



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA FORMULACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS  
DENSIFICADOS DE ASERRÍN DE PINO BLANCO (*Pinus pseudostrobus Lindl*),  
RECICLADO DE CARBÓN ACTIVADO Y ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*), SOBRE  
LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y FÍSICOMECÁNICAS DE LOS COMBUSTIBLES  
SÓLIDOS DENSIFICADOS EN GENERAL**

**Omar Fernando Ordóñez Rivera**

Asesorado por el Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez

Coasesorado por el Ing. Jaime Domingo Carranza González

Guatemala, noviembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA FORMULACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS  
DENSIFICADOS DE ASERRÍN DE PINO BLANCO (*Pinus pseudostrobus* Lindl),  
RECICLADO DE CARBÓN ACTIVADO Y ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*), SOBRE  
LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y FÍSICOMECÁNICAS DE LOS COMBUSTIBLES  
SÓLIDOS DENSIFICADOS EN GENERAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**OMAR FERNANDO ORDÓÑEZ RIVERA**

ASESORADO POR EL ING. FEDERICO GUILLERMO SALAZAR RODRÍGUEZ  
COASESORADO POR EL ING. JAIME DOMINGO CARRANZA GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA FORMULACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS DE ASERRÍN DE PINO BLANCO (*Pinus pseudostrobus Lindl*), RECICLADO DE CARBÓN ACTIVADO Y ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*), SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y FISICOMECAÑICAS DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS EN GENERAL**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 06 de mayo de 2015.

  
**Omar Fernando Ordóñez Rivera**

Ing. Federico G. Salazar  
CIQG-201

Guatemala, 27 de octubre 2015  
Ref.

**Ingeniero Víctor Monzón**  
**Director de Escuela de Ingeniería Química**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**  
**Presente**

Estimado Ingeniero Monzón,

Por este medio me permito informarle que apruebo el informe final de trabajo de graduación del estudiante Omar Fernando Ordóñez Rivera, carne 2008-21478 y estudiante de esa escuela.

El estudiante Ordoñez Rivera realizó el informe final de trabajo de graduación **"EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA FORMULACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS DE ASERRÍN DE PINO BLANCO (*Pinus pseudostrobus Lindl*), RECICLADO DE CARBÓN ACTIVADO Y ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*), SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y FÍSICOMECÁNICAS DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS EN GENERAL."**

En relación a su informe, considero al mismo adecuadamente logrado dentro del esquema de la investigación científica, y por tal motivo lo apruebo como asesor para que pueda continuar con el debido proceso.

Sin otro particular, quedo de usted, atentamente,

  
Ing. Qco. Federico G. Salazar  
Colegiado: 201 CIQG  
**Federico G. Salazar R.**  
**INGENIERO QUÍMICO**  
**COLEGIADO 201**

Cc: archivo

6ª. Avenida A 11-62 Zona 9. Ciudad de Guatemala  
Tel. 502-23319718 Cel. 502-56086080  
[correo@fgsalazar.net](mailto:correo@fgsalazar.net)  
<http://www.fgsalazar.net>



Guatemala, 29 de octubre de 2015.  
Ref. EIQ.TG-IF.075.2015.

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **03-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Solicitado por el estudiante universitario: **Omar Fernando Ordoñez Rivera**.  
Identificado con número de carné: **2008-21478**.  
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

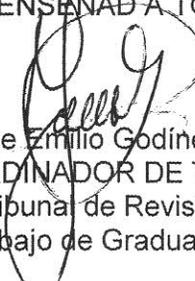
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA FORMULACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS DE ASERRÍN DE PINO BLANCO (*Pinus pseudostrobus Lindl*), RECICLADO DE CARBÓN ACTIVADO Y ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*), SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y FISICOMECAÑICAS DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS EN GENERAL**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por los Ingenieros Químicos: **Federico Guillermo Salazar Rodríguez y Jaime Domingo Carranza González**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.159.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **OMAR FERNANDO ORDÓÑEZ RIVERA** titulado: **"EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA FORMULACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS DE ASERRÍN DE PINO BLANCO (*PINUS PSEUDOSTROBUS LINDL*), RECICLADO DE CARBÓN ACTIVADO Y ALMIDÓN DE YUCA (*MANIHOT ESCULENTA*), SOBRE LAS PROPIEDADES FISIQUÍMICAS Y FISICOMECAÑICAS DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS EN GENERAL"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Ing. Victor Manuel Menzón Valdez  
Director  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre 2015

Cc: Archivo  
VMMV/ale



ACAAI





DTG. 608.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA FORMULACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS DE ASERRÍN DE PINO BLANCO (*Pinus pseudostrobus Lindl*), RECICLADO DE CARBÓN ACTIVADO Y ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*), SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y FÍSICOMECÁNICAS DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS EN GENERAL**, presentado por el estudiante universitario: **Omar Fernando Ordóñez Rivera**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, noviembre de 2015

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por dame vida para conquistar mis metas y permitirme luchar en la vida para poder desarrollarme como persona. Por todas las bendiciones derramadas.
- Mi abuela** Carmen de Jesús López Vásquez, por ser mi ejemplo de lucha, tenacidad, amor, cariño y carácter.
- Mi madrina** Silvia Romelia Ordoñez Cifuentes, por todo su amor, enseñarme a luchar y nunca dejarse vencer.
- Mis padres** Juan Jacobo Ordoñez y Carmen Leticia Rivera López, por darme la oportunidad de estudiar, su constante esfuerzo y sacrificio para que nunca nos faltara nada en todos estos años. Por cuidar de mí y amarme.
- Mi hermana** Por ser luz y vida en momentos de gran cambio y lucha en mi vida, hacerme reír y a veces enojar, por cuidar de mí.

**Mis ahijados y sobrinos**

Javier Alejandro Pérez Ordoñez y Marcelo Julián Paz Bouyssou, por recordarme que debo de luchar por ellos y su futuro, darme fuerzas para vivir cada nuevo día, y la felicidad de compartir con ellos.

**Mis allegados**

A mi familia, amigos y conocidos que me han acompañado en esta aventura que es la vida, gracias por su apoyo, sacrificio y amistad. Por no dejarme desfallecer, son lo mejor de la vida.

**Guillermo Rivera**

Por cuidar de mí desde que entré a la universidad, por apoyarnos tanto y de tantas maneras en estos años. Infinitas gracias.

**Hernán López Ordoñez**

Por cuidar de mí en los momentos más difíciles como familia, ayudarnos y brindarnos su apoyo.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme la oportunidad de cursar estudios superiores.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por su apoyo en la enfermedad y para que pudiera seguir mis estudios.
<b>Escuela de Ingeniería Química</b>	Por formarme como ingeniero químico y como persona.
<b>Ingeniero Federico Salazar</b>	Por su incondicional asesoramiento en mi proyecto de graduación y por sus enseñanzas como catedrático.
<b>Ingeniero Jorge Godínez</b>	Por su apoyo como revisor, por sus enseñanzas en el proceso de trabajo de graduación y en los cursos recibidos por su persona.
<b>Ingeniera Telma Cano</b>	Por su apoyo en la ejecución de mi trabajo de graduación.
<b>Antonio Melgar</b>	Por su constante ayuda en este proyecto y su leal amistad.

**Silvia López**

Por ser mis brazos, piernas y la parte responsable de la pareja, infinitamente gracias por lo que haces por mí.

Yo, no soy yo; por lo menos no soy el mismo yo interior. Ernesto Guevara

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
Hipótesis .....	XVIII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1.    MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1.    Antecedentes.....	1
1.2.    Justificación .....	4
2.    MARCO TEÓRICO.....	7
2.1.    El aserrín de madera .....	7
2.2.    Usos del aserrín de madera .....	8
2.3.    El carbón activado .....	9
2.4.    Briquetas de aserrín .....	10
2.4.1.    Características energéticas de las briquetas .....	12
2.5.    Tipos de procesos para fabricación de briquetas .....	13
2.5.1.    Artesanales.....	13
2.5.2.    Semindustriales .....	14
2.5.3.    Industriales .....	15
2.6.    Briquetación.....	16
2.6.1.    Materia prima apropiada para briquetar.....	17
2.6.2.    Humedad .....	18

2.6.3.	Tamaño de las partículas .....	18
2.6.4.	Presión y temperatura .....	19
2.6.5.	Presión de compactación .....	20
2.6.6.	Mecanismo de enlace para los aglomerados .....	21
2.7.	Aglutinante .....	23
2.7.1.	Tipos y propiedades de los aglutinantes .....	24
2.7.2.	Almidones.....	25
2.7.2.1.	La utilidad del almidón.....	26
2.7.2.2.	Almidón de yuca.....	26
2.7.2.3.	Almidón de maíz.....	27
2.7.2.4.	Almidón de arroz .....	29
2.7.3.	Cola blanca .....	29
2.8.	Melaza.....	30
2.8.1.	Briquetación .....	31
2.8.2.	Recolección de la materia prima .....	32
2.8.3.	Clasificación de la materia prima.....	32
2.8.4.	Molienda del material .....	32
2.8.5.	Mezclado y compactación del aglutinante .....	32
2.8.6.	Compactación de la mezcla .....	33
2.8.7.	Secado de briquetas .....	34
2.8.8.	Secado de aire libre .....	34
2.8.9.	Secado en mufla .....	35
2.9.	Caracterización de las briquetas .....	37
2.9.1.	Friabilidad.....	37
2.9.2.	Poder calorífico .....	38
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	39
3.1.	Variables .....	39
3.1.1.	Variables de control.....	39

