro del dado. Mientras mayor sea la máquina y el dado, mayor podrá ser la partícula, por ejemplo: para dados de 125 mm de diámetro, la partícula más larga será de 15 mm (Trujillo, 2010).

3.6.2.3. Secado

Se realizará utilizando un equipo de secado a una temperatura de secado entre 90°C a 100°C. La operación de secado es continua obteniendo aserrín con una humedad que debe estar comprendida entre el 12% y 16% (Tuesta, 2012).

3.6.2.4. Briqueteado

Es el proceso mediante el cual se obtienen las briquetas que son formadas al compactar cualquier tipo de biomasa residual, de modo manual o con equipos mecánicos (Tuesta, 2012).

La presión de compresión para briquetas oscila aproximadamente entre 50 y 100 Kg por briqueta, o sea entre 5 y 15 Kg /cm². Las briquetas producidas tienen forma esférica, evitando así que se fracturen por los bordes, que son el punto débil de las briquetas (Trujillo, 2010).

3.6.2.4.1. Briqueteado por extrusión

Se trata de un sistema basado en la presión ejercida por un tornillo sin fin especial, que hace avanzar el material hacia una cámara que se estrecha progresivamente (forma cónica). Este tipo de equipos permiten obtener briquetas con un orificio interior y con densidades entre 1,300.00 - 1,400.00 kg/m³. Los consumos energéticos y los costos de mantenimiento son notablemente elevados (Tuesta, 2012).

3.6.2.4.2. Briqueteado por impacto de un pistón

La compactación se consigue mediante el golpeteo continuo sobre el aserrín producido por un pistón accionado a través de un volante de inercia. Este tipo de equipos permiten obtener briquetas sólidas y con densidades entre 100 - 1,200.00 Kg/m³ (Tuesta, 2012).

3.6.2.5. Cortado y enfriado

Una vez formadas las briquetas, estas son cortadas manualmente ejerciendo presión sobre ellas, luego colocadas en cajones de madera logrando así su enfriamiento natural durante dos días (Tuesta, 2012).

3.6.2.6. Empaquetado

Se colocarán las briquetas en bolsas de plástico formando paquetes de aproximadamente 5 Kg, cerrándolas con un sellador de calor (Tuesta, 2012).

3.7. Balance de materia y energía

Los balances de materia son una de las herramientas más importantes con las que cuenta la ingeniería de procesos y se utilizan para contabilizar los flujos de materia y energía entre un determinado proceso industrial y los alrededores o entre las distintas operaciones que lo integran. Por tanto, nos permitirán conocer los caudales másicos de todas las corrientes materiales que intervienen en el proceso (Tuesta, 2012).

3.8. Experimentos de mezclas

Son una clase especial de experimentos de superficie de respuesta en los que el producto objeto de investigación se compone de varios componentes o ingredientes. Los diseños para estos experimentos resultan útiles, porque muchas actividades de diseño y desarrollo de productos en situaciones industriales implican fórmulas o mezclas. En estas situaciones, la respuesta depende de las proporciones de los diferentes ingredientes incluidos en la mezcla

En el experimento de mezclas más simple, la respuesta; (la calidad o rendimiento del producto con base en cierto criterio) depende de las proporciones relativas de los componentes (ingredientes). Las cantidades de los componentes, medidas en peso, volumen o alguna otra unidad, suman un total común (Minitab, 2019).

IV. Materiales y métodos

4.1. Tipo de investigación

4.1.1. Tipo de estudio

La investigación fue de tipo experimental utilizando un enfoque cuantitativo. De acuerdo al método de investigación el presente estudio es experimental.

En cuanto al enfoque por el uso de los instrumentos de recolección de la información, análisis y sistematización de datos, el presente estudio se realizó mediante un enfoque cuantitativo.

4.1.2. Universo y muestra

El universo de este estudio son todos los residuos forestales, que pueden ser utilizados para la fabricación de briquetas, estos residuos se originan de la industria maderera. Los tipos de madera que usan estas industrias pueden variar, por lo tanto, solo se aplicó a la especie de pino para la fabricación de las briquetas y para evaluarlas posteriormente. En el caso del aglomerante se utilizó el papel para dar un impacto ambiental.

La muestra se basa en nueve briquetas elaboradas con diferentes porciones de mezcla compuestas por aserrín de pino, papel reciclado y humedad, las nueve muestras fueron diseñadas por medio de un diseño experimental elaborado usando minitab 19.

4.2. Pruebas de laboratorio para aserrín de pino y pulpa de papel

4.2.1. Determinación de la humedad del aserrín de pino y papel

La humedad es el porcentaje de agua presente en un cuerpo o materia; puede determinarse en base seca o en base húmeda y representa una característica importante para cualquier análisis a realizarse sobre un material sólido.

Para la realización de esta prueba se requirió el siguiente equipo y material de laboratorio:

- 6 Crisoles
- Balanza analítica
- Estufa
- Desecador

Se realizaron los siguientes pasos:

1. Se colocó el crisol a peso constante, sometiéndolo a 100 ± 5 ºC.
2. Se pesó el recipiente.
3. Se pesó aproximadamente 10 g de muestra y colocarlo en el recipiente que se puso a peso constante con anterioridad.
4. Se procedió a colocar el recipiente junto con la muestra en una estufa a una temperatura de 100 ± 5 ºC durante aproximadamente 6 horas.
5. Se dejó enfriar en un desecador para evitar que el residuo absorba humedad.
6. Se pesó el recipiente más la muestra.
7. Se volvió a colocar el recipiente con la muestra dentro de la estufa y mantenerlo a 100 ºC durante 2 horas.
8. Se dejó enfriar el desecador.
9. Se pesó el recipiente más la muestra. (P3)
10. Si existe una diferencia de pesos de 0.05 entre P2 y P3 ya no volver a colocar en la mufla.

Para determinar el contenido de humedad se aplica la siguiente ecuación:

Peso fase solida = (P1-P3) **(Ec. 6.5)**

% Sólidos = $\frac{\text{Peso fase solida}}{\text{P1}}$ **X 100** **(Ec. 6.5.1)**

% Humedad = 100 - % Sólidos **(Ec.6.5.2)**

4.2.2. Medición de cenizas del aserrín de pino y papel

El término cenizas está definido por el porcentaje en base seca, del cociente de la muestra calcinada y la muestra seca.

Esta prueba se realizó de acuerdo a la norma mexicana para protección al ambiente- Contaminación al suelo- residuos sólidos- Determinación de cenizas. NMX-AA-18-1984.

Para llevar a cabo esta prueba se requirió del siguiente equipo y material de laboratorio:

- Mufla que alcance hasta 1,000 ºC.
- 6 crisoles
- Desecador
- Pinzas

- **Se realizaron los siguientes pasos**:

1. Se colocó el crisol a peso constante, sometiéndolo a 100 ± 5 ºC.
2. Se tomó el recipiente previamente pesado. (G1)
3. Se tomó las muestras previamente secada.
4. Se pesó la mezcla junto con el recipiente. (G2)
5. Se calcinó en el horno a 1073 °K (800ºC), hasta obtener peso constante (se recomienda comprobar el peso constante transcurrida en una hora), se dejó enfriar en el desecador y se pesó, hubo precaución para evitar que la muestra quedase expuesta a corrientes de aire. (G3)
6. Se pesó el recipiente más la muestra.

El porcentaje de cenizas en base seca se calculó con la siguiente formula:

$$C = \frac{G3 - G1}{G2 - G1} X100 \qquad \textbf{(Ec. 6.5.3)}$$

4.3. Diseño de experimento

Antes de analizar el procedimiento para elaborar las briquetas a base de aserrín de pino y papel como su aglomerante se realizó un diseño de experimento DOE mezclas el cual se muestra en la tabla 4.2. para la elaboración del diseño se utilizó el software Minitab 19, donde los factores considerados para el desarrollo de las mezclas fueron el aserrín de pino, papel reciclado y el porcentaje de humedad presente en el producto final.

En el caso de los niveles fueron considerados un nivel alto y un nivel bajo para cada componente los cuales se presentan en la tabla 4.1. para el caso de la humedad se consideró como límite inferior 5% y límite superior 15% ya que mientras menor sea la humedad del material inicial se incrementa la demanda de energía, cabe destacar que los límites de humedad dependen de la materia prima utilizada y el tipo de briqueteadora usada en el proceso (Acápite 3.1.4.).

Para el caso del aserrín de pino y el papel reciclado se consideró para ambos límites inferiores 25% y límite superior 75% ya que el aserrín necesita de un aglutinante para que se mantengan sus propiedades como solido compactado durante su manipulación, transporte, almacenaje, dosificación y combustión (Acápite 3.4.).

Mediante el diseño de experimento DOE mezclas se determinó la cantidad de pruebas y las diferentes proporciones en que deben mezclarse los materiales.

En la tabla 4.1 se representa el planteamiento del diseño experimental donde se muestran los factores y niveles considerados para la realización de las muestras de briquetas.

Tabla 4.1. Planteamiento del diseño experimental DOE mezclas

Factores	Humedad	Aserrín	papel
Nivel bajo	5%	25%	25%
Nivel alto	15%	75%	75%

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.2. se muestran los resultados del diseño de experimento DOE mezclas. El diseño del experimento nos indica cuantas briquetas se tienen que realizar en este caso se realizaran nueve briquetas, además nos representa el orden en el cual se realizaran cada una de ellas. Las muestras están conformadas por tres factores porcentaje de humedad, porcentaje de aserrín y porcentaje de papel, además nos dice que cantidad de cada factor debe ser utilizado para elaborar cada una de las briquetas.

Tabla 4.2. Resultados del diseño DOE mezclas

Orden Corrida	Humedad %	Aserrín %	Papel %
1	5	25	70
2	15	25	60
3	5	70	25
4	15	60	25
5	10	45	45
6	8	35	58
7	13	35	53
8	8	58	35
9	13	53	35

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Etapas del proceso experimental de elaboración de briquetas a partir de aserrín de pino y papel reciclado.

En la figura 4.1. se representa el diagrama de bloques correspondiente al proceso de elaboración de briquetas a nivel experimental utilizando aserrín de pino, papel como aditivo aglomerante y el porcentaje de humedad.