3.1.2.	Variables dependientes .....	40
3.1.3.	Variables independientes .....	41
3.1.4.	Variables de medición .....	42
3.2.	Delimitación de campo de estudio .....	43
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	44
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	44
3.4.1.	Materia prima.....	44
3.4.2.	Cristalería y equipo.....	44
3.5.	Técnica cuantitativa.....	46
3.5.1.	Selección de los materiales .....	46
3.5.2.	Preparación de los materiales .....	47
3.5.3.	Caracterización del material vegetal.....	48
3.5.4.	Selección de los porcentajes de mezcla .....	48
3.5.5.	Aglomeración y compactación de los materiales ....	48
3.5.6.	Poder calorífico de las briquetas.....	49
3.5.7.	Caracterización de las briquetas.....	50
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	50
3.6.1.	Determinación de corridas a realizar .....	54
3.6.2.	Diseño de tratamientos.....	54
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	55
3.7.1.	Porcentaje de materia extraña.....	55
3.7.2.	Porcentaje de cenizas .....	55
3.7.3.	Porcentaje de extraíbles .....	56
3.7.4.	Densidad .....	56
3.7.5.	Determinación del índice de friabilidad .....	56
3.8.	Análisis estadístico .....	57
3.9.	Plan de análisis de los resultados .....	60

4.	RESULTADOS.....	61
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	79
	CONCLUSIONES.....	85
	RECOMENDACIONES .....	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	89
	APÉNDICES.....	93
	ANEXOS.....	133

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Aserrín de madera.....	7
2.	Carbón activado .....	10
3.	Briqueta de aserrín.....	11
4.	Formulación inicial de los combustibles sólidos densificados .....	63
5.	Porcentajes de las materias primas utilizadas para cada formulación de los combustibles sólidos densificados en función del carbón activado.....	65
6.	Formulación de los combustibles sólidos densificados después del proceso de secado.....	67
7.	Consumo de almidón por las formulaciones en función del porcentaje de carbón activado.....	69
8.	porcentaje de humedad de los combustibles sólidos densificados en función del carbón activado.....	71
9.	Densidad de los combustibles sólidos densificados en función de porcentaje de carbón activado .....	73
10.	Poder calorífico de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón activado. ....	75
11.	Porcentaje de cenizas de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón activado .....	77
12.	Índice de friabilidad en función de porcentaje de carbón activado .....	78

## TABLAS

I.	Características físicas y químicas de las briquetas.....	13
II.	Determinación de variables de control.....	39
III.	Determinación de las variables dependientes. ....	40
IV.	Determinación de variables independientes .....	41
V.	Determinación de las variables de medición a escala laboratorio .....	43
VI.	Porcentaje de materia extraña .....	50
VII.	Secado del carbón activado.....	51
VIII.	Porcentaje de cenizas.....	51
IX.	Kilogramos de aglomerante utilizados .....	52
X.	Poder calorífico de las materias primas .....	52
XI.	Volumen de briquetas .....	53
XII.	Friabilidad .....	53
XIII.	Organización de datos Anova.....	58
XIV.	Cantidad de materia extraña o material no deseado proveniente de las muestras de materia prima.....	61
XV.	Humedad de las materias primas previo a la experimentación.....	61
XVI.	Poder calorífico de las materias primas .....	62
XVII.	Porcentaje de cenizas para cada materia prima. ....	62
XVIII.	Formulación inicial de los combustibles sólidos densificados .....	62
XIX.	Porcentajes de las materias primas utilizadas para cada formulación de los combustibles sólidos densificados. ....	64
XX.	Formulación de los combustibles sólidos densificados después de un proceso de secado.....	66
XXI.	Consumo de almidón de las formulaciones en función del carbón activado. ....	68
XXII.	Porcentaje de humedad en base seca de los combustibles sólidos densificados.....	70

XXIII.	Densidad de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón activado .....	72
XXIV.	Poder calorífico de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón activado .....	74
XXV.	Porcentaje de cenizas de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón activado .....	76
XXVI.	Índice de friabilidad en función de porcentaje de carbón activado .....	77



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
cm	Centímetro
CSD	Combustible sólido densidad
$S^2$	Cuadrado medio del Error
$S_1^2$	Cuadrado medio del tratamiento
$\rho$	Densidad
S	Desviación estándar
$\Delta$	Diferencial
F	f de pruebas para tratamientos
g	Gramo
$H_i$	Hipótesis de investigación
$H_0$	Hipótesis nula
J	Joule
k	Kilo
$m^3$	Metro cúbico
k	Número de tratamientos
%	Porcentaje
%H <sub>BS</sub>	Porcentaje de humedad en base seca
$\bar{x}$	Promedio general
CP	Poder calorífico
i	Subíndice para tratamientos
SSA	Suma de cuadrados de tratamientos
SSE	Suma de cuadrados del error

<b>SST</b>	Suma de cuadrados totales
<b><math>Y_{ij}^2</math></b>	Todos los datos de todas las muestras
<b><math>T_{i*}</math></b>	Total de tratamiento i
<b><math>T_{**}</math></b>	Total general
<b>U</b>	Unidad
<b><math>\mu</math></b>	Valor medio

## GLOSARIO

<b>Análisis inmediato</b>	El Análisis Inmediato es el conjunto de ensayos mediante los cuales se determinan los porcentajes de humedad, cenizas y materia volátil.
<b>Astillas</b>	Fragmento irregular que salta de la madera al romperse violentamente. El que salta o queda del pedernal u otros minerales.
<b>Briquetas</b>	Cilindros de 50 a 130 mm de longitud y de 5 a 30 mm de diámetro hechos con serrín, astillas molturadas u otros residuos comprimidos que pueden utilizarse como combustibles, generalmente en chimeneas y barbacoas.
<b>Dendroenergía</b>	Toda la energía obtenida a partir de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos primarios y secundarios derivados de los bosques, árboles y otra vegetación de terrenos forestales. La dendroenergía es la energía producida tras la combustión de combustibles de madera como leña, carbón vegetal, entre los más importantes.
<b>Eficiencia energética</b>	Práctica que tiene como objeto reducir el consumo de energía. La eficiencia energética es el uso eficiente de la energía, de esta manera optimizar los procesos

productivos y el empleo de la energía utilizando lo mismo o menos para producir más bienes y servicios.

**Friabilidad**

Facilidad para desmenuzarse una cosa.

**Índice de friabilidad**

Índice de la capacidad de una sustancia sólida que puede ser reducida a trozos más pequeños con poco esfuerzo.

**Leña**

Incluye la madera en bruto en piezas pequeñas (leña), astillas, *pellets* y polvo derivados de los bosques y árboles aislados, así como los subproductos de la industria de la madera y los productos leñosos recuperados.

**Poder calorífico**

Es la cantidad de energía que desprende la unidad de masa de un combustible cuando este se quema. Se diferencia el poder calorífico superior (PCS), que supone la energía bruta generada, sin descontar la utilizada en la evaporación del agua producida en la combustión, del poder calorífico inferior (PCI), que es la energía neta generada, descontando la que se utilizará en evaporar el agua producida en la combustión.

**Recurso natural**

Es el elemento natural susceptible de ser aprovechado por el ser humano.

**Residuo**

Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido, semisólido, líquido o gaseoso resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final.



## RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se analizaron las propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas de los combustibles sólidos densificados formulados. Esto a partir de pino blanco (*Pinus pseudostrobus Lindl*), reciclado de carbón activado y aglomerados mediante una solución acuosa de almidón de yuca (*Manihot esculenta*) cocida. Con el fin de encontrar correlaciones que describan dichas propiedades en función del porcentaje de carbón activado en la formulación.

Los análisis de poder calorífico y de humedad de los materiales fueron realizados en el laboratorio del ministerio de energía y minas, mientras que el análisis de cenizas se realizó en el Laboratorio de Extractos Vegetales del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala, Ciudad Universitaria zona 12. Las condiciones del laboratorio son aproximadamente de una temperatura de 25 °C y una presión atmosférica de 0.84 atmosferas

Se formularon once mezclas en las cuales se tomó como variable experimental la masa de carbón activado y la masa del aserrín. Estas fueron aglomeradas mediante una solución de almidón de yuca cocida y compactadas artesanalmente utilizando un molde cilíndrico y un mazo de madera, las mezclas fueron secadas a intemperie hasta reducir su humedad y volverla constante.

Como variables de respuesta se midió, mediante un parámetro cualitativo, la cantidad de almidón de yuca necesaria para aglomerarlas. Esto mediante la altura del cilindro conformado por el CSD se calculó su densidad, con una bomba

calorimétrica y una mufla se encontró el poder calorífico. El porcentaje de cenizas de cada material y por propiedades parciales se encontró el poder calorífico y porcentaje de cenizas para cada una de las formulaciones, al realizar una prueba de golpe en la que consiste de dejar caer el CSD de un metro de altura sobre un suelo cerámico se encontró el índice de friabilidad.

Todas las materias primas fueron pretratadas para llevarla a un porcentaje de humedad en base seca aproximado del 10%, se les realizó un estudio de granulometría para estandarizar el tamaño de partícula utilizada. La solución de almidón utilizada fue 10 % de harina de almidón por 90 % de agua.

Las propiedades determinadas fueron dejadas en función del porcentaje de carbón activado. Para el consumo de almidón se generó la correlación  $y = -0,0001x^2 - 0,0437x + 6,3047$  con un Valor  $R^2 = 0,9959$ , para el poder calorífico la correlación  $y = -0,046x^2 + 46,892x + 16\,694$  la cual posee un valor  $R^2 = 0,9989$ . La formulación que iguala el poder calorífico de la madera es la que contiene 17,6 % de carbón activado.

La correlación de la densidad quedo de la siguiente manera  $y = 3E-05x^2 + 0,0012x + 0,3173$  y posee un valor R de 0,9968, para la humedad  $y = 0,0003x^2 - 0,0593x + 3,5646$  describe el comportamiento de la humedad la correlación posee un valor  $R^2 = 0,971$  Para el porcentaje de cenizas  $y = -3E-06x^2 + 6E-05x + 0,95$  con un valor  $R^2 = 0,9441$ . El índice de friabilidad es mayor de 0,94 para todas las formulaciones. Por ello se puede concluir que todas las formulaciones poseen una alta friabilidad, al estar muy cerca de 1 que es el valor máximo para la prueba, siendo la formulación de 45,62 % en carbón activado la más alta teniendo un índice 0,97.

## OBJETIVOS

### General

Evaluar la influencia de la formulación sobre las propiedades fisicoquímicas y físicomecánicas de combustibles sólidos densificados de aserrín de pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl), reciclado de carbón activado y almidón de yuca (*Manihot esculenta*).

### Específicos

1. Analizar y correlacionar el comportamiento del poder calorífico, según la formulación de los biocombustibles sólidos densificados.
2. Realizar ensayos de friabilidad y correlacionar los índices de friabilidad de los diferentes tipos de formulaciones de biocombustibles sólidos densificados.
3. Realizar un análisis de cenizas y humedad a los diferentes materiales utilizados en la fabricación de los combustibles sólidos densificados.
4. Analizar y correlacionar el comportamiento de la densidad, según la formulación de los biocombustibles sólidos densificados.
5. Analizar la relación entre la demanda de aglomerante y la formulación de los biocombustibles sólidos densificados.

## Hipótesis

### Hipótesis de trabajo

Mediante un estudio sobre la fabricación de briquetas, escala laboratorio, es posible determinar la fracción en peso de carbón activado y aserrín del pino blanco óptima, para aumentar el poder calorífico de la briqueta con un mínimo de aglomerante y un máximo de friabilidad para un diámetro determinado.

### Hipótesis estadística

- Hipótesis nula ( $H_0$ ): no hay diferencia significativa en las propiedades fisicoquímicas y físico-mecánicas de los combustibles sólidos densificados obtenidas al variar la formulación de mezcla.

$$\mu_1 - \mu_2 = 0$$

- Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): hay diferencia significativa en las propiedades fisicoquímicas y físico-mecánicas de los combustibles sólidos densificados obtenidas al variar la formulación de mezcla.

$$\mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

## INTRODUCCIÓN

Conforme al paso de los años, el incremento de los combustibles utilizados en la industria, principalmente de origen fósil, han aumentado exponencialmente teniendo varias crisis en las últimas décadas. Las nuevas fuentes energéticas como la energía solar, hidráulica, eólica, biogás, biocombustibles y de biomasa empiezan a tener una mayor aceptación en la industria, por ser de fuentes renovables de costos bajos y de menor impacto ambiental.

Se estima que el 15 % de la madera tratada en los aserraderos es convertida en aserrín, la cual no tiene un uso que explote todo su potencial energético o de ningún otro modo siendo desechada en su mayoría. Esto es un desperdicio y una contaminación del medio ambiente si se realiza en grandes cantidades; respecto al carbón activado no hay estudios sobre su aprovechamiento posterior a su vida útil como material adsorbente por lo cual las industrias tienden a desecharlo inmediatamente después de su utilización. No se tiene registro alguno de la cantidad de carbón activado que es desechado a las alcantarillas por la falta de regularización de los desechos en las industrias.

Los combustibles sólidos densificados de biomasa pueden ser realizados de diferentes tipos de materiales y aglomerados de distintas maneras y materiales. El almidón de yuca es producido de manera artesanal en Guatemala no posee una demanda en el sector industrial y se limita al sector civil en usos caseros.

El estudio a realizar, en este diseño de investigación, pretende utilizar los desechos del proceso de corte de la madera y es los desechos de carbón

activado mediante la aglomeración en húmedo a través del cocimiento del almidón de yuca. Esto para obtener un combustible con un índice de friabilidad aceptable y un poder calorífico mayor al de la leña para el consumo industrial en calderas de biomasa o en la utilización para el secado de productos generados en la industria.

# 1. MARCO CONCEPTUAL

## 1.1. Antecedentes

La invención e innovación de las briquetas se ha dado casi siempre como resultado de crisis energéticas. Por lo tanto, sus usos van desde sectores domésticos, pequeñas industrias, hasta industrias de gran demanda energética. Los métodos de fabricación van conforme al nivel de producción que la demanda exija y la disposición de la materia prima, la tesis en grado de licenciatura *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz, y prueba de producción de gas pobre*, de la escuela superior politécnica de Chimborazo, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ecuador, 2011.

En ella explica de manera detallada los tipos de procesos para la fabricación de las briquetas dividiéndose en tres grupos principales: artesanales, semiindustriales e industriales. El estudio también profundiza en la materia prima apropiada para briquetar y los diversos pretratamientos que debe llevar la materia prima según sea el tipo de proceso que se desea realizar.

En la actualidad la fabricación de briquetas de biomasa densificadas se divide en dos tipos: las de alta presión y las de baja presión. La primera metodología utiliza altas presiones (>100 Mpa) y trabaja con la materia prima en seco, bajas humedades (<6 %Hr) y partículas muy finas. En este tipo de fabricación se utiliza un material que actuará como aglomerante para el material de mayor poder calorífico, la tesis *Fabricación de pellets de carbonilla, usando*

*aserrín de Pinus radiata (D. Don), como material aglomerante* de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca, Talca, Chile, 2008.

Explica cómo de los subproductos forestales y de los residuos de la producción de carbón vegetal se pueden convertir en biocombustibles sólidos densificados realizados a alta presión, y sin necesidad de utilizar algún tipo de adhesivo. Este estudio se ha complementado con una prueba de índice de friabilidad de la cual se extrae la fracción (p/p) óptima entre carbonilla y aserrín para la generación de briquetas de índice de friabilidad aceptable y mayor poder calorífico. La única desventaja de este tipo de procesos es el equipo necesario para la fabricación de este tipo de briquetas o *pellets*, pues sus costos tienden a ser muy altos.

La segunda manera de fabricación es en húmedo y es cuando se utilizan un aglomerante líquido o acuoso para unir las partículas del material deseado. Este aglomerante no siempre contribuye al aumento del poder calorífico de las briquetas, como ejemplo de este tipo de fabricación, se tiene el artículo científico generado en el 8° congreso iberoamericano de ingeniería mecánica *Evaluación de mezclas y aglutinantes en la elaboración de briquetas de biomasa*. Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba 2007.

Se utilizan como aglomerante miel, cachaza y arcilla, a tres diferentes proporciones, a tres diferentes presiones y a tres diferentes diámetros encontrando. La mezcla, presión y diámetro óptimo para la fabricación de las briquetas, cada una de las diferentes variables da como resultado diferentes propiedades en la briqueta. Este estudio abarca principalmente la morfología, la presión y los porcentajes de mezcla, para la obtención de briquetas de alta resistencia. Esto sin tomar en cuenta otros factores como los costos en la fabricación de las briquetas, ya que utilizan materiales aglomerantes que tienen

un valor bastante alto, a comparación del material aglomerado, pues tiene otros usos en la industria o en el sector alimenticio.

La investigación Fabricación de briquetas con aserrín blanco de pino. Análisis inmediato y obtención de su poder calorífico. Estaba a cargo del grupo de investigación en energías renovables del Departamento de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Noroeste de Argentina. En ella se expone que el aserrín de madera con una humedad del 6 % es convertido en harina de madera. Esta posteriormente se ingresa la briquetadora junto con el aglomerante, en este caso, una solución de almidón de mandioca y comprimiéndolo manualmente con una masa formando la briqueta que se sacará en un horno eléctrico a 105 °C en una mufla eléctrica.

El antecedente *Síntesis y cálculos sobre contenido energético, equivalencias energéticas y precios de combustibles de biomasa en Guatemala, como elemento de decisión para su uso en proyectos energéticos*. De Guevara A Bauta. Introduce en la viabilidad de los combustibles de biomasa. Esto en el panorama energético nacional, las fuentes energéticas de biomasa, el consumo energético por sectores y el balance oferta demanda en Guatemala. Todo esto lo engloba en una serie de matrices donde en general a comparación del contenido energético de biocombustibles, las equivalencias energéticas de biocombustibles y los precios por unidad energética generada.