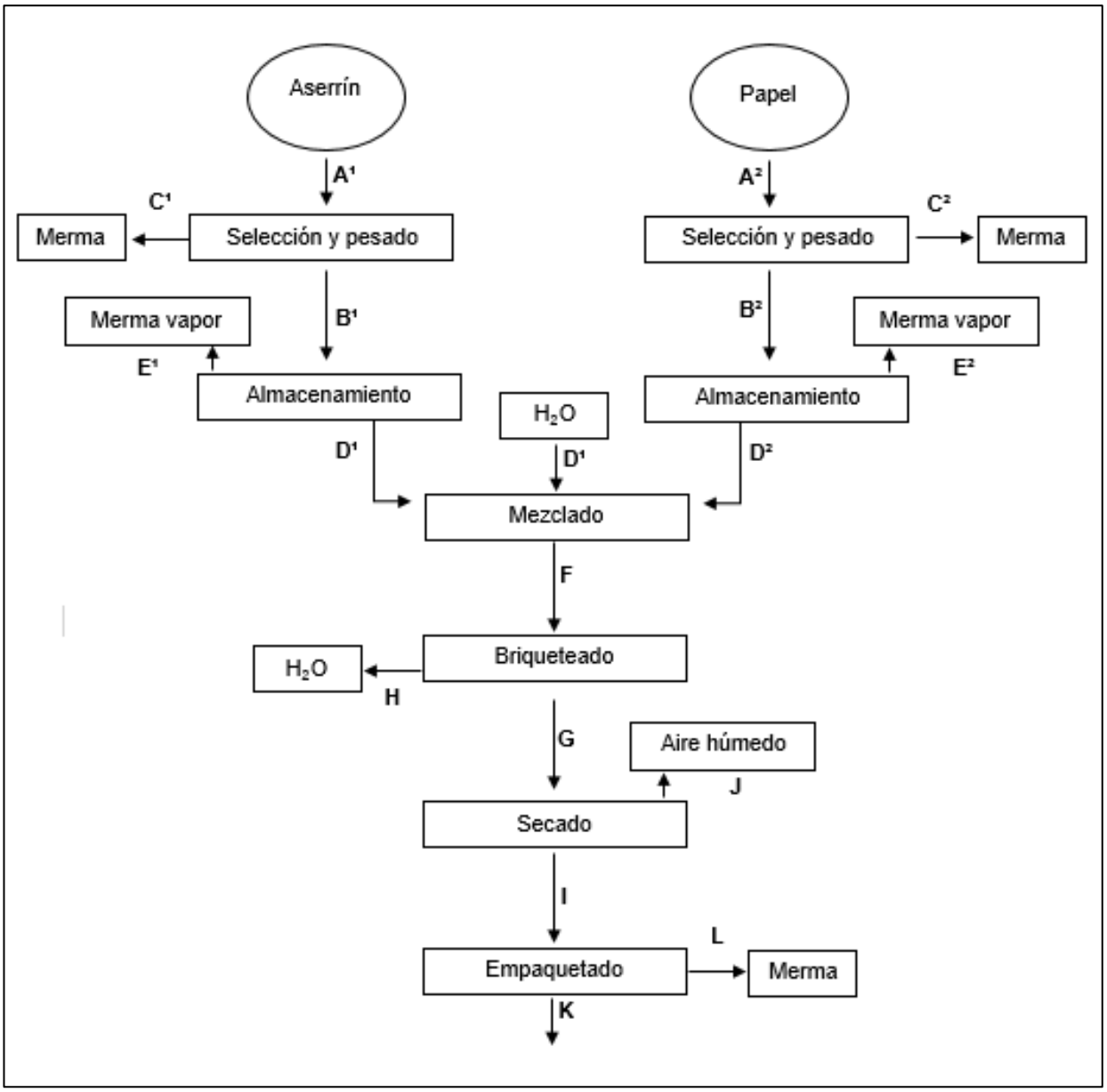


Figura 4.1. Diagrama de elaboración experimental de briquetas

En la figura 4.1 se muestra la etapa de recepción de la materia prima la cual estuvo constituida por aserrín de pino, papel reciclado y porcentaje de humedad.

El aserrín utilizado **A¹** fue el residuo del proceso productivo del procesamiento de la madera realizado en el PIMA, para recolectar la materia prima aserrín de pino se utilizó una pala para recoger el aserrín y un saco para facilitar el transporte; luego se rotulo conteniendo lugar de origen y fecha de recepción. A continuación, se muestra la figura 4.1.1 momento y lugar donde se realizó el proceso de recolección del aserrín de pino.

Figura 4.1.1. Toma de muestra de aserrín

En el caso del papel utilizado **A²** se recolecto papel reciclado de uso administrativo, se utilizó un saco para facilitar el transporte de igual manera fue rotulado conteniendo lugar de origen y fecha de recepción. A continuación, se presenta en la figura 4.1.2. donde se observa lugar utilizado por personal administrativo del PIMA para la colocación del papel desechado.

Figura 4.1.2. Toma de muestra de papel

En la etapa de selección y pesado referente a la materia prima aserrín de pino **B¹**, inicialmente se procedió a retirar objetos extraños como hojas de árboles, piedras, hiervas y pedazos de madera, posteriormente se utilizó una malla para realizar la separación de partículas de aserrín a 5mm, ya que los moldes de la maquina briqueteadora utilizada solo permite compactar partículas menores a 5mm. Posteriormente la materia prima seleccionada fue colocada en un saco y se rotulo conteniendo peso de la muestra, especie de madera y tamaño de la partícula.
En la figura 4.1.3. se observa la malla utilizada para realizar la separación de tamaño menor a 5mm.

Figura 4.1.3. Selección de aserrín de pino

Para la etapa de selección y pesado correspondiente a la materia prima papel **B²**, inicialmente se procedió a retirar objetos extraños como grapas, separadores plásticos, papel con residuos de pegamento o exceso de tinta y pedazos de cartón, posteriormente se utilizó una guillotina de uso administrativo para cortar el papel en tiras de 1 cm de ancho aproximadamente y largo de dimensiones entre 10 cm y 25 cm, una vez cortado se depositó en un saco y se rotulo conteniendo el peso de la muestra. En la figura 4.1.4. se muestra la selección de papel reciclado.

Figura 4.1.4. Selección de papel reciclado

Para la etapa de mezclado **F** se utilizó la tabla de diseño experimental elaborado en minitab 19, el diseño de experimento generado propuso elaborar 9 briquetas con diferentes proporciones de aserrín de pino, papel reciclado y contenido de humedad. En la figura 4.1.5. se observa momento en que se realizaron las mezclas de materias prima.

Figura 4.1.5. Mezclado de materiales

Inicialmente se pesó el papel con ayuda de una balanza electrónica la cual nos permitió exactitud en los datos obtenidos, luego se agregó agua con el propósito de suavizar el papel y se dejó reposar por 24 horas, transcurrido este tiempo se observó que el papel se encuentro bien húmedo y blando y se utilizó una batidora para mezclarlo hasta obtener una mezcla pastosa e uniforme. Posteriormente se pesó el aserrín de pino previamente seleccionado a tamaño de 5mm se colocó en el recipiente de la mezcla realizada de papel y se utilizó una batidora para mezclar el aserrín con la pasta de papel hasta lograr una mezcla uniforme.

En la etapa de briqueteado **“G”** las cantidades de cada una de las mezclas fueron pesadas en una balanza electrónica la cual nos permitió obtener el peso exacto antes de briquetear la mezcla. Una vez pesado se colocó la mezcla en los moldes de la maquina briqueteadora y se aplicó presión con una gata hidráulica de 1 tonelada, se dejó reposar por 1 minuto para asegurar el drenaje del excedente de agua, luego se retiraron los moldes quedando las briquetas sobre una bandeja de

madera; Posteriormente se pesaron con ayuda de la balanza electrónica para calcular el porcentaje de humedad perdido en la etapa de briqueteado.

Luego de realizadas las briquetas se colocaron agrupadas sobre una bandeja de madera, se colocó etiquetas conteniendo el número de muestra para lo cual se utilizaron datos de la tabla de diseño experimental elaborado en minitab 19, la etapa de secado **"I"** se realizó de manera natural durante 96 horas realizando monitoreo con ayuda de higrómetro el cual nos proporciona el porcentaje de humedad de la briqueta. En la figura 4.1.6. se muestra las briquetas sobre la bandeja de madera cuando fueron retiradas de la briqueteadora.

Figura 4.1.6. Material briqueteado

En la etapa de empaquetado **"K"** se tomaron las briquetas previamente secadas a la humedad requerida en el diseño de experimento, se pesaron antes y después del empaquetado, posteriormente la bolsa fue sellada con ayuda de sellador a calor para evitar que las briquetas vuelvan a absorber humedad, ya que al ser elaboradas a partir de aserrín de pino mantienen la propiedad higroscópica que le permite absorber nuevamente humedad dependiendo del lugar donde sea almacenado.

La merma **"L"** en la etapa de empaquetado fue generada por los golpes y rozamiento al que fueron expuestas las briquetas en la etapa de empaquetado, los residuos generados en esta etapa se colocaron nuevamente en un recipiente con agua y de esta manera se obtuvo una mezcla que se logró briquetear nuevamente.

A continuación, se muestran en el diagrama de flujo a nivel experimental de las etapas del proceso productivo propuesto para la elaboración de briquetas a base de aserrín de pino y papel reciclado y contenido de humedad.

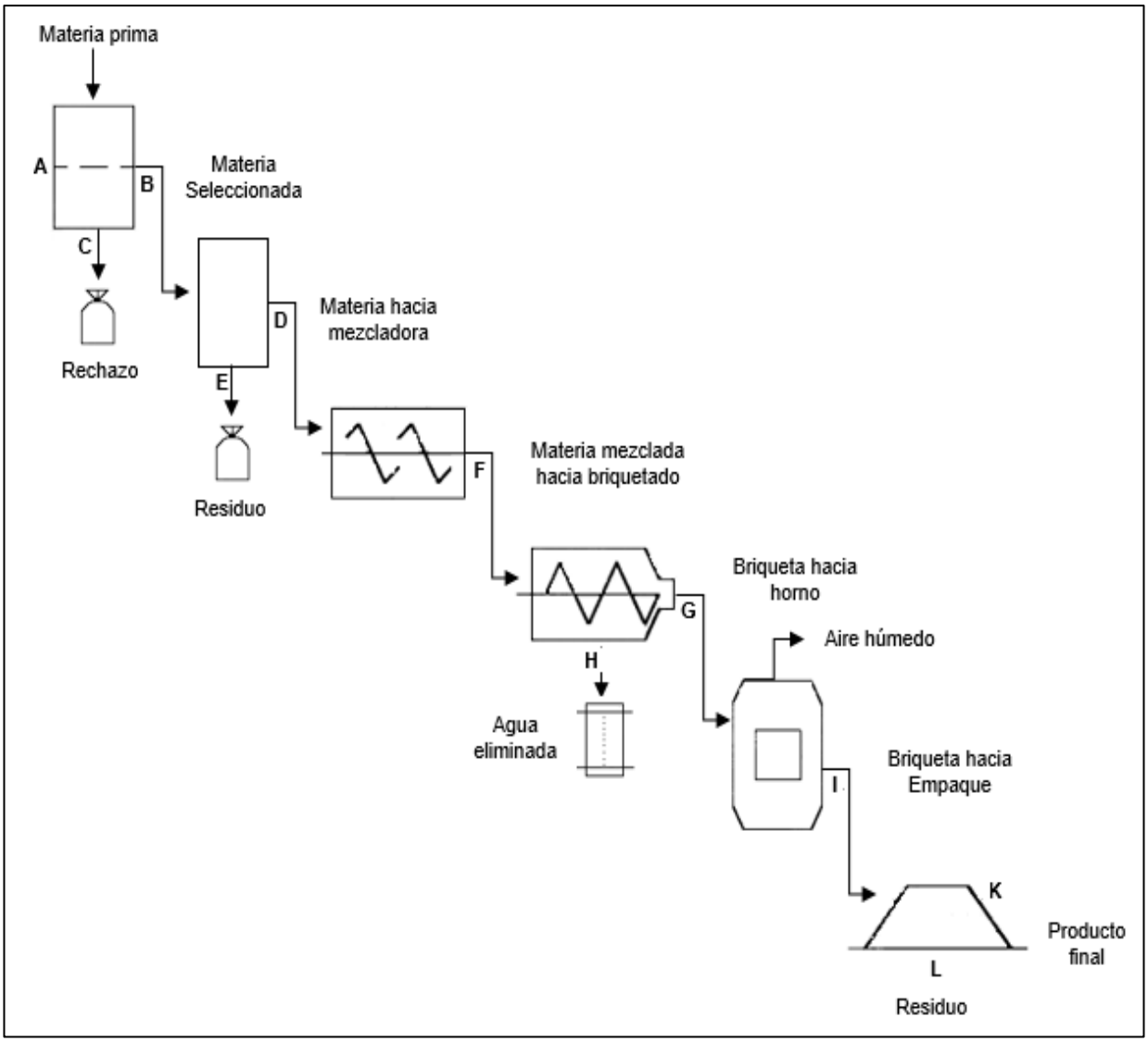


Figura 4.2. Diagrama de flujo del proceso experimental

4.5. Elaboración de cálculos.

4.5.1. Cálculo del volumen de la briqueta

El volumen de la briqueta es el de un cilindro, el cual tiene una forma geométrica que tiene dos bases paralelas circulares de igual tamaño.