Posterior al estudio de la fabricación de los combustibles sólidos densificados existe una gama de estudios que pueden realizarse a cualquier tipo de briquetas. Entre ellos se mencionan las pruebas de producción de gas pobre, pruebas de poder calorífico, análisis inmediato, de friabilidad o presión búsqueda de las propiedades fisicoquímicas entre otros.

## **1.2. Justificación**

La búsqueda de materiales económicos, renovables, de alto poder calorífico y metodologías económicas para su aglomeración, crean para los combustibles sólidos densificados un campo de investigación bastante amplio y complejo. Esto, a su vez, genera grandes beneficios ambientales, civiles e industriales.

Los principales materiales utilizados provienen de fuentes renovables y en su mayoría recicladas. Esto debido a su bajo costo económico y su alta disponibilidad, siendo el más común de ellos el aserrín, descartado en el proceso de cortado de la madera y componente principal de las briquetas a realizar. El segundo material será el carbón activado, reciclado de las torres de purificación de las industrias alimenticias, la reutilización de este material no ha sido investigada aún, mucho menos con fines de producción de combustibles sólidos densificados.

La razón principal de reutilizar el carbón activado es para aumentar el poder calorífico de la briqueta, según sea la formulación del combustible sólido densificado, al ser básicamente un carbón vegetal proveniente de la pirolisis de biomasa. De obtener un producto con mayor poder calorífico que el de la madera y de un costo igual o inferior al de la madera para quemar (leña), se podría desplazar, este último, que en muchas ocasiones proviene de manera ilícita del mercado.

Ya que el proceso se realizará de manera artesanal y no se cuenta con equipos de generación de alta presión, la metodología más conveniente, para la aglomeración de los materiales, es mediante un aglutinante (almidón de yuca) acuoso. Este permite unir las partículas grandes (aserrín de pino) con las

partículas más finas (carbón activado), material previamente seleccionado por su bajo costo económico, alto rendimiento, fácil preparación y de fácil combustión.

Las aplicaciones de los combustibles sólidos densificados como fuentes de energía en calderas, secadores, hornos, estufas, entre otras, son solamente algunas de las innumerables aplicaciones que pueden tener. Esto puede ser controlado por el nivel de producción, la morfología de la briqueta y los materiales.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. El aserrín de madera

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el aserrín es el producto de todas las operaciones mecánicas de elaboración de la madera, especialmente de los aserraderos.

Figura 1. **Aserrín de madera**



Fuente: *aserrín de madera*. Consulta: 3 de julio de 2015.

Es un conjunto de partículas que se desprenden de la madera cuando se sierra. La madera se asierra por corte o desgarre de sus fibras. Mediante la acción continua de una serie de dientes uniformemente separados e inclinados en dos direcciones, uno a continuación de otro, destinados a moverse en planos de trabajos paralelos y bastante juntos. La acción de los dientes cortantes, produce un canal de anchura uniforme en toda la pieza, en lo que se desgarren

y extraen los trozos de fibra o aserrín. Este residuo puede llegar a representar hasta el 15 % de la producción total de madera procesada.

## **2.2. Usos del aserrín de madera**

Entre los usos que tiene el aserrín de madera se tiene los siguientes:

- En la agricultura:
  - Material de relleno.
  - Para camas de animales en galpones o criaderos.
  - Ayuda para el cultivo de plantas, utilizándolo en bajas proporciones.
  - Sustrato para abono orgánico.
  - Material de conservación de la humedad del suelo en plantaciones.
  - Material para recuperar suelos degradados.
  
- En la industria:
  - Combustible para calderas de vapor o calentar secadores.
  - Para la producción de carbón activado.
  - Para pirolisis y gasificación.
  - Como ayuda para procesos de filtración de líquidos y limpieza de suelo.
  - Para fabricación de ladrillos, briquetas, pellets, tableros aglomerados.
  
- En la construcción:

- Para producir materiales diversos de construcción como masilla, aglomerados, entre otros.

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

### **2.3. El carbón activado**

Es una forma burda de grafito, sustancia conocida por su utilización en la mina del lápiz. Se distingue, del grafito, por tener una estructura imperfecta al azar muy porosa, a través de una amplia gama de tamaños de poros (microporos, mesoporos y macroporos), desde grietas y hendiduras visibles a dimensiones moleculares. La estructura de grafito da al carbón su característica gran área superficial que permite al carbón adsorber una amplia gama de compuestos.

El carbón activado posee las mayores fuerzas de adsorción física, o el mayor volumen de porosidad adsorbente, que cualquier otro material conocido hasta el momento.

El carbón activado puede tener una superficie mayor de 1 000 m<sup>2</sup>/g. Esto significa que 3 g de carbón activado pueden tener la superficie de un campo de fútbol.

Figura 2. **Carbón activado**



Fuente: *Carbón activado* Consulta: 3 de julio de 2015.

#### **2.4. Briquetas de aserrín**

La briqueta es un biocombustible sólido, que se obtiene mediante la compactación o densificación de residuos (de origen lignocelulósico u otros materiales). Se producen bajo la aplicación de grandes presiones y temperaturas elevadas que provocan la autoaglomeración de sus partículas, o mediante bajas y medianas presiones con ayuda de una sustancia aglomerante para lograr su compactación.

Frecuentemente estas son utilizadas en el sector doméstico e industrial para la generación de calor o producción de energía, ya sea en estufas, chimeneas, cocinas, hornos, calderas como combustibles limpios, gasificadores, entre otros.

Figura 3. **Briqueta de aserrín**



Fuente: *briquetas de aserrín prensado* Consulta: 3 de julio de 2015.

Es un producto 100 % ecológico y renovable, catalogado como bioenergía sólida. Esta usualmente se presenta en forma cilíndrica (diámetros mayores a 30 mm) o de bloques, es un sustituto del carbón y la leña; tiene alta densidad y es comercializada en bolsas de 5 a 20 kg. El término briqueta puede ser, por la variedad de materiales usados y formas en que son compactadas, ya que pueden o no referirse a biocombustibles. La materia prima utilizada proviene

comúnmente de residuos de industrias forestales, agrícolas, ganaderos, virutas de acero, entre otros.

Entre la materia prima para una briqueta combustible generalmente se encuentran residuos de industrias forestales (procedente de aserraderos, fábricas de puertas, muebles y tableros.). También de agrícolas o ganaderos (cáscaras de café, coco y cascarilla de arroz.). Residuos sólidos urbanos, carbón vegetal, o una mezcla de todos ellos.

Los motivos por los cuales han sido desarrolladas son: para revalorizar un conjunto de residuos sólidos orgánicos que producían calor en su combustión. Esto para aumentar la densidad de ciertos biocombustibles que eran muy caros de transportar debido a los bajos valores de los mismos. El objetivo es sustituir combustibles sólidos fósiles, y eliminar residuos sólidos de tipos muy variables.

Para satisfacer las condiciones de fabricación de briquetas, la materia prima debe estar de acuerdo con porcentajes de humedad, tamaño de partículas (granulometría) aceptables.

#### **2.4.1. Características energéticas de las briquetas**

Las principales características físicas, y químicas que influyen en el comportamiento energético de las briquetas son presentadas a continuación.

Tabla I. **Características físicas y químicas de las briquetas**

	<b>Características</b>	<b>Unidad</b>
<b>Características Físicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forma</li> <li>• Tamaño</li> <li>• Aspecto (color y brillo)</li> <li>• Densidades</li> <li>• Humedades</li> <li>• Friabilidad</li> </ul>	Volumen Longitud Adimensional $kg/m^3$ % Adimensional
<b>Características Químicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Composición química elemental</li> <li>• Composición química por compuestos</li> <li>• Poderes caloríficos</li> </ul>	% % $kJ/kg$

Fuente: elaboración propia.

## 2.5. Tipos de procesos para fabricación de briquetas

Las principales características físicas, y químicas que influyen en el comportamiento energético de las briquetas son presentadas a continuación.

### 2.5.1. Artesanales

En este tipo no intervienen equipos sofisticados, ya que no se necesita producir gran cantidad. Es decir, que con medios primarios (caseros) se puede prensar en un molde la biomasa mezclada con algún tipo de aglutinante y secarla posteriormente para su utilización.

En este proceso, no importante es conformar las briquetas y obtenerlas de una forma no continua, práctica y sencilla, sin ser estricto y preciso en parámetros. Estos son: proporción de mezcla entre materia prima y aglutinante, presión de compactación, tiempo y forma de secado.

La presión de compactación es baja, hasta 5 MPa en promedio, debido al uso de altas cantidades de aglutinante, que ayuda a la cohesión entre partículas del material. Se utiliza aglutinantes como estiércol de animales, papel, aserrín, almidones, arcillas, y otros. En las siguientes figuras se puede apreciar instrumentos utilizados para fabricación de briquetas de forma artesanal.

### **2.5.2. Semiindustriales**

En este tipo de proceso las presiones se encuentran en el rango de 5 a 100 MPa. El proceso de fabricación tiende a ser continuo con medianas producciones de briquetas.

Las presiones en el campo semiindustrial son mayores que en el artesanal. Debido a esto, en algunos, casos la materia prima alcanza un grado de autoaglomeración, permitiendo el uso en menores o nulas proporciones de aglutinante para la mezcla, lo que ayuda a reducir costos de producción. Por ello se hace necesario secar la materia prima previo a la briquetación. Un aspecto muy importante que se debe tener en cuenta, es que la humedad del material debe estar en un rango del 15 al 20 %.

Si la humedad es mayor, como las presiones internas al compactar son grandes el incremento de la humedad causa mayor cantidad de vapor de agua producido por la temperatura que se genera durante la compresión. Por ello, la briqueta se resquebraja superficialmente al enfriarse, o puede producir una

explosión que lanza la briqueta como proyectil; en el caso de un brusco incremento de humedad en el material de entrada, la explosión de vapor puede incluso dañar la prensa. Usualmente se tiene entre una a dos fases de compactado.

### **2.5.3. Industriales**

Con respecto a los procesos industriales se disponen de máquinas de altas presiones de compactado, en el orden de más de 100 MPa, y grandes niveles de producción continua. No es necesario utilizar aglutinante, sino es requisito fundamental obtener materia prima lo más seca posible. Normalmente con una humedad del 5 al 15 % en base húmeda, considerándose como óptima alrededor del 7 al 12 % (conforme a la norma DIN 51731) y tamaño de las partículas menor a 15 mm.

A estas presiones la mezcla o materia prima se autoaglomera por el aumento de la temperatura durante el compactado, ya que se trata de materia lignocelulósica que aporta lignina propia como aglutinante. Así por ejemplo, la madera al ser calentada sobre el rango de su temperatura de plasticidad que es aproximadamente 165 °C, pierde su elasticidad permitiendo comprimir de manera más fácil. Generalmente se tienen varias fases de compactado.

En algunas industrias o plantas de briquetación se utilizan secadoras, trituradoras, tamizadoras, filtros y recolectores de polvos, y briqueteadoras con resistencias eléctricas. Esto ayuda a la autoaglomeración sumado a las presiones elevadas de compactación se obtiene briquetas de buena calidad y excelentes propiedades mecánicas y de friabilidad, que son importantes a la hora de transportarlas y almacenarlas.

## 2.6. Briquetación

Es el proceso mediante el cual se obtienen las briquetas que son formadas al compactar cualquier tipo de biomasa residual, de modo manual o a través de equipos mecánicos. En el proceso pueden ocurrir transformaciones químicas debido al calentamiento de la biomasa en el interior de la briqueteadora.

La característica común de todas las briquetas es su alta densidad. Su forma suele ser cilíndrica; pero no siempre es así. Por ejemplo, las briquetas de carbón vegetal que se obtienen compactando polvo o carbón granulado tienen la forma de huevo o de avellana de unos 12 – 20 cm de largo.

Cada proceso y fabricante produce una briketa de forma y dimensiones distintas. La forma de las briquetas es muy variada, generalmente abundan briquetas de forma cilíndrica, con diámetros que oscilan entre los 3 y 20 cm y longitudes entre los 15 y 50 cm. Otras formas usuales son las de prisma cuadrado o prisma hexagonal hueco, en otros casos se tiene en forma de ladrillo.

La briketa se vende a granel o en bolsas de 10 a 20 kg, o en cajas de 11 a 15 kg. Las briquetas se han desarrollado por cuatro motivos:

- Para revalorizar un conjunto de residuos sólidos orgánicos que producían calor en su combustión. Entre estos residuos sólidos orgánicos se incluyen:
  - Residuos de industrias forestales de primera transformación (aserraderos, cajoneras y otras) o de segunda transformación (fábricas de puertas, ventanas, muebles, entre otros.).
  - Residuos de industrias agrícolas y ganaderas.

- Residuos sólidos urbanos (RSU) entre los que se incluyen residuos de muebles, tablonos, tableros, *pellets*, embalajes, entre otros.
- Residuos sólidos de aprovechamientos agrícolas, y forestales.
- Para aumentar la densidad de ciertos combustibles que eran muy caros de transportar debido a los bajos valores de la misma.
- Para sustituir combustibles sólidos fósiles.
- Para eliminar residuos sólidos de tipos muy variables.

#### **2.6.1. Materia prima apropiada para briquetar**

En las combinaciones de los elementos constituyentes de la briqueta se debe obtener una mezcla. Las características importantes son: lograr porcentajes de aglomerante mínimos para la briquetación en función de la cantidad materia prima (combustible) granulada; que garantice un bajo costo de fabricación. Además el aglomerante deberá preferiblemente ser de tipo combustible y amigable con el medio ambiente.

La materia prima apropiada debe tener las condiciones adecuadas determinada dentro de parámetros como:

- Humedad
- Tamaño de partículas (granulometría)
- Tipos de aglutinantes y porcentajes para la mezcla.
- Presión y temperatura

### **2.6.2. Humedad**

Como se manifestó anteriormente para definir la humedad adecuada, la mezcla debe tener humedades que sean mayores al 20 % en el caso del proceso artesanal, del 15 al 20 % en el semiindustrial y del 5 al 15 % para el industrial. Esto se basa además en la técnica tradicional empleada en los ensayos para arenas de fundición, que consiste en dar a la mezcla el agua necesaria para que esta obtenga una consistencia útil para ser moldeada.

Esta mezcla ya húmeda no debe pegarse al recipiente que la contiene, ni tampoco debe desprenderse. Luego de someterle a una ligera presión con la mano, si esto se da, es una consecuencia de que la mezcla está muy húmeda o muy seca refiriéndose para el método artesanal y semiindustrial. Para el industrial, no se necesita de aglomerante.

### **2.6.3. Tamaño de las partículas**

Puesto que en la mayor parte de materia orgánica se dificulta su compactación de forma directa, es necesario que las partículas del material orgánico tengan un tamaño adecuado. Esto permite una adecuada ubicación de las partículas, entre los intersticios de la estructura, obteniéndose una mejor compactación y acabado de la briqueta.

El mejor aspecto exterior de briquetas se obtiene cuando las fracciones de las partículas de aserrín y otros productos agrícolas son inferiores a 3 mm. De acuerdo a este parámetro, para el caso del aserrín de madera y cascarilla de arroz, las partículas deben tener dicho tamaño.

De forma general el material a briquetar idealmente deberá contener partículas largas y cortas. La longitud inicial de la partícula dependerá del material. Esto influye en notablemente en: el tipo de proceso que se vaya a emplear, seleccionar un adecuado diámetro del dado (pistón de la briquetadora) y del tipo de equipo empleado.

Mientras mayor sea la máquina y el dado, mayor podrá ser la partícula. Por ejemplo en las extrusoras para dados de 125 mm de diámetro, las partículas más grandes serán de 15 mm, y mientras más pequeña sea la máquina y el dado, más pequeñas deberán ser las partículas del material. Es por eso que en este último caso se necesita moler previamente la materia para mejorar su manejo.

#### **2.6.4. Presión y temperatura**

Son factores muy importantes sobre todo cuando se trata de compactar material orgánico sin añadir aglomerante. Por lo tanto la compactación, envuelve: presión, fricción entre partículas, deformación, rompimientos celulares y aglutinamientos entre las partículas vecinas.

Como las biomásas son compuestos lignocelulósicos, la lignina se puede definir como un polímero termoplástico al igual que otros fenoles, gomas y ceras que se reblandecen a temperaturas elevadas. Estos materiales aportan así mismos lignina propia como aglutinante, el reblandecimiento de lignina y su endurecimiento posterior a causa de su enfriamiento, mientras se mantiene el material bajo presión, es un factor muy importante para la formación de la briqueta. Por la presión, las superficies de las partículas de la biomasa entran en contacto interno y la lignina, cera u otros, reblandecidos térmicamente permitiéndose la adherencia entre las mismas.

La temperatura, dependiendo de la briqueteadora, se relaciona con la presión debido a la fricción interna entre las partículas y con la pared del dado: Algunas veces se usan fuentes externas de calor (se calienta el dado en su sección de entrada) para conformar las briquetas.

### **2.6.5. Presión de compactación**

La compactación, densificación o briquetación de biomasa representa a todo un conjunto de tecnologías. Esto para la conversión de la materia prima en combustible, presenta ventajas de manejo, transporte, almacenamiento del material, entre otros. Esta tecnología ayuda a expandir el uso de la biomasa como fuente productora de energía.

La compactación de la materia prima mejora sus características como combustible, por ejemplo aumenta su poder calorífico, reduce el costo de transporte y puede ser fuente fundamental de uso en las zonas rurales, en donde no se tiene acceso a otros tipos de combustibles.

La briquetación es una de varias técnicas de aglomeración que existen, cuyo propósito es obtener combustibles con mayor densidad que la materia prima original para fines energéticos. Son considerados como materia prima para la fabricación de briquetas, a los residuos antes mencionados, mayormente de la industria forestal, desperdicios agrícolas y otros desechos con características combustibles. Teniendo como base la compactación de la biomasa, las tecnologías empleadas para fabricación de briquetas se pueden clasificar en:

- Para eliminar residuos sólidos de tipos muy variables.
- De altas presiones de compactación (>100 MPa).

- De medianas presiones de compactación (5–100 MPa).
- De bajas presiones de compactación con el uso de aglutinantes (<5 MPa).

Por efecto de la presión, las partículas de la materia prima tienden a comportarse como sólidos frágiles o material fibroso dependiendo del caso. Se acomodan progresivamente y se fracturan sucesivamente hasta que los fragmentos son capaces de soportar la presión externa aplicada. El progreso de la compactación, que se esquematiza en la siguiente figura, implica el flujo de carbonizado dentro de los intersticios debido al movimiento de los fragmentos que siguen una fractura. Esto conduce a varias capas horizontales compactadas que se presionan unas a otras, desarrollando fuerzas de compresión laterales dentro del compacto.