El volumen es el área de la base que se extiende a través de la altura del cilindro. Sus unidades están representadas en unidades cúbicas, sean pulgadas, pies, centímetros, metros, etc.

La fórmula para cálculo del volumen de la briqueta fue:

$$V = \pi r^2 h \qquad \textbf{(Ec 4.1.)}$$

Dónde:

r = radio de la base (cm)

h = altura de la briqueta (cm)

4.5.2. Variación de humedad en el prensado

Inicialmente las cantidades de cada una de las mezclas fueron pesadas en una balanza electrónica para asegurar que cada mezcla estuviera dentro del peso exacto según diseño (tabla 6.2), luego se realizó el siguiente procedimiento:

Se colocó la mezcla correspondiente a cada ensayo en los moldes de la briqueteadora, posteriormente se le aplico presión de una tonelada para el cual se utilizó una gata hidráulica y se dejó reposar por 1 minuto para asegurar el drenaje del excedente de agua.

Luego se interrumpió la presión y se retiraron los moldes quedando las briquetas sobre una bandeja de madera.

Se pesaron nuevamente para calcular el porcentaje de humedad perdido en esta etapa del proceso el pesaje se realizó con ayuda de una balanza electrónica.

Se plantea la ecuación general de balance de masa para este proceso:

$$\mathbf{M1 = M2 + H1} \qquad \textbf{(Ec. 4.2)}$$

Dónde:

M1= Peso de la mezcla antes de compactarla (g).

M2= Peso de la mezcla después de compactarla (g).

H1= Agua eliminada en la compactación (g)

Como se desea conocer la cantidad de agua que se pierde se despeja H1:

$$\boldsymbol{H1 = M1 - M2} \qquad \textbf{(Ec. 4.2.1)}$$

6.4.3 Variación de humedad en el secado

La etapa de secado de las briquetas se realizó de acuerdo a los rangos de humedad para cada mezcla planteada en el diseño experimental DOE mezclas (tabla 4.2), para esta actividad se realizó monitoreo con un higrómetro para asegurar la eficiencia en los rangos de humedad.

Se plantea la ecuación:

$$\textbf{H2} = \boldsymbol{M3 - M2} \qquad \textbf{(Ec. 4.3)}$$

Donde:

M2: Peso de la mezcla después de compactarla (g).

M3: Peso de la mezcla después de secado (g).

H2: Agua evaporada (g).

Se procede a encontrar la densidad húmeda y seca dela muestra compactada:

$$\boldsymbol{\rho_1 = \frac{M2}{V}} \qquad \textbf{(Ec. 4.4)}$$

$$\boldsymbol{\rho_2 = \frac{M3}{V}} \qquad \textbf{(Ec. 4.4.1)}$$

A) Variación de la densidad

$$\Delta\boldsymbol{\rho = \frac{\rho_1}{\rho_1 - \rho_2} \times 100} \qquad \textbf{(Ec. 4.4.2)}$$

4.5.3 Medición del poder calorífico

El poder calorífico se determina en una bomba calorimétrica y por ello es una medición directa del calor generado por la combustión completa de masa (UNE-EN ISO, 2018).

Este análisis da una medida del poder calorífico superior (PCS) porque todo el calor generado lo recibe el calorímetro, ya que el vapor de agua que resulta se condensa entregando su energía de evaporación. En el poder calorífico neto (PCN), se asume que el vapor de agua generado por las reacciones no se condensa en el sistema de combustión y por ende este calor latente no se recupera (UNE-EN ISO, 2018).

4.5.4 Preparación del equipo

Se tomaron de 1 a 1.5 gramos de combustible pulverizado y se fabrica una pastilla. se tomó con una pipeta de 1 a 1.5 mililitros.

El combustible se colocó en el crisol de la bomba. El recipiente del agua se llenó con 2,000.00 a 2,200.00 gramos de agua.

Se cortó un trozo de alambre de ignición de 15 cm y se ató firmemente a los electrodos de la bomba calorimétrica, asegurándose que el alambre toque el combustible.

Se cerró la bomba, se presurizo con oxígeno a 20 atmósferas y se introdujo en el recipiente del agua.

Se introdujo el recipiente dentro de la camisa adiabática y se coloca la tapa correspondiente (UNE-EN ISO, 2018).

4.5.4.1 Prueba preliminar

Es conveniente familiarizarse con el termómetro del equipo, así como determinar su apreciación. Una vez que se haya alcanzado el equilibrio térmico entre los distintos componentes del sistema, se enciende el agitador, tomando nota cada minuto de la temperatura del agua en la bomba. Esto se hace hasta que la temperatura se estabilice o hasta que los cambios de temperatura se hagan constantes. (UNE-EN ISO, 2018)

4.5.4.2. Prueba principal

Una vez logrado lo anterior, se conectó eléctricamente los electrodos de la bomba, presionando el interruptor correspondiente. En este momento el hilo de hierro se tornó incandescente y se fundio, formándose óxido de hierro y quemando completamente el combustible. En ese momento la temperatura comienzo a subir rápidamente. Las lecturas de temperatura siguieron tomándose minuto a minuto hasta que se estabilizo (UNE-EN ISO, 2018).

4.5.4.3. Prueba complementaria

luego de finalizar la prueba principal se apreciaron nuevos cambios de temperatura, estos se anotaron minuto a minuto hasta verificar la estabilidad o hasta que los cambios sean constantes. Si esto no ocurre, la prueba hubiera se finalizado cuando el número de lecturas fue igual al de la prueba preliminar. (UNE-EN ISO, 2018).

4.6. Prueba de ebullición del agua

Para la evaluación de eficiencia de las briquetas obtenidas en comparación con otras especies de madera utilizadas se procedió de la siguiente manera:

Se realizó prueba de cocción a cuatro especies de madera (roble, guanacaste, quebracho y eucalipto) y una a la briqueta con proporción 6.93% contenido de humedad, 68.07% aserrín de pino y 25% de papel reciclado.

las especies de leña y las briquetas fueron evaluadas, con el fin de determinar su rendimiento como combustible sólido, a través de parámetros como tiempo de cocción y cantidad de combustible consumido.

Para la realización de la prueba se utilizaron 1,000.00 ml de agua y 1,190.68 g de masa seca de cada una de las especies de madera (roble, guanacaste, quebracho y eucalipto) en el caso de las briquetas se utilizaron seis unidades ya que tienen un peso unitario de 198.44 g equivalente a 1190.68 g

Los 1,000.00 ml de agua se depositaron en una olla metálica y se calentó la cantidad de agua hasta llegar al punto de ebullición, este proceso se repitió con cada una de las especies de leña y briquetas.

De esa manera, se obtuvo el consumo específico de combustible por especie de leña, que indica cuántos gramos de combustible sólido fueron necesarios para hacer llegar el agua al punto de ebullición, así como el tiempo de cocción. Para obtener datos más exactos, se realizó la prueba haciendo uso del fogón tradicional.

Los datos obtenidos fueron procesados y analizados con ayuda de Excel posteriormente se realizaron dos graficas: una para analizar el comportamiento del tiempo que tardo cada especie en llevar al agua al punto de ebullición y la otra para analizar la cantidad de biomasa requerida para llevar el agua al punto de ebullición.

V. Presentación y discusión de resultados

5.1 Evaluación y análisis de pruebas de laboratorio

5.1.1. Porcentaje de humedad en aserrín

En la tabla 5.1.se muestran los porcentajes obtenidos de humedad de muestra de aserrín de pino. Como valor promedio obtenido se obtuvo 12.83 % el valor de humedad más bajo fue 12.71% y el resultado más alto obtenido fue 12.95 %.

Según el análisis realizado se observó que los porcentajes de humedad presentes en el aserrín son bajos y se encuentran dentro del rango de humedad ya que para la mayoría de procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30% (acápite 3.1.3) en este caso no será necesario implementar operaciones adicionales para su acondicionamiento antes de ingresar al proceso de elaboración de las briquetas.

Tabla 5.1. Porcentaje de humedad del aserrín

Peso recipiente (g)	Peso muestra (g)	Peso recipiente +peso muestra (g)	Después del calentamiento (g)	Peso muestra luego de calentamiento (g)	% Humedad
120.10	10.25	130.35	129.04	8.94	12.71
120.10	10.14	130.24	128.94	8.84	12.83
120.10	10.04	130.14	128.84	8.74	12.95
				Promedio	**12.83**

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Porcentaje de humedad en el papel

En la tabla 5.2. se muestran los porcentajes obtenidos de humedad de muestra de papel reciclado. Como valor promedio obtenido se obtuvo 23.32 % el valor de humedad más bajo fue 23.10 % y el resultado más alto obtenido fue 23.53.

Según el análisis realizado se observó que los porcentajes de humedad presentes en el papel reciclado son bajos y se encuentran dentro del rango de humedad, ya que para la mayoría de procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30% (acápite 3.1.3) en este caso no será necesario implementar operaciones adicionales para su acondicionamiento antes de ingresar al proceso de elaboración de las briquetas.

Tabla 5.2. Porcentaje de humedad en papel reciclado

Peso recipiente (g)	Peso muestra (g)	Peso recipiente + peso de muestra (g)	Después del calentamiento (g)	Peso muestra luego de calentamiento (g)	% Humedad
120.10	10.14	130.24	127.90	7.80	23.10
120.10	10.04	130.14	127.80	7.70	23.32
120.10	9.94	130.04	127.70	7.60	23.53
				Promedio	**23.32**

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Porcentaje de cenizas del aserrín.

En la tabla 5.3. se muestran los porcentajes obtenidos de cenizas presentes en el aserrín con valor promedio obtenido de 22.99 %, el valor más bajo fue 22.28 % y el valor más alto 22.99 %.

Se observó que los porcentajes de cenizas presentes en el aserrín generalmente representaron valores bajo esto es un resultado positivo e indica que el aserrín de pino puede ser utilizado para la elaboración de las briquetas ya que el porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia solida no combustible por kilogramo de material.

Tabla 5.3. Porcentaje de cenizas del aserrín

Peso recipiente (g)	Peso muestra (g)	Peso recipiente + peso muestra (g)	Después calentamiento (g)	Peso muestra luego de calentamiento (g)	% cenizas
120.10	10.25	130.35	122.53	2.42	23.70
120.10	10.14	130.24	122.43	2.33	22.99
120.10	10.04	130.14	122.33	2.23	22.28
				Promedio	**22.99**

Fuente: Elaboración propia.

5.2.4 Porcentaje de cenizas en el papel

En la tabla 5.4. se muestran los porcentajes obtenidos de cenizas presentes en el aserrín con valor promedio obtenido de 32.16%, el valor más bajo fue 31.53 % y el valor más alto 32.79 %.

Se observó que los porcentajes de cenizas presentes en el papel reciclado generalmente representaron valores bajo esto es un resultado positivo e indica que el aserrín de pino puede ser utilizado para la elaboración de las briquetas ya que el porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia solida no combustible por kilogramo de material. En comparación con el aserrín tienen una diferencia porcentual de 9.17 %.

Tabla 5.4. Porcentaje de cenizas del papel reciclado

Peso recipiente (g)	Peso muestra (g)	Peso recipiente + peso muestra (g)	Después calentamiento (g)	Peso muestra luego de calentamiento (g)	% cenizas
120.10	10.14	130.24	123.42	7.80	32.79
120.10	10.04	130.14	123.33	7.70	32.16
120.10	9.94	130.04	123.23	7.60	31.53
				Promedio	**32.16**

Fuente: Elaboración propia.

5.3 Elaboración de cálculos del análisis físico de las briquetas

En la tabla 5.5. se muestran los resultados del cálculo de volumen de las briquetas consideradas en el diseño experimental DOE mezcla Tabla 4.2.

El objetivo de este cálculo fue obtener los resultados del volumen de las briquetas para cada una de las mezclas.

Como valor promedio del volumen final se obtuvo 746.72 cm^3, el valor más bajo obtenido fue 669.193 cm^3 correspondiente a la muestra 4 y el valor máximo que se obtuvo fue 816.899 cm^3 correspondiente a la muestra 6, ambos datos representados en tabla 5.5.

Analizando el comportamiento de la variación de las porciones de mezclas; las briquetas que tiene mayor porcentaje de aserrín de pino obtuvieron mayor volumen en comparación con las que tienen mayor porcentaje de papel.

Se observó que la cantidad de aserrín tiene una gran influencia en la variación del volumen ya que al ser más denso no cubre los espacios más pequeños en el proceso de briqueteado.

Tabla 5.5. Calculo del volumen de las briquetas

Muestra (g)	Humedad %	Aserrín %	Papel %	Volumen inicial (cm^3)	Volumen final (cm^3)	Diferencia (cm^3)
1	5	25	70	813.45	781.31	32.13
2	15	25	60	784.19	753.21	30.97
3	5	70	25	809.65	777.66	31.98
4	15	60	25	696.71	669.19	27.52
5	10	45	45	822.00	789.53	32.47
6	8	35	58	850.49	816.89	33.59
7	13	35	53	746.96	717.45	29.50
8	8	58	35	727.01	698.29	28.71
9	13	53	35	746.39	716.90	29.48
Promedio				**777.43**	**746.72**	**30.71**

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1. Variación de humedad en el briqueteado

En la tabla 5.6. podemos apreciar los resultados del cálculo de variación de humedad en el proceso de briqueteado.

Como valor promedio obtenido de la densidad húmeda se obtuvo 0.58 cm^3 correspondiente a la muestra 3 y el valor máximo de la densidad obtenido fue 0.628 cm^3 correspondiente a la muestra 7, ambos datos presentados en tabla 5.6.

Analizando en el comportamiento de los datos se vio influencia en la variación de peso, se observó que las briquetas que tienen mayor porcentaje de papel son menos afectadas ya que el papel al tener una consistencia pastosa en el proceso de briqueteado cubre los espacios que no puede llenar el aserrín, como consecuencia se obtiene un producto de menos altura, pero de mayor peso.

Tabla 5.6. Variación de humedad en el briqueteado

Muestra	Peso (g)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm^3)	Densidad ($cm^{3)}$
1	480.11	11	8.56	813.07	0.59
2	473.22	11	8.26	784.20	0.60
3	415.51	11	8.52	809.65	0.51
4	414.55	11	7.34	696.71	0.60
5	454.22	11	8.65	822.00	0.55
6	469.65	11	8.95	850.50	0.55
7	469.00	11	7.86	746.96	0.63
8	439.92	11	7.65	727.02	0.61
9	428.55	11	7.86	746.39	0.57
Promedio	**449.41**	**11**	**8.18**	**777.39**	**0.58**

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2. Variación de humedad en el secado

En la tabla 5.7. se muestran los resultados del cálculo de variación de humedad en el proceso de secado.

Como valor promedio obtenido de la densidad se obtuvo 0.483 cm^3, el valor más bajo obtenido fue 0.427 cm^3, correspondiente a la muestra 3 y el valor máximo fue 0.523 cm^3.

Analizando el comportamiento de la proporción de mezclas realizado se observó que las briquetas que tienen mayor porcentaje de papel tienen una mayor densidad esto debido a que el papel para poder conformarse como una pasta consume mayor cantidad de agua en comparación con el aserrín, pero al momento del secado sede rápidamente el exceso de humedad dando como consecuencia perdida en dimensión del producto final. Como resultado se obtiene un producto más pequeño, pero más compacto.

Tabla 5.7. Variación de humedad en el secado

Muestra	Peso (g)	Humedad %	Aserrín %	Papel %	Ancho (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm^3)	Densidad (g/cm^3)
1	384.08	5	25	70	10.89	8.39	781.31	0.49
2	378.57	15	25	60	10.89	8.09	753.21	0.50
3	332.41	5	70	25	10.89	8.35	777.66	0.42
4	331.63	15	60	25	10.89	7.18	669.19	0.49
5	363.37	10	45	45	10.89	8.48	789.53	0.46
6	375.72	8	35	58	10.89	8.77	816.89	0.46
7	375.19	13	35	53	10.89	7.70	717.45	0.52
8	351.93	8	58	35	10.89	7.50	698.29	0.50
9	342.83	13	53	35	10.89	7.70	716.90	0.47
Promedio					**10.89**	**8.02**	**746.72**	**0.48**

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3. Variación de densidad total de las briquetas

Los cálculos de densidad total se representan en la Tabla 5.8. donde se aprecian los resultados obtenidos para cada muestra analizada.

Como valor promedio obtenido de la densidad total se obtuvo 51.749 %, el valor más bajo obtenido fue 48% correspondiente a la muestra 7 y el valor más alto de densidad total obtenido fue 57% según muestra 3.

Analizando el comportamiento en las mezclas realizadas se determina que la cantidad de papel afecta significativamente; tanto en el proceso de briqueteado (densidad humedad) como en el proceso de secado (densidad seca). Esto debido a la consistencia y gran variación en proporción del producto final.

Tabla 5.8. Variación de densidad total de las briquetas

Muestra	Humedad %	Aserrín %	Papel %	Densidad Húmeda g/cm³	Densidad Seca g/cm³	Δ Densidad %
1	5	25	70	0.59	0.49	51
2	15	25	60	0.60	0.50	50
3	5	70	25	0.51	0.42	57
4	15	60	25	0.59	0.49	50
5	10	45	45	0.55	0.46	54
6	8	35	58	0.55	0.46	54
7	13	35	53	0.62	0.52	48
8	8	58	35	0.60	0.50	50
9	13	53	35	0.57	0.47	52
Promedio				**0.57**	**0.48**	**51.77**

Fuente: Elaboración propia.

5.3.4. Variación de peso en las briquetas

En la tabla 5.9. se representa el cálculo de variación de peso de las briquetas tanto del proceso de briqueteado como en proceso de secado.

Como valor promedio se obtuvo 337.061 cm^3, el valor más bajo obtenido fue 310.911 correspondiente a la muestra 4 y el valor máximo obtenido 360.083 cm^3 correspondiente a la muestra 1.

Según análisis se concluye que la mezcla con mayor cantidad de papel obtuvo una mayor variación en el peso, esto debido a que la mezcla de papel está conformada con agua lo que aporte un porcentaje mayor al 40% de su peso total, pero en los procesos de briqueteado y secado seden mayor porcentaje de agua.

Tabla 5.9. Variación de peso de las briquetas

Muestra	Humedad %	Aserrín %	Papel %	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Diferencia (g)
1	5	25	70	744.17	384.08	360.08
2	15	25	60	733.49	378.57	354.91
3	5	70	25	644.04	332.41	311.63
4	15	60	25	642.54	331.63	310.91
5	10	45	45	704.03	363.37	340.66
6	8	35	58	727.96	375.72	352.24
7	13	35	53	726.94	375.19	351.74
8	8	58	35	681.88	351.93	329.94
9	13	53	35	664.24	342.83	321.41
Promedio				**696.59**	**359.53**	**337.06**

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Análisis del diseño experimental DOE mezclas

A continuación, se muestra en la tabla 5.10. los resultados de prueba de calorimetría, para la cual se requirieron nueve muestras de briquetas con diferentes proporciones de los materiales aserrín de pino, papel reciclado y humedad.

Tabla 5.10. Resultados de prueba de calorimetría

Orden Corrida	Humedad %	Aserrín %	Papel %	poder Calorífico Kj/Kg
1	5	25	70	18.42
2	15	25	60	15.87
3	5	70	25	19.25
4	15	60	25	15.92
5	10	45	45	17.57
6	8	35	58	17.83
7	13	35	53	16.53
8	8	58	35	17.98
9	13	53	35	16.69

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra en la figura 5.1. el diseño simplex en cantidades.

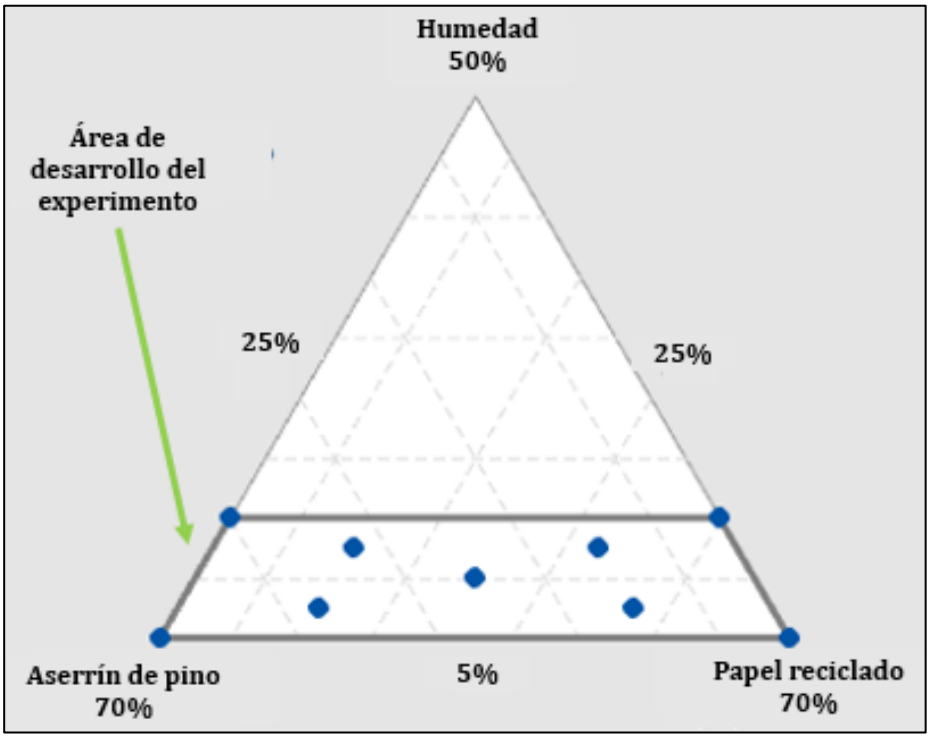


Figura 5.1. Diseño simplex en cantidades

La figura 5.1. de diseño simplex muestra el área seleccionado por minitab la cual representa el área en la que se desarrolló el experimento.