Al final de la etapa de alta presión en el briqueteado, se alcanza un cuasiequilibrio en donde el compacto soporta la presión externa y el aglutinante, si lo hay, está distribuido estáticamente dentro del compacto. Cuando se elimina la presión este equilibrio se altera y la materia prima comprimida se expande y puede ocurrir algún ligero desplazamiento de los aglutinantes. Además de producirse un efecto de relajación, a causa de los volúmenes de las briquetas crudas son algo mayores que los correspondientes bajo la presión en el molde.

#### **2.6.6. Mecanismo de enlace para los aglomerados**

Los mecanismos enlazantes para el aumento de tamaño por aglomeración fueron definidos y clasificados por Rumpf y posteriormente fueron recogidos por Pietsch. Durante una operación particular de aumento de tamaño se pueden aplicar más de un mecanismo. Se dividen en cinco grupos y varios subgrupos.

Los puentes sólidos se forman entre partículas. Esto por medio de la sinterización de minerales, la cristalización de sustancias disueltas durante el secado, como sucede en la granulación de fertilizantes y endurecimiento de los agentes de enlace tales como las gomas y resinas. Entre los subgrupos se tiene: puentes minerales, puentes sinterizados, reacción química, fusión parcial, endurecimiento de ligantes, entre otros.

El enlace de líquidos móviles genera la cohesión por medio de fuerzas interfaciales y la succión capilar. Por contraste, los puentes de líquidos inmóviles formados con materiales altamente viscosos, como el asfalto o el alquitrán, generan fallas fisurando el enlace más débil. Entonces, las fuerzas de adhesión y cohesión se aprovechan plenamente y la capacidad de aglutinación es mucho mayor. Entre los subgrupos se tiene: puentes líquidos y fuerzas capilares en la superficie de agregados rellenos con líquido.

Las fuerzas intermoleculares y electrostáticas unen partículas muy finas sin la presencia de puentes materiales, es decir actúan fuerzas de atracción entre partículas sólidas. Este tipo de formación de enlaces es al que se debe la tendencia de las partículas menores, que una micra de diámetro, a formar espontáneamente conglomerados durante un proceso de agitación.

No obstante, cuando se trata de partículas de mayor tamaño, estas fuerzas de corto alcance son suficientes para contrarrestar su peso y no se produce cohesión. Entre los subgrupos se tiene: fuerzas moleculares (van der Waals, químicas de enlace), fuerzas electrostáticas, fuerzas magnéticas.

La interconexión mecánica de las partículas ocurre durante la agitación o compresión de partículas fibrosas. Sin embargo es probablemente solo un contribuyente menos de la fuerza de conglomeración en la mayoría de los casos.

En las briquetas de aserrín de madera y carbón activado la principal fuerza enlazante es la de van der Waals. La adición de aglutinantes amplía los mecanismos de adhesión, llegando a tener: enlaces de líquidos móviles (luego de realizar la mezcla) y puentes sólidos (luego de la etapa de secado).

## **2.7. Aglutinante**

Sustancias que son capaces de generar fuerzas para unir fragmentos, partículas de una o varias sustancias o materiales y dar cohesión al conjunto por métodos físicos, químicos o térmicos.

Tienen importancia particularmente en la industria aeronáutica, en la construcción, en lugares donde se necesite fiabilidad de las uniones, en la fabricación de briquetas de material orgánico (biomasa) como cascarilla de arroz, aserrín, cáscara de café, entre otros. Es muy importante su empleo, en pinturas, y en carpintería. El aglomerante para la elaboración de briquetas orgánicas debe cumplir los siguientes aspectos:

- De fácil preparación
- De fácil aplicación
- Debe ser de fácil obtención
- De costo relativamente bajo
- No ser contaminante durante su combustión
- Al entrar en contacto con la piel no debe ser nocivo
- Facilidad de mezclado con la materia prima
- Debe poseer buenas propiedades de adhesión
- Presentar resistencia mecánica considerable.

### **2.7.1. Tipos y propiedades de los aglutinantes**

Los aglutinantes se elaboran a partir de resinas fenólicas, de los almidones provenientes de los vegetales, en algunos casos modificados, y de las arcillas. Los aglomerantes, como las resinas presentan mejores propiedades de flexibilidad y resistencia en las operaciones de corte o desbaste, que los aglomerantes vitrificados, los aglomerantes que provienen de vegetales presentan mejores propiedades de cohesión para compactar biomasa.

Los aglutinantes pueden clasificarse en: combustibles y no combustibles. Son combustibles: las resinas naturales y sintéticas, alquitrán, estiércol animal, manteca, aguas servidas, residuales o barro, gelatina, papel, restos y residuos de pescado, algas y almidones, entre otros. Entre los no combustibles se tiene: limo, arcilla, barro, cemento, cal, y otros.

También se los puede clasificar en orgánicos e inorgánicos. Son orgánicos: albuminatos, alcoholes, almidones, alquitranes, azúcares, breas, caseína, cola, dextrina, gelatinas, humatos, ligninas-lignosulfonatos, melazas, papel, aserrín, resinas y turba. Entre los inorgánicos: alumbre, arcillas, bentonita, borato de sodio, cal y cal hidratada, cemento, cloruro de magnesio, escayola, silicato de sodio, sílice y yeso.

De los aglutinantes citados, no todos son adecuados para la fabricación de briquetas combustibles por diversos factores. Generalmente entre los más comunes para este fin:

- Almidones de yuca, maíz, arroz
- Resinas (cola blanca)
- Melaza

- Parafina
- Arcillas
- Alquitrán

En la briqueta, la misión del aglutinante es mantener unidas las partículas durante su secado, almacenamiento y posterior uso sin presentar problemas de desmenuzamiento.

### **2.7.2. Almidones**

Proviene de la familia de los carbohidratos, constituidos de cadenas lineales (amilasa) y cadenas ramificadas (amilopectina). Los almidones son extremadamente versátiles, alcanzando una eficiencia incomparable en todas sus aplicaciones.

El almidón es la sustancia con la que las plantas almacenan su alimento en raíces (yuca), tubérculos (papa), frutas y semillas (cereales). Pero, no solo es una importante reserva para las plantas, también para los seres humanos tiene una alta importancia energética. Esto proporciona gran parte de la energía que consumimos los humanos por vía de los alimentos.

Por lo tanto, el almidón es una sustancia que se obtiene exclusivamente de los vegetales que lo sintetizan a partir del dióxido de carbono. Estos se que toman del suelo, de la atmósfera y del agua.

En el proceso se absorbe la energía del sol y se almacena en forma de glucosa y uniones. Entre estas moléculas se forman las largas cadenas del almidón, que pueden llegar a tener hasta 2 000 o 3 000 unidades de glucosa.

### **2.7.2.1. La utilidad del almidón**

El uso del almidón es amplio. Por ejemplo, en la industria alimentaria, como aditivo para algunos alimentos, tiene múltiples funciones, como: adhesivo, ligante, enturbiante, formador de películas, estabilizante de espumas, conservante para el pan, gelificante, aglutinante, y otros.

Es utilizado en la fabricación de embutidos y fiambres de baja calidad para dar consistencia al producto. Esto como adhesivo, en la preparación de embalajes de espuma, una alternativa biodegradable a los envases de poliestireno, y otros.

### **2.7.2.2. Almidón de yuca**

El almidón se obtiene de las raíces de mandioca (yuca), de los granos del arroz o del grano de maíz desgerminado. También conocidos como: fécula de mandioca (yuca-tapioca), y habitualmente son utilizados como componentes en los siguientes segmentos industriales:

- Sector alimenticio: en panes de queso, tortas, pudines, cremas, confites, sagú, polvillo ácido para galletas, polvo chocolatado instantáneo, aglutinante para embutidos, espesante para alimentos cocidos, compuesto para grasas vegetales (margarina), entre otros.
- Sector químico–farmacéutico: vehículo o excipiente de pastillas, grageas y jarabes en el sector de medicamentos, jabones, detergentes, pastas dentífricas, colas, gomas, tintas, barnices, explosivos industriales menores, y otros.

- En la química fina se utiliza para la obtención de sorbitol, manitol, dextrosa, dextrina, glucosa y otros.
- Sector industrial papelerero: como agente aglutinante y precipitador de las fibras de celulosa del papel y cartones, flexibilizante y mejorador de textura y resistencia.
- En fabricación de briquetas: como aglutinante en briquetas de materiales orgánicos, siendo uno de los mejores almidones. Es utilizado principalmente para carbón vegetal o cascarilla de arroz, se usa por presentar muy buenas propiedades de cohesión para este tipo de material, y además de bajo costo respecto a otros aglutinantes. La cantidad adecuada de adición de esta sustancia bordea desde el 4 al 20 % dependiendo del tipo de materia orgánica, siendo ideal para biomasa entre 4 al 8 %, amasando una pasta con agua caliente.