En la gráfica también se observan nueve puntos cada uno de ellos representa una briqueta realizada con diferentes proporciones de aserrín de pino, papel reciclado y humedad.

Para el caso del aserrín de pino y papel reciclado se puede observar que sus vértices se están desarrollando con los niveles de 70% máximo y 25% mínimo, en el caso de la humedad se observa que sus vértices se están desarrollando en 15% máximo y 5% mínimo

5.4.1. Regresión para mezclas: poder calorífico vs. humedad, aserrín de pino y papel reciclado.

A continuación, se muestra en la tabla 5.11. el coeficiente de regresión estimados para poder Calorífico.

Tabla 5.11. Coeficientes de regresión estimados para poder calorífico

Término	Coef	EE del coef.	Valor T
Humedad	-454	525	*
Aserrín de pino	23.92	2.88	*
Papel reciclado	21.39	2.88	*
Humedad*Aserrín	541	646	0.84
Humedad*Aglomerante (papel)	557	646	0.86
Aserrín*Aglomerante (papel)	-34.6	40.2	-0.86

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra en la tabla 5.12 el resumen del modelo.

Tabla 5.12. Resumen del modelo

R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)
99.10%	97.60%	0.87	91.86%

Fuente: Elaboración propia.

Para este diseño se consideró como la variable de respuesta el poder calorífico porque el objetivo del análisis experimental fue encontrar que proporción con los tres componentes genera mayor poder calorífico. La R cuadrada dice que el 97.60% de la respuesta es explicado por este modelo quiere decir que es confiable el diseño que se desarrolló.

En la figura 5.2 se observa la gráfica de probabilidad normal, esa grafica representa la normalidad del proceso, se pudo ver que los residuos representados por los puntos azules se ajustan bien a la línea recta que representa la gráfica de regresión lo que da confiabilidad con el diseño. En la figura 5.2 la gráfica Vs ajuste representa el comportamiento de las varianzas y dice que no hay manipulación de los residuos lo que quiere decir que tiene una varianza confiable y homogénea con distribución normal.

También se pudo observar el histograma que tiene un comportamiento normal y esto indica que no tenemos que preocuparnos y podemos continuar con el diseño.

A continuación, se presenta en la figura 5.2 las gráficas de residuos para poder calorifico.

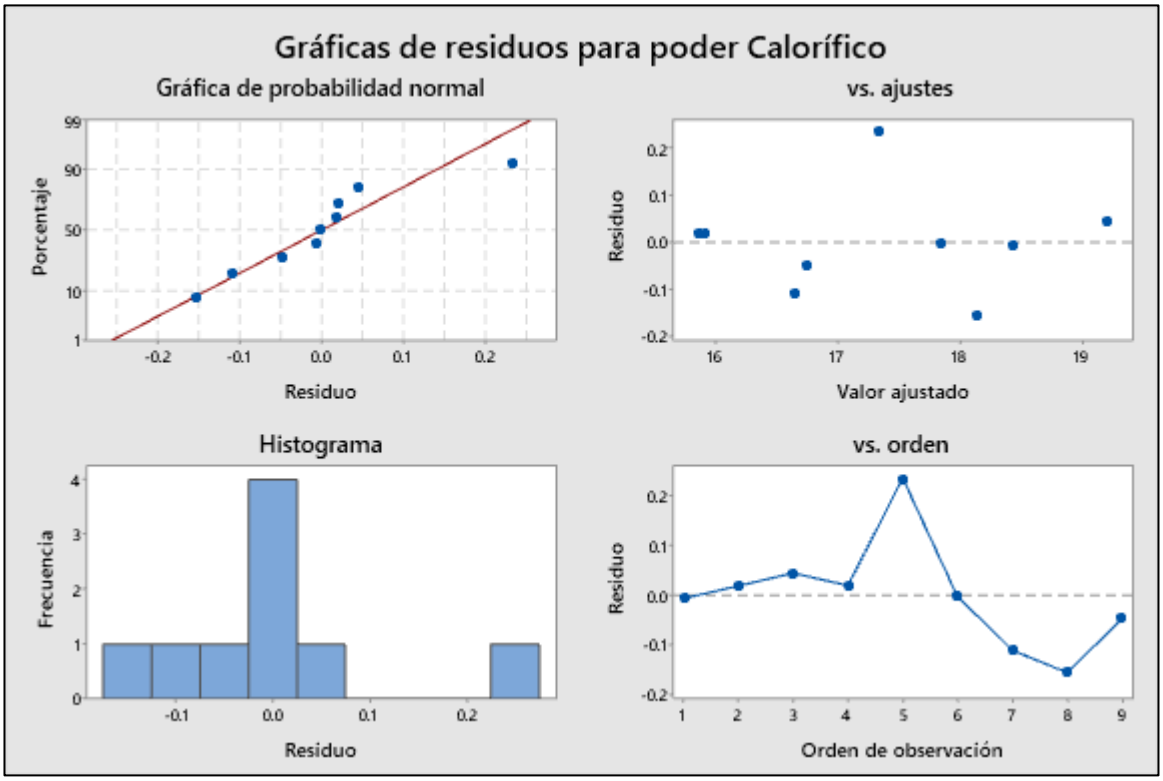


Figura 5.2. Graficas de residuos para poder calorifico

La figura 5.3 representa el efecto e impacto en los cambios de cantidad, indica cuanto poder calorífico se logra generar con esta combinación.

Esta no es la mejor mezcla solo indica que paso con el rastreo de respuesta de proporciones tomando en cuenta la combinación de 10% humedad, 45% aserrín y 45% de aglomerante (papel).

La línea azul que representa la humedad se ve que entre mayor cantidad del componente se agrega el poder calorífico va disminuyendo, caso contrario con las líneas verde que representa el aglomerante (papel) y roja que representa al aserrín entre mayor cantidad se agrega de estos componentes a la mezcla el poder calorífico aumenta.

A continuación, se presenta en la figura 5.3 la Gráfica de rastreo de respuesta de Cox.

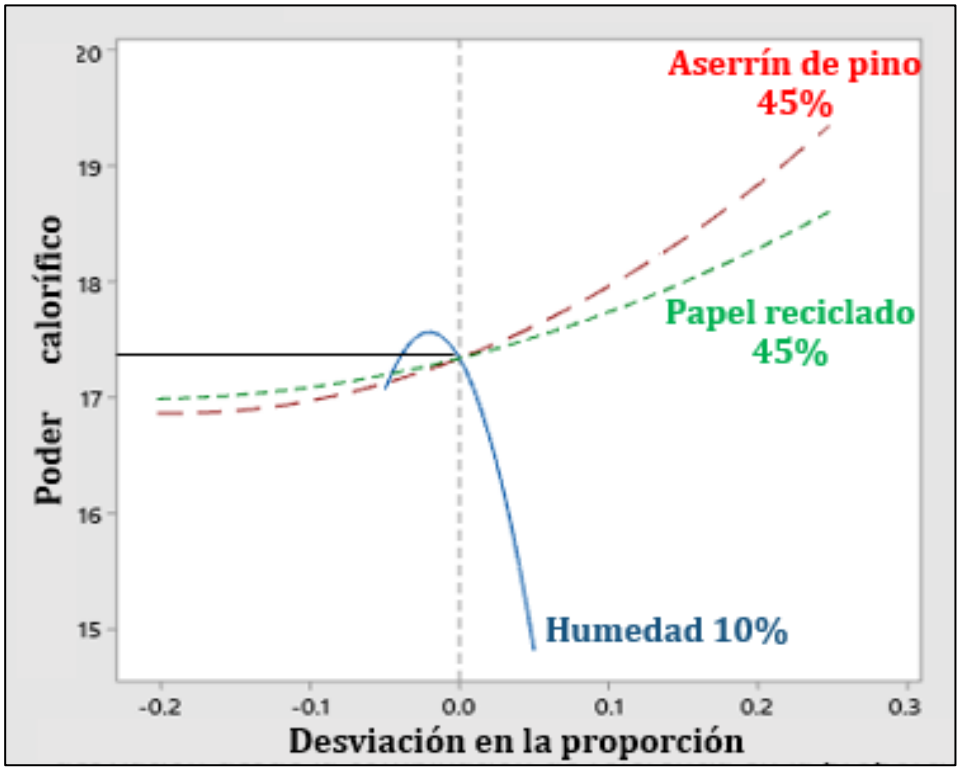


Figura 5.3. Gráfica de rastreo de respuesta de cox

La figura 5.4. grafica de contorno de mezclas para poder calorífico, el área más oscura representa la mayor concentración de poder calorífico y las áreas más claras representan las que contienen la menor concentración de poder calorífico Se aprecia que el área oscura está más inclinada hacia el componente aserrín y aglomerante (papel) y en menor proporción para el componente humedad. En el caso del vértice humedad a medida que se acerca al punto de su alta concentración el poder calorífico va disminuyendo.

A continuación, se muestra en la figura 5.4. la Gráfica de contorno de mezcla para poder Calorífico.

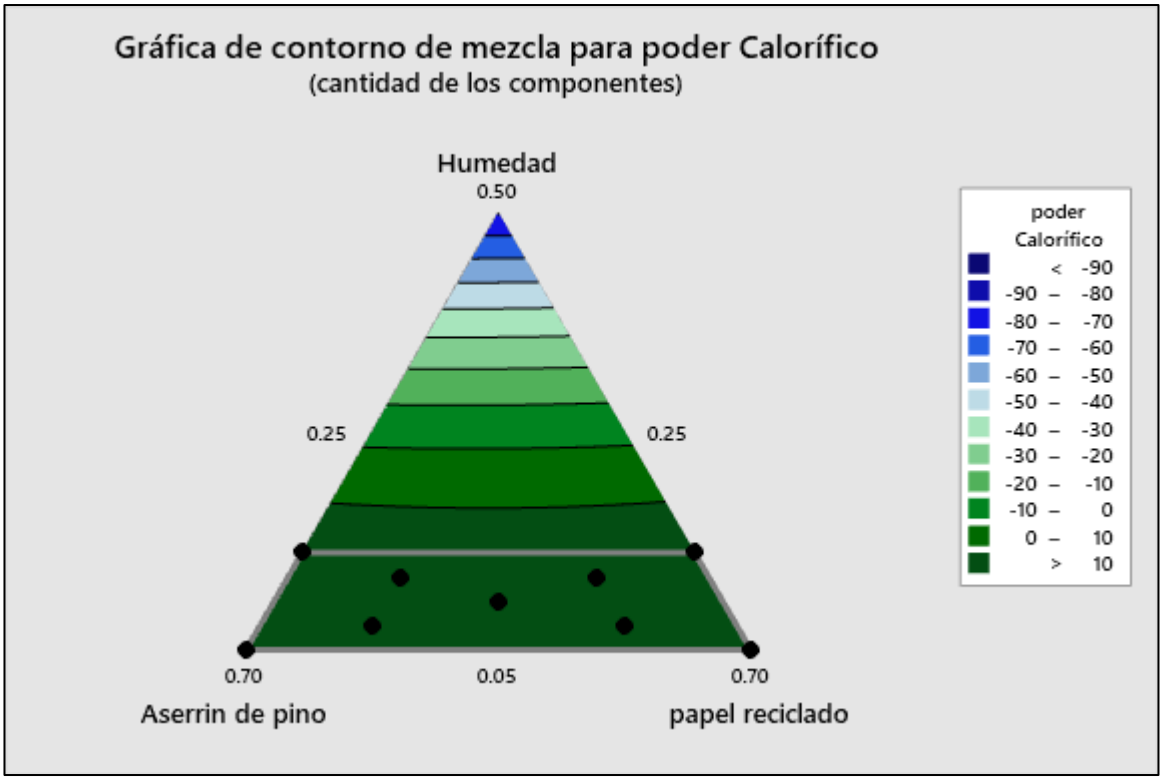


Figura 5.4. Gráfica de contorno de mezcla para poder calorífico

La figura 5.5. representa la gráfica de superficie de respuesta, se pueden apreciar los tres componentes ubicados en cada uno de los vértices se ve que la mayor concentración del poder calorífico esta con los componentes aserrín y aglomerante (papel) y en una menor proporción para el componente humedad evidenciando de esta manera que es el que menos aporta en la generación del poder calorífico.

A continuación, se muestra en la figura 5.5. la gráfica de superficie de mezcla de poder Calorífico.

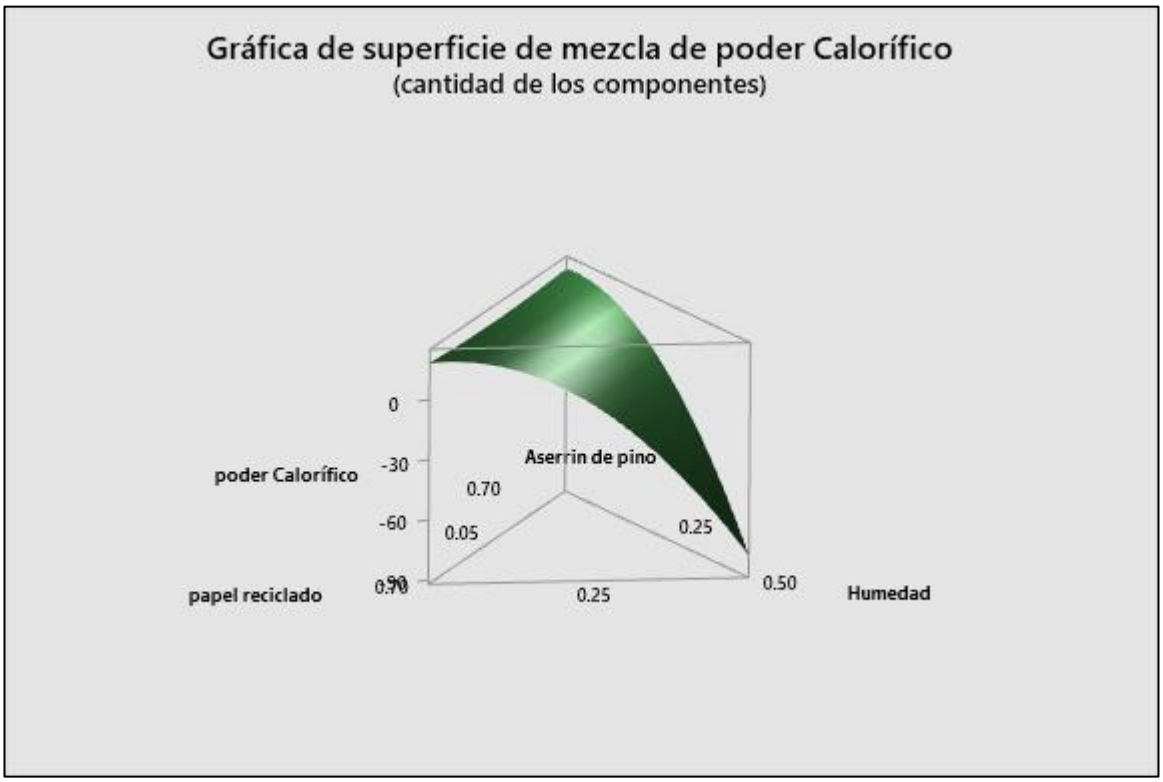


Figura 5.5. Gráfica de superficie de mezcla de poder calorífico

5.4.2. Respuesta del análisis del diseño en minitab

A continuación, se muestra en la tabla 5.14. los parámetros para optimización de respuesta.

Tabla 5.13. Parámetros para optimización de respuesta

Meta	Inferior	Objetivo	Superior
Máximo	0	20	20

Fuente: Elaboración propia

5.4.2.1. Solución global

Humedad: 7%

Aserrín de pino: 68%

Aglomerante: 25%

5.4.2.2. Respuestas pronosticadas

Poder calorífico: 19.41 Kj/Kg

Deseabilidad: 97%

Deseabilidad compuesta: 97%

La figura 5.6. representa la optimización de respuesta, entrega una solución global del diseño del experimento de mezclas, donde dice que la máxima cantidad de poder calorífico que se puede obtener es 19.4125 KJ/Kg con las proporciones humedad 6.93%, aserrín 68.07% y aglomerante (papel) 25%.

Son las cantidades con la que se debe hacer la mezcla de los tres componentes para lograr la proporción optima que permite generar el mayor poder calorífico.

La línea representada de color rojo es la que representa la cantidad de porción de cada componente el lado derecho indica la cantidad de cada componente que aporta a la generación del poder calorífico y al lado izquierdo es la cantidad de mezcla que no aporta a la generación de poder calorífico.

El punto de intersección para cada componente indica el punto donde se corta la línea de aporte de generación de poder calorífico. La deseabilidad compuesta del diseño del experimento es del 97.06 %. El límite inferior para la prueba de optimizador de respuesta fue de cero y el límite superior de 20 para garantizar la búsqueda del poder calorífico en un rango mayor al resultado de las mezclas analizadas en el diseño DOE mezclas.

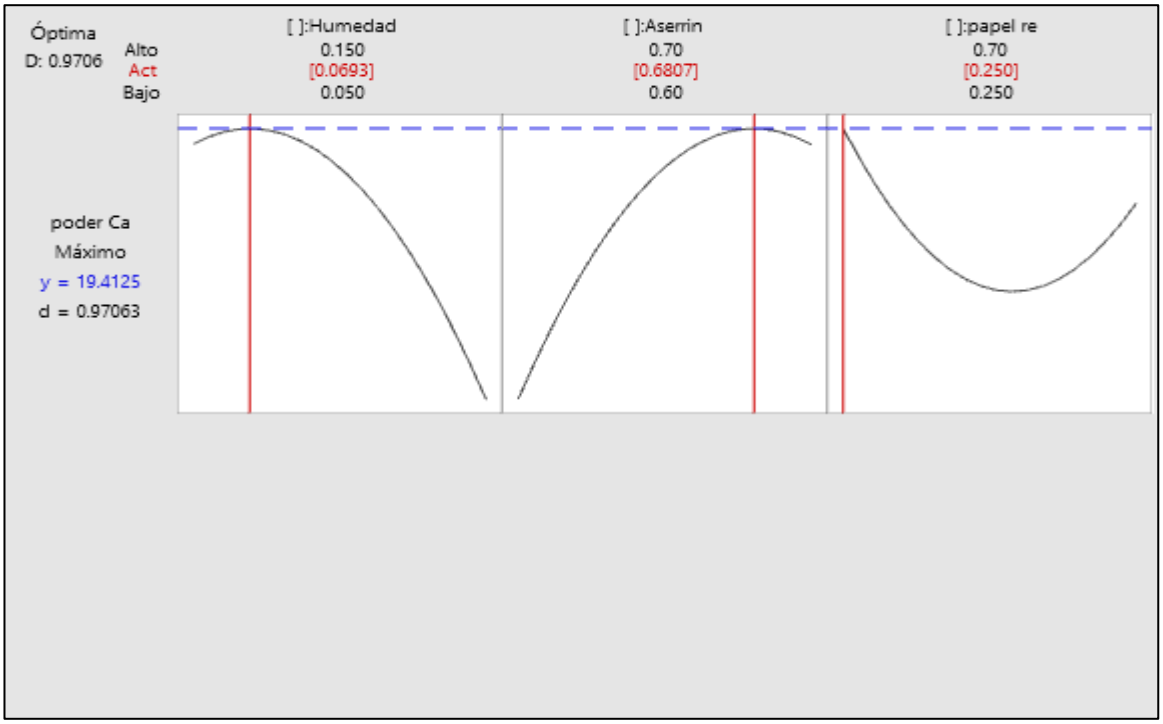


Figura 5.6 Optimización de respuesta

5.5 Análisis prueba de ebullición del agua

5.5.1. Prueba de ebullición del agua

Los resultados de la prueba de cocción fueron presentados en la figura 5.7. donde mostraron que especies como el Roble y Quebracho tomaron 4 minutos en llevar al punto de ebullición al agua. La briqueta con mezcla 6.93% humedad, 68.07% aserrín y 25% aglomerante (papel) le tomo 4.2 minutos en llevar al punto de ebullición al agua; sin embargo, el Eucalipto y Guanacaste requirieron de 6.2 y 9 minutos respectivamente.

Se analizaron los resultados y se concluyó que las especies maderables más eficientes en llevar al punto de ebullición al agua fueron el Roble y Quebracho seguido por la briqueta mezcla. La especie con comportamiento deficiente fue el Guanacaste que tardo 9 minutos para llevar el agua al punto de ebullición.

Los resultados obtenidos de la prueba de cocción para analizar el consumo de combustible sólido se representan en la figura 5.8. donde se evidencia que las especies maderables como el Roble requirió 135 g, la briqueta 230 g y quebracho 340 g, en el caso de la especie que requirieron quemar la mayor cantidad de combustible fueron el Guanacaste 805 g y en menor consumo el Eucalipto con 580g.

Se analizaron los resultados obtenidos y se concluyó que las especies más eficientes fueron el Roble con un consumo del 12.1% del total de la masa asumida para la realización del ensayo, en segundo lugar, de eficiencia por consumo de materia la briqueta consumió 20.6 % de la masa asumida para la realización del ensayo. La especie que resulto más deficiente fue el Guanacaste ya que consumió 72% de la masa asignada para la realización del ensayo.

Las especies con mayor concentración de poder calorífico, demostraron un consumo de combustible menor que las demás especies. Esto indica que las especies forestales de mayor contenido energético permitieron reducir la cantidad de masa utilizada como combustible.

La madera de especies con mayor poder calorífico como el Roble, fue altamente eficiente, ya que aceleraron el tiempo de cocción a 4 minutos en llegar al punto de

ebullición al agua y redujeron el consumo de combustible en la cantidad de utilizase.

Las especies con menor densidad como Guanacaste y Eucalipto, consumieron mayor cantidad de combustible y su tiempo de cocción deficiente.

Las especies con alto contenido de humedad Guanacaste y Eucalipto, presentaron mayor densidad. Además, la cantidad de agua presente en la madera afectó significativamente su propiedad calorífica, por lo cual se requirió de mayor esfuerzo y tiempo para poder llevar el agua al punto de ebullición.