### **2.7.2.3. Almidón de maíz**

Es un polisacárido natural obtenido de la molienda húmeda del grano referido, la cual es una técnica que permite separar algunas de las partes del grano en sus constituyentes químicos. Cuando se le realiza al maíz se obtienen almidones y otros productos como aceites, alimento para el ganado, harinas de gluten o tortas de germen y productos de la hidrólisis del almidón como la glucosa.

Entre las principales aplicaciones del almidón de maíz se tiene las siguientes:

- En la fabricación de cerveza: auxiliar en la reducción de nitrógeno y contenido de fibras. Mejorador de estabilidad. Disminuye la sensación de saciedad o pesadez. Cerveza más clara y brillante. Aumento en la velocidad de filtración.
- En productos de confitería: gelificante en la producción de gomas, natillas, cajetas, entre otros. Espesante de bajo costo en rellenos, jarabes, y otros. Agente de moldeo en artículos depositados. Antiadherente en productos suaves tipo malvaviscos.
- Como espesante: por su capacidad de hinchamiento en solución, el almidón de maíz es un espesante de bajo costo utilizado en productos alimenticios, gomas y adhesivos.
- Como vehículo: su compatibilidad con ingredientes diversos lo hacen un excelente vehículo o extensor de diversos productos alimenticios, industriales y farmacéuticos.
- Como gelificante: las cualidades de retrogradación de los almidones, permiten usarlos en diversos productos, principalmente del sector alimenticio
- Sustrato de fermentación: su alta pureza, permite a los almidones de Arancia Corn Products, una excelente funcionalidad como fuente de carbohidratos fermentables.
- Como aglutinante: como aglutinante tiene la capacidad de formar pastas viscosas, permite al almidón de maíz la posibilidad de uso como ligante o aglutinante de una amplia gama de ingredientes.

- Control de textura: tanto crudo como en dispersión, el almidón de maíz funciona como un eficaz medio para el control de la consistencia de diversos productos.
- Como agente de moldeo: el almidón crudo tiene la capacidad de retener formas estampadas sobre su superficie, cualidad importante en la industria alimentaria principalmente.
- En la fabricación de briquetas: es utilizado como aglomerante para briquetas de materia orgánica con porcentajes del 5 al 8 % en peso y 30 a 35 % de agua fría. Este debe añadido a la mezcla en frío, pero utilizar este almidón es un poco más costoso que el almidón de yuca.

#### **2.7.2.4. Almidón de arroz**

Es un polvo suave y blanco que consiste en partículas minúsculas de pocas micras de tamaño. Al ser las partículas tan pequeñas como glóbulos de grasa, los gránulos de almidón de arroz son el almidón preferido para usar en alimentos con grasa reducida, tales como mayonesa baja en grasa. Tiene diversos usos como apresto de camisas, encajes, y otros

El almidón de arroz tiene como diferencia al de maíz que este es insípido, razón por la cual es utilizado en la industria farmacéutica como excipientes en comprimidos y cápsulas.

#### **2.7.3. Cola blanca**

Es un pegamento clásico está compuesto de acetato de polivinilo (PVA). Resulta adecuado para las uniones de madera, derivados y materiales porosos

como el papel y el cartón. La apariencia de las colas vinílicas es similar a la de la leche espesa, pero una vez que está seca adopta un acabado transparente e imperceptible.

Los usos más generales están en el campo de la carpintería, aglomerante de pinturas, para acabados de mampostería, en manualidades. Para la fabricación de briquetas de biomasa se utilizan porcentajes del 5 al 20 % en peso, y otros. Para su aplicación, este pegamento requiere la limpieza de las superficies que se van a encolar.

Una ventaja de este tipo de aglutinante es que su aplicación puede ser realizada en frío como en el caso del almidón de maíz, a diferencia del almidón de yuca. Presenta buenas propiedades de cohesión con la mezcla incluso con materia húmeda, es menor costo que otros aglomerantes similares como la parafina, resaflex, y algunos almidones.

Para el caso de briquetas de madera, aserrín, paja y material fibroso se puede optar por este tipo de aglutinante, aunque es posible utilizar cualquier otro o una mezcla de ellos. Algunas resinas y aglutinantes no presentan buenas propiedades de cohesión con materia húmeda y por ende son utilizadas en mayor cantidad, por lo que aumenta el costo de fabricación de la briqueta, por estas razones se prefiere la cola blanca.

## **2.8. Melaza**

Es un producto líquido espeso derivado de la caña de azúcar y en menor medida de la remolacha azucarera, obtenido del residuo restante en las cubas de extracción de los azúcares. Su aspecto es similar al de la miel aunque de

color parduzco muy oscuro, prácticamente negro. El sabor es dulce ligeramente similar al del regaliz.

Se generan en la cristalización del azúcar, contienen un 32 % de sacarosa y constituyen una fuente de carbohidratos. Su naturaleza higrométrica la hace difícil de almacenar. Nutricionalmente presenta un altísimo contenido en azúcares e hidratos de carbono. Además de vitaminas del grupo B y abundantes minerales, entre los que destacan el hierro, cobre y magnesio. Su contenido de agua es bajo. Es utilizada en: alimentación animal (mezclada con bagazo o en forma de levadura); producción de proteínas unicelulares, alcohol etílico y levadura; cementación de pozos de petróleo, y otros.

Un rango adecuado para formar briquetas con melaza es entre el 25 % y 40 %; algunos trabajos investigativos reportan valores del 16 % para la mezcla considerada como buena y tener una cohesión consistente de las partículas del material orgánico.

Al conocer las propiedades de los aglutinantes, los más empleados para realizar las briquetas, son el almidón de yuca y la cola blanca. Los cuales pueden ser considerados por presentar buenas propiedades de cohesión con la mezcla y además de menor costo que otros aglomerantes como almidones de maíz o arroz, parafina, melaza, arcilla, y otros.

### **2.8.1. Briquetación**

El proceso de briquetado consta de los siguientes pasos:

### **2.8.2. Recolección de la materia prima**

El proceso de recolección de la materia prima se realiza en aserraderos, carpinterías, y otros, y se traslada a patios amplios para que se pueda secar al aire libre de ser necesario. El carbón activado se puede conseguir en plantas de tratamiento de aguas, laboratorios, entre otros.

### **2.8.3. Clasificación de la materia prima**

Luego del secado de la materia prima se procede a clasificar la materia prima para librarla de impurezas y que no afecte o produzca daños al molino, pasándola por una malla (proceso de cernido o tamizado). Esto con el fin de tener un tamaño de partícula estándar en todo el proceso de fabricación de las briquetas.

### **2.8.4. Molienda del material**

Una vez clasificada la materia prima se procede a moler, en molinos de martillos, piedras o discos. En el caso del aserrín no siempre necesita de este proceso, ya que en la mayoría de los casos al aserrar la madera, se obtienen directamente tamaños apropiados para su briquetación. Si se utiliza alguna otra materia como cascarilla de arroz o cualquier otra materia prima parecida, no pueden ser compactadas directamente, es necesario de un proceso que permita aglutinarlas para obtener un material de mayor tamaño y mejor consistencia.

### **2.8.5. Mezclado y compactación del aglutinante**

La adición del aglutinante en la mezcla se realiza luego de haber molido la materia prima y que la granulometría del material se encuentre dentro del

rango establecido. Entonces se realiza la adición de agua a la mezcla hasta obtener una consistencia apropiada, escurriendo el exceso o aumentando en caso de ser necesario.

La mezcla es una de las operaciones de la ingeniería química más difíciles de someter a un análisis científico; hasta la actualidad no se ha desarrollado ninguna fórmula o ecuación aplicable al cálculo del grado de realización al que se verifica la mezcla o la velocidad con que se realiza, en determinadas condiciones. Precisamente por ser el arte de mezclar tan empírico y por casi la infinita variedad de sustancias que pueden mezclarse, el número de modelos de mezcladores inventados es enorme, y adaptando el tipo de maquinaria usada para la aplicación correspondiente.

El mezclador debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Producir un grado de mezcla suficiente y de buenas características.
- Establecer y mantener una velocidad satisfactoria y una dirección conveniente del movimiento de toda la masa del material de modo que se mezcle en el grado deseado y en tiempo óptimo todo el material contenido en el mezclador.

#### **2.8.6. Compactación de la mezcla**

La compactación se realiza una vez que la mezcla con el aglutinante sea homogénea. Valiéndose de un pistón (densificación por impacto), el funcionamiento se basa en el golpeteo de un pistón por medio de un volante de inercia sobre la biomasa, la presión de compactación alcanzada es de 50 a 100 MPa, con grados de humedad de la mezcla de hasta 15 y 17 % en base húmeda.

La producción de briquetas con este tipo de equipos es de 200 kg/h a 1 500 kg/h. Aunque existen equipos que procesan hasta 2 000 kg/h o 6 000 kg/h, obteniendo densidades entre 1 y 1,2 kg/dm<sup>3</sup>. El consumo de energía de estos equipos es de aproximadamente de 20 a 60 w/kg.

### **2.8.7. Secado de briquetas**

Una vez que se han obtenido las briquetas crudas (húmedas) el siguiente paso es su secado, el cual puede realizarse de forma natural (al aire libre), o en mufla. Un secador debe cumplir exigencias de carácter general como son: realizar rápidamente las operaciones a que estén destinadas sin perjudicar el material a secarse, utilizar con economía las fuentes de calor empleadas, ser sencillas y requerir muy poco gasto para su funcionamiento y alimentación.