El contenido de humedad, fue uno de los factores de mayor influencia en la eficiencia de las briquetas para su uso como combustible, debido a que influyó tanto en la densidad como en la cantidad de energía contenida en el poder calorífico.

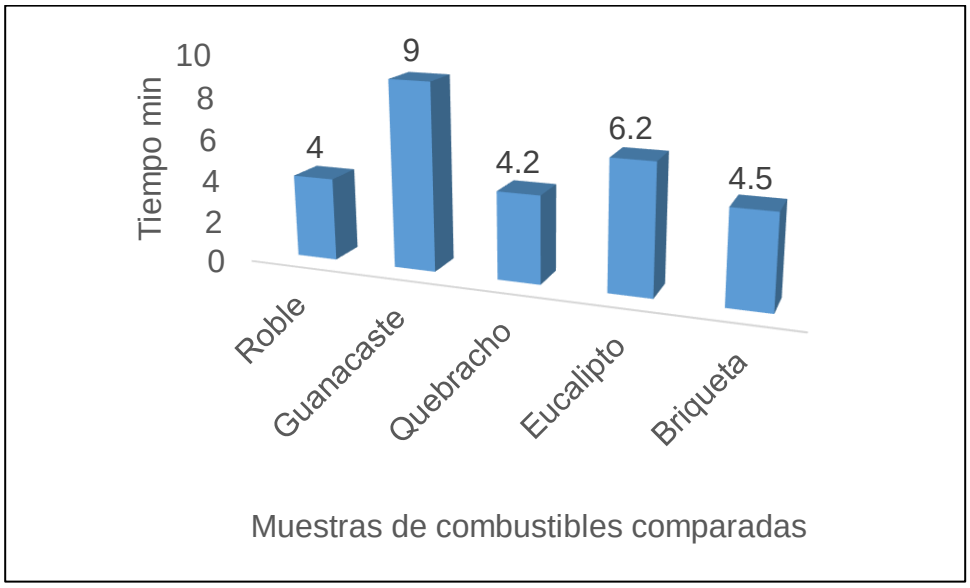


Figura 5.7. Tiempo de cocción por especie de combustible sólido

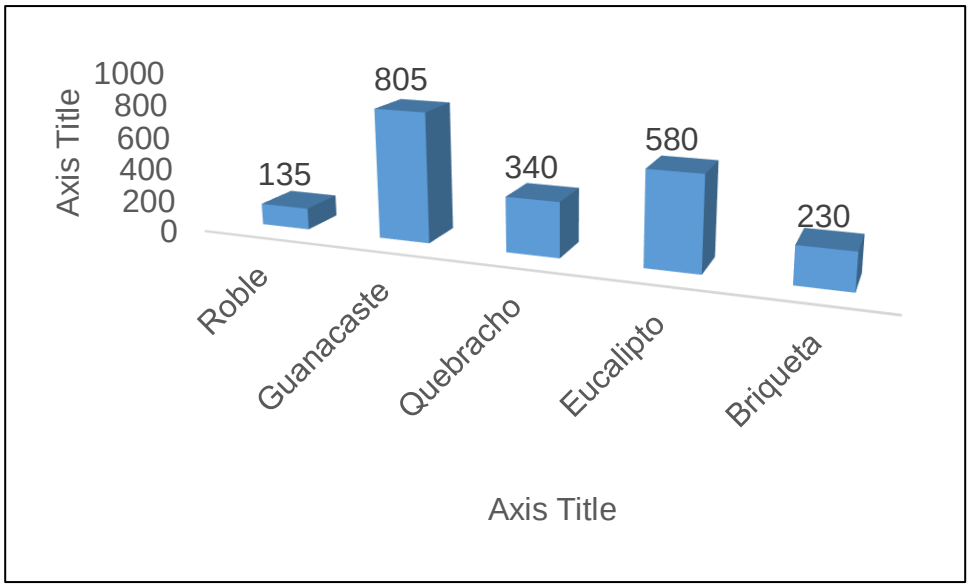


Figura 5.8. Consumo de combustible sólido

VI. Conclusiones

Mediante la caracterización de los materiales aserrín de pino y papel reciclado, se obtuvieron resultados positivos referente al porcentaje de humedad y cenizas, ya que el porcentaje promedio de humedad fueron 12.83% en el aserrín y para el papel 23.32%, concluyendo que los porcentajes de humedad presente en ambos materiales se encuentran dentro del rango que se requiere para que la biomasa pueda ser utilizada en la elaboración de briquetas el cual es 30%, en el caso del porcentaje de cenizas los valores promedios fueron 22.99% en el aserrín para el papel 33.16%, concluyendo que los porcentajes de cenizas presentes en el papel y el aserrín representan un promedio bajo los cuales indicaron la cantidad de materia solida no combustible en el material.

Mediante el estudio de las condiciones experimentales se determinó el proceso de elaboración de briquetas a nivel experimental utilizando aserrín de pino, papel como aditivo aglomerante y el porcentaje de humedad, concluyendo que cada una de las etapas debe de llevar un control riguroso de cumplimiento para obtener resultados positivos, en la etapa de mezclado se controlaron la cantidad de proporciones y uniformidad de mezclas la cual contribuye a mantener la briqueta como un sólido y en el caso de el secado fue la etapa con mayor impacto ya que con una pequeña variación en el porcentaje requerido menor al 7%, podría reducir la cantidad de poder calorífico obtenido.

Atravéz de cálculos y pruebas de laboratorio de se determinó que la cantidad de papel afecta significativamente tanto en el proceso de briqueteado (densidad humedad) como en el proceso de secado (densidad seca). Esto debido a la variación de tamaño y peso del producto final.

En la prueba de calorimetría según análisis de respuesta en minitab se determinó que 19.41 Kj/Kg es el valor máximo que se puede obtener usando el aserrín de pino y papel como materiales, aplicando las proporciones Humedad 7%, aserrín de pino 68% y aglomerante: 25%.

VII. Recomendaciones

- Se recomienda secar las briquetas en un rango entre el 5% y 15% de humedad, ya que es uno de los factores de mayor influencia en la eficiencia de las briquetas para su uso como combustible, debido a que influye tanto en la densidad como en la obtención de un mayor poder calorífico.

- Para la estimación de costos se utilizó una briqueteadora que fue construida para fines académicos, pero si se desea obtener una mejor rentabilidad es recomendable mejorar esta tecnología fabricando una máquina que procese más briquetas en menos tiempo.

VIII. Nomenclatura

A continuación, se muestra en la tabla 8.1. la nomenclatura utilizada en el presente informe

Tabla 8.1 Nomenclatura

símbolo	significado	unidades de medida
ρ	densidad	Kg/m^3
r	Radio de la base de la briqueta	Cm
h	Altura de la briqueta	Cm
M1	Peso de la mezcla antes de compactarla	g
M2	Peso de la mezcla después de compactarla	g
H1	Agua eliminada en la compactación	g
M3	Peso de la mezcla después de secado	g
H2	Agua evaporada	g
V	volumen de la briqueta	cm^3
PC	Poder calorífico	MJ/Kg

Fuente: Elaboración propia.

8.1. Acrónimos

A continuación, en la tabla 8.2. se muestran el listado de acrónimos utilizados en el presente informe.

Tabla 8.2. listado de acrónimos

INAFOR	Instituto Nacional Forestal
PYMES	Pequeñas y medianas empresas
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
DOE	Diseño de Experimentos para enfoques estadísticos para la optimización de las reacciones
PIMA	Programa Institucional de la Madera
PCS	Poder Calorífico Superior
PCN	Poder Calorífico Neto

Fuente: Elaboración propia.

IX. Bibliografía

10628, I. (Septiembre 2001). Diagrama de flujo de plantas de proceso, reglas generales UNE-EN, ISO 10628. España: comité técnico AEN/CTN 1 Normas Generalescuya Secretaría desempeña AENOR.

Arturo. (12 de Enero de 2020). Energía renovable: la biomasa. Empresa Provincial de Energía de Córdoba Orgaz,. Obtenido de https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/biomasa.pdf

Aviles, C. P. (25 de Septiembre de 2019). https://www.comercialaviles.com/proceso-de-reciclaje-del-papel/. Recuperado el 20 de Octubre de 2020

B, M. (12 de Junio de 2017). Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa. 1. Obtenido de http://www.um.edu.uy/docs/6 comportamiento de cenizas y suimpacto en sistemas de %20combustion de biomasa.pdf

CAVAMA, M. L. (23 de Agosto de 2013). Linea base de uso y destino de la madera aserrada en Nicaragua, con referencia al ciclo 2012-2013. Recuperado el 23 de Septiembre de 2020, de https://es.slideshare.net/marvinmillon/lb-linea-base-uso-y-destino-de-la-madera-en-nicaragua-gizcavamainaformarvinmillonmargieortega.

Enrique, 2. (29 octubre 2010). Analisis y aplicacion de las expresiones del contenido de humedad en solidos. Queretaro, municipio el Marquez: Enrique Martinez L.

FAO, 2. O. (12 de Mayo de 2001). http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/proyecto/rla133ec/ME-pdf/ME%20-%20Nicaragua.PDF. Recuperado el 18 de Agosto de 2020

FAO, J. J. (15 de Agosto de 2003). Técnicas simples para la obtención de combustibles básicos. Recuperado el 20 de Septiembre de 2020, de http://www.fao.org/3/P2070S/p2070s06.htm.

FAO, J. J. (15 de Agosto de 2003). Técnicas simples para la obtención de combustibles básicos. Recuperado el 20 de Septiembre de 2020, de http://www.fao.org/3/P2070S/p2070s06.htm.

Granados, L. d. (13 de Octubre de 2014). https://www.leonardo-gr.com/es/blog/conozca-el-proceso-de-obtenci-n-de-la-pulpa-de-celulosa. Recuperado el 20 de Septiembre de 2020

Kirk, 2. (2010). Euso domestico de leña en los paises en desarrollo y sus repercuciones en la salud. California.

Mack, A. C. (01 de Noviembre de 2017). "Elaboracion de briquetas para aprovechamiento del residuo de arroz en beneficios del Municipio el Progreso, Jutiapa". Guatemala, La asuncion, Guatemala. Obtenido de http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjrcd/2017/02/02/Valiente-Astrid.pdf.

Minitab, 2. (2019). Pagina de soporte Minitab 19. LLC. quality plaza 1829 hall Rd state college, PA 16801.: Regional Head Quarters Minitab.

Murcia, D. D. (02 de Febrero de 2020). Desarrollo de briquetas de borra de café y un aglomerante a diferentes composiciones porcentuales para ser utilizadas como combustible sólido alternativo. Recuperado el 22 de Septiembre de 2020, de https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7783/1/6151497-2020-1-IQ.pdf.

Nogués S, G. D. (2010). Energía de la Biomasa. (Vol. 1). Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza.

Norma NMX-AA-18, H. V. (10 de Diciembre de 1984). Norma Mexicana NMX-AA-18-1984. Recuperado el 26 de Septiembre de 2020, de https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-018-1984.pdf.

PNUD, P. d. (22 de Septiembre de 2002). Biomasa, Manual sobre energia renovable, Fortalecimiento de la capacidad en energia renovable para America Central. BUN-CA, 1, 56. Recuperado el 15 de Febrero de 2020, de http://www.bio-nica.info/biblioteca/BUNCA2002Biomasa.pdf

Trujillo, 2. (2010). Uso de la cascara de arroz como fuente de energia en la fabricacion de ladrillos ceramicos de alta calidad en la provincia de Lamas departamento de San Martin. Trujillo, Peru.

Tuesta. (20 de Julio de 2012). estudio de pre factibilidad para la instalación de una planta industrial para la producción de briquetas en Iquitos. Recuperado el 15 de Agosto de 2020, de file:///C:/Users/UNI/AppData/Local/Temp/T%20660%20T89%202012.pdf: Rony Mauricio Tuesta Tuesta, Juan Carlos García Torrez

UNE-EN ISO, 1. (16 de Julio de 2018). Biocombustibles solidos, determinacion del poder calorifico. Recuperado el 22 de Octubre de 2020

Valiente, M. d. (01 de Noviembre de 2017). "Elaboracion de briquetas para aprovechamiento del residuo de arroz en beneficios del Municipio el Progreso,

Jutiapa". Guatemala, La asuncion, Guatemala. Obtenido de http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjrcd/2017/02/02/Valiente-Astrid.pdf.

X. Anexo

A continuación, se presenta en la figura 10.1 el diagrama de flujo correspondiente al proceso experimental de elaboración de briquetas de aserrín y pulpa de papel reciclado.

Se describen cada una de las etapas del proceso, así como las entradas y salidas con sus respectivas cantidades.

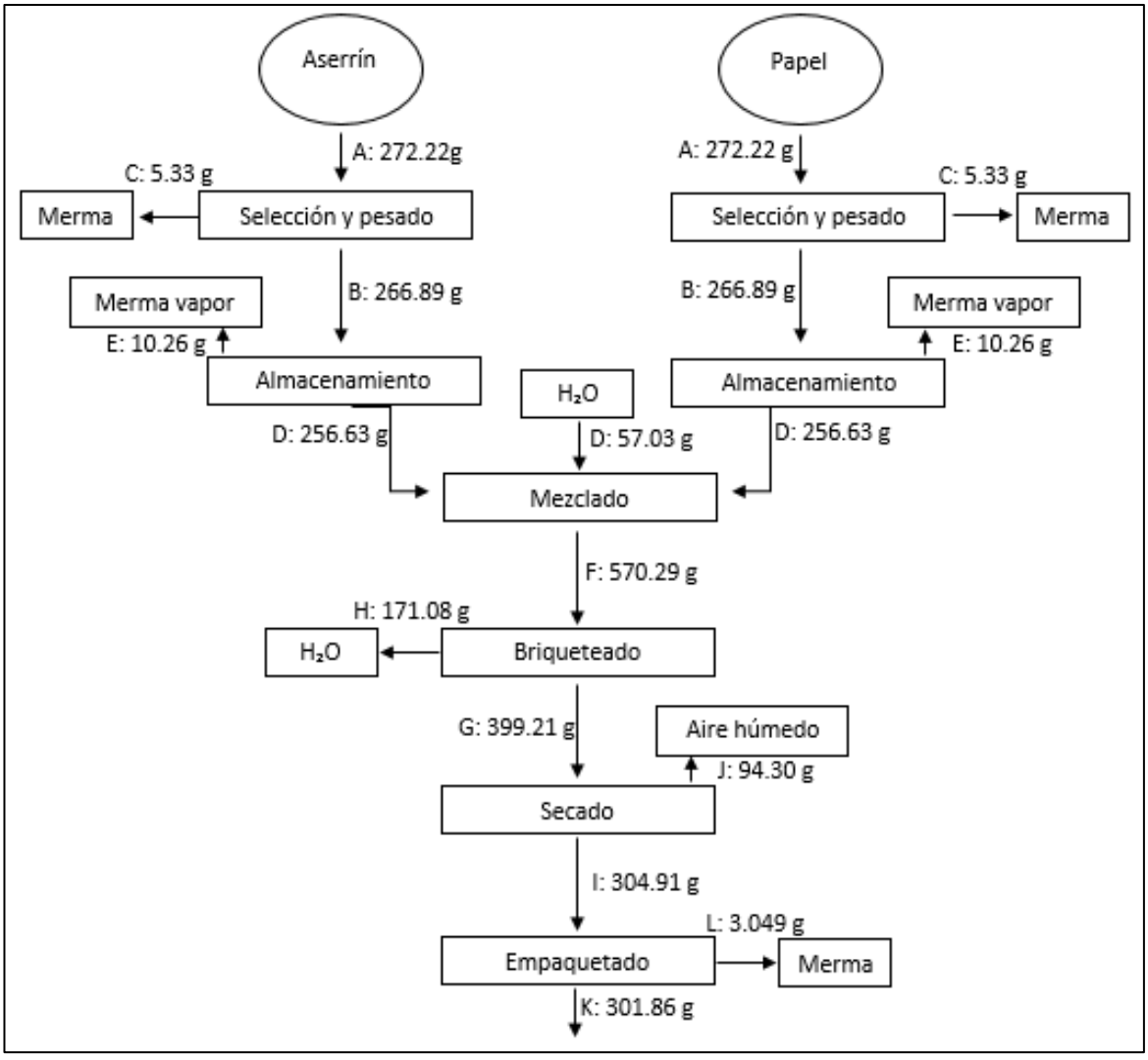


Figura 10.1. Proceso experimental para elaboración de briquetas

10.1. Balance de materia en la selección y pesado

A= Materia Prima Inicial= **604.96 g**

C =Materia Prima Rechazada= **11.86 g**

B = Materia Prima Seleccionada (A-C) = **593 g**

10.2. Balance de materia en el almacenado de materia prima seca

B= Materia Prima Seleccionada= **593 g**

E = Merma = **22.81 g**

D = Materia prima seleccionada y almacenada (B-E) = **570.19 g**

10.3. Balance de materia en el mezclado

D= Materia Prima Seleccionada y almacenada = **570.19 g**

F = Materia prima mezclada = **570.19 g**

10.4. Balance de materia en el briqueteado

F = Materia prima mezclada = **570.19 g**

H= Agua eliminada = **171.08 g**

G = Materia prima Briqueteado (F-H) = **399.11 g**

10.5. Balance de materia en el secado

Se consideran 399.11 g de materia prima Briqueteado con 40% de humedad (Base Seca) para ser ingresada al secador, hasta alcanzar una humedad de 6.93%.

10.5.1 Materia prima briqueteado antes del secado

Materia Seca+ 0,40(Materia Seca) = **399.11 g**

1.4 (Materia Seca) = **399.11 g**

Materia seca = **285.08 g**

0,40 (Materia Seca) = **Humedad**

0,40 (285.08 g) = **114.03 g agua**

10.5.2 Materia prima briqueteado después del secado

Materia Seca+ 0.069 (Materia Seca) = **X (gramos de materia Total después del secado)**

285.08 g + 0.069 (285.08 g) = **X (gramos de materia Total después del secado)**

X= **304.75 g** (gramos de materia Total después del secado)

0.069 {Materia Seca) = **Humedad**

0.069 (285.08 g) = **19.67 g agua**

Agua Evaporada en proceso

Agua Evaporada = **Agua antes de Secado - Agua después de Secado**

Agua Evaporada = **114.03 g – 19.67 g**

Agua Evaporada = **94.36 g agua**

Resumen

G = Materia prima briqueteada = **399.11 g**

J = Agua evaporada = **94.36 g**

I = Briqueta seca en horno (G-J) = **304.75 g**

10.6. Balance de materia en el empaquetado

I = Briqueta seca en horno = **304.75 g**

L = Merma = **3.049 g**

K= Briqueta empaquetada (I-L) = **301.70 g**

Tabla 10.1 Toma de datos en pruebas de calorimetría

	Prueba preliminar		prueba principal	prueba complementaria	
#	T	ΔT	T	ΔT	T
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

$$\Delta T = \Delta T_{PRUEBA\ PRINCIPAL} + C \quad \text{donde} \quad C = m \cdot P_C + \frac{P_P + P_C}{2} \qquad \textbf{(Ec. 10)}$$

m = Número de lecturas de la prueba principal

$$P_P = \frac{\text{Suma de diferencias de prueba preliminar}}{\text{Número lécturas de prueba preliminar}} \qquad \textbf{(Ec. 10.1)}$$

$$P_C = \frac{\text{Suma de diferencias de prueba complementaria}}{\text{Número lécturas de prueba complementaria}} \qquad \textbf{(Ec. 10.2)}$$

Tabla 10.2 Equipos utilizados

Equipos	Imagen	Especificación y ubicación
Balanza digital		Marca Fossel Balanza digital Función gramos kilogramos y libras. Laboratorio PIMA UNI RUPAP.
Estufa		Marca Thermo electro corporation. Voltaje 120 volt Frecuencia 50/60 HZ Amperios 14.80 A Made in USA Laboratorio química UNI RUSB
Bomba calorimétrica		Marca Mahler Voltaje 120 volt Frecuencia 50/60 HZ Amperios 16 A Made in USA Laboratorio de Biomasa-UNII-RUPAP
Crisoles		Crisol de uso experimental fabricado de porcelana. Laboratorio química UNI RUSB

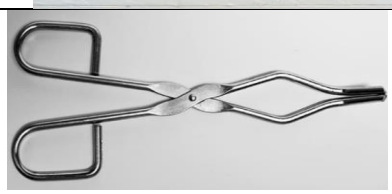
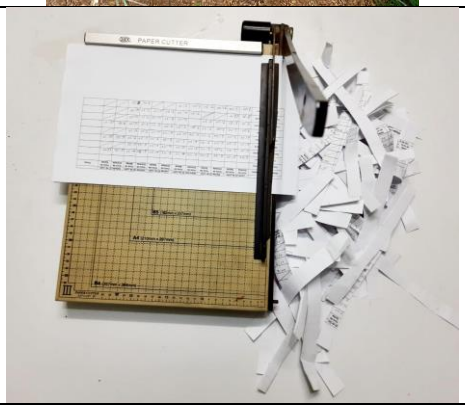
Mufla		Marca Barnstead International. Voltaje 220-240 volt Frecuencia 50/60 HZ Amperios 12 A Made in USA Laboratorio química UNI RUSB
Pinzas		Pinzas metálicas básica de uso en laboratorio. Laboratorio química UNI RUSB
Desecador		Desecador de uso experimental. Laboratorio química UNI RUSB
Briqueteadora		Briqueteadora de uso experimental Metálica 6 moldes Fabricada en el PIMA Laboratorio PIMA UNI RUPAP.

Tabla 10.3. Materiales utilizados

Materiales	imagen	Especificación y ubicación
Olla metálica		Laboratorio PIMA UNI RUPAP
Muestra de madera eucalipto		Peso 1,190 g Laboratorio PIMA UNI RUPAP
Muestra de madera roble		Peso 1,190 g Laboratorio PIMA UNI RUPAP
Muestra de madera guanacaste		Peso 1,190 g Laboratorio PIMA UNI RUPAP
Muestra de madera quebracho		Peso 1,190 g Laboratorio PIMA UNI RUPAP

Muestra aserrín de pino		Aserrín de pino Laboratorio PIMA UNI RUPAP
Muestra papel reciclado		Papel de uso administrativo Laboratorio PIMA UNI RUPAP