### **2.8.8. Secado de aire libre**

Luego del proceso de compactación, las briquetas (crudas) presentan un elevado contenido de humedad, surgiendo así una serie de problemas en el acondicionado para su utilización con fines energéticos.

El secado natural consiste en aprovechar las condiciones ambientales favorables (días soleados). Para facilitar la deshidratación de la biomásas, en este caso las briquetas, y tiene una duración de entre 10 a 30 días, puesto que depende de las temperaturas que presente el ambiente. El movimiento del aire se realiza por acción del viento y en que la evaporación de la humedad se deriva del potencial de secado del aire y de la influencia directa de la energía solar.

El secado natural, en terrazas o en el campo, es un método ampliamente utilizado y es en donde mayor cantidad de briquetas se puede secar. En este

tipo de secado las briquetas bajarán su humedad hasta establecer una relación de equilibrio entre su humedad interna y la del ambiente que les rodea (equilibrio higroscópico).

A través de los tiempos se han ido mejorando los mecanismos de secado al ambiente, para no consumir energía. Esto llega a construirse secadores solares tipo invernaderos (tecnología apropiada), donde se puede aprovechar de mejor manera la energía solar para fines de secado y reducir el tiempo del mismo.

#### **2.8.9. Secado en mufla**

Con el secado natural, aún con las condiciones ambientales adecuadas e infraestructura suficiente para el almacenamiento de las briquetas durante un período más o menos largo de tiempo. Esto no es posible alcanzarlos normalmente humedades por debajo del 20 % en base húmeda. Cuando la humedad conseguida con el secado natural no es la adecuada para el procesado de material, o bien no se dispone de condiciones necesarias para su realización, es necesario recurrir al secado forzado.

Este tipo de secado se realiza utilizando un combustible que proporcione las condiciones buscadas, llegando a alcanzar humedades inferiores a la humedad de equilibrio con el medio ambiente. Esto puede ser beneficioso o perjudicial, se reduce ampliamente el tiempo de secado, pero se debe tener en cuenta que como por una parte se alcanza un beneficio. Esto encarece drásticamente el proceso poniendo en riesgo la viabilidad económica del aprovechamiento energético de las briquetas.

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones y con frecuencia, el producto que se extrae de un secador para empaquetado.

Existen varios tipos de operaciones de secado, que se diferencian entre sí, por la metodología seguida en el procedimiento de secado; puede ser por eliminación de agua de una solución mediante el proceso de ebullición en ausencia de aire. También puede ser por eliminación de agua mediante adsorción de un sólido; por reducción del contenido de líquido en un sólido, hasta un valor determinado mediante evaporación en presencia de un gas o por aumento de temperatura; o, secado al aire libre.

Los sólidos que se secan pueden tener formas diferentes (escamas, gránulos, cristales, polvo, tablas o láminas continuas) y poseer propiedades muy diferentes. El producto que se seca puede soportar temperaturas elevadas o bien requiere un tratamiento suave a temperaturas bajas o moderadas. Esto da lugar a que en el mercado exista un gran número de tipos de secadores comerciales. Las diferencias residen fundamentalmente en la forma en que se mueven los sólidos a través de la zona de secado y en la forma en la que se transmite. Las operaciones de secado pueden clasificarse ampliamente según que sean por lotes o continuas. Estos términos pueden aplicarse específicamente desde el punto de vista de la sustancia que está secando.

Para este trabajo el tipo de secado seleccionado es al aire libre y el tiempo oscila de entre 45 a 60 minutos. Aunque es rápido su desventaja está en el costo que puede representar en tener una mufla, y también el número de briquetas

que se puede secar es limitado. Lo debido al espacio insuficiente que tiene la mufla y como consecuencia al costo de la briqueta aumenta.

## **2.9. Caracterización de las briquetas**

Las briquetas al ser utilizadas en el gasificador, deben cumplir exigencias de resistencia, durabilidad, y humedad para que puedan ser utilizadas y almacenadas.

### **2.9.1. Friabilidad**

Para evaluar la friabilidad de las briquetas se utiliza el método del golpe contra el suelo. Esta consiste en dejar caer sobre suelo cerámico desde una altura de 1 m, un número determinado de briquetas y contar el número de las mismas que se rompen en 2, 3, 4, 5 o más trozos, y obtener a partir de esos resultados un índice de friabilidad FR. Este método siendo el más sencillo, no reproduce lo que ocurre en la realidad, pero es aceptado para este estudio y dará una idea de la resistencia al desmenuzamiento de las mismas.

El índice de friabilidad FR está dado por:

$$FR = \frac{NF}{NI} \quad \text{[Ecuación. 1]}$$

En donde:

NF = número de briquetas al final del ensayo (enteras y fraccionadas)

NI = número de briquetas al inicio del ensayo

El valor del índice FR es siempre mayor o igual a 1, a mayor valor de FR mayor será la friabilidad y, por tanto, menor la resistencia al golpeteo.

### **2.9.2. Poder calorífico**

Es la cantidad de calor que entrega un kilogramo, o un metro cúbico de combustible al oxidarse en forma completa; puede ser superior o inferior. El superior se refiere cuando el vapor de agua contenido en los gases de la combustión se condensa, en el inferior este vapor no condensa.

Según la Norma Técnica Colombiana 2060, en su sección 4.1: *Requisitos de las briquetas*, el poder calorífico que debe tener una briqueta, es como mínimo 12,5 MJ/kg. Al igual que otros autores establecen que el rango de poder calorífico considerado para que la briqueta sea un buen combustible varía aproximadamente de 13,8 a 17,5 MJ/kg.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Se detallan las variables necesarias para la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas de los combustibles sólidos densificados a partir del reciclado del aserrín de pino blanco (*Pinus pseudostrobus Lindl*) y carbón activado. Estos aglomerados mediante una solución de almidón de yuca (*Manihot esculenta*) cocida, apelmazado artesanalmente, realizando once diferentes formulaciones. Estas se formularon cinco veces cada una para dar un total de 55 pruebas, para la prueba de la friabilidad se realizaron 100 pruebas.

##### 3.1.1. Variables De Control

También conocidas como variables experimentales servirán como parámetro durante la experimentación.

Tabla II. Determinación de variables de control

Variable	Unidad SI		Factor potencial de diseño		Factores perturbadores
			Constante	Variable	Controlable
Peso carbón activado	kg	Kilogramos		X	X
Peso del aserrín	kg	Kilogramos		X	X

Continuación de la tabla III.

Variable	Unidad SI		Factor potencial de diseño		Factores perturbadores
			Constante	Variable	Controlable
Peso de almidón	kg	Kilogramos		X	X
Peso de agua	kg	Kilogramos		X	X
Diámetro cilindro	m	Metros	X		X
Presión de compactación	kPa	kilopascal S	X		---

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. Variables dependientes

También conocidas como variables de respuestas, serán aquellas propiedades que cambien conforme la formulación.

Tabla III. **Determinación de las variables dependientes**

Variable	Unidad SI	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
		Constante	Variable	Controlable	No Controlable
Densidad	kg/m <sup>3</sup>		X	X	
Poder calorífico	kJ/kg		X	X	

Continuación de la tabla IV.

Variable	Unidad SI	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
		Constante	Variable	Controlable	No Controlable
Porcentaje de cenizas	%		X	X	
Humedad base CSD	%H <sub>BS</sub>		X		X

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.3. Variables independientes

VARIABLES DE CONTROL O TAMBIÉN CONOCIDAS COMO VARIABLES EXPERIMENTALES. Estas son las variables que el experimentador cambiara o modificara para esperar algún tipo de resultado en las variables de respuesta.

Tabla IV. **Determinación de variables independientes**

Variable	Unidad SI	Factor Potencial de diseño		Factores Perturbadores	
		Cte.	Variable	Controlable	No Controlable
materia prima	G		X	X	
Tamaño de partícula	Mm	X		X	

Continuación tabla V.

Tiempo de secado	Días		X	X	
Relación almidón-agua	A:W	X		X	
Humedad base seca materia prima	%H <sub>BS</sub>	X		X	
Área de transferencia de masa	m <sup>2</sup>	X		X	
Volumen de indicador para titular	mL		X	X	

Fuente: elaboración propia.

#### 3.1.4. Variables de medición

Estos parámetros serán los controlados durante la experimentación, con el fin de no alterar los resultados finales.

Tabla V. **Determinación de las variables de medición a escala laboratorio**

Variable	Unidad SI		Instrumento de medición
Cantidad de materia prima	Gramos	g	Balanza
Cantidad de partículas extrañas	Gramos	g	Balanza
Cantidad de cenizas	gramos	g	Balanza
Cantidad de almidón cocido	Gramos	g	Balanza
Presión ejercida	auditiva	---	---
Cantidad de agua no evaporada	Gramos	g	Balanza
Altura	metros	m	Vernier
Diámetro	metros	m	Vernier
Poder calorífico	kJ/kg	kJ/kg	Bomba calorimétrica
Porcentaje de humedad	Porcentaje	%	Balanza de humedad
Índice de friabilidad	porcentaje	%	Metro y suelo cerámico

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación de campo de estudio

Se realizará un estudio a nivel laboratorio sobre el proceso de fabricación de briquetas de pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl) y carbón activado. Para ello se determinarán los valores de operación en las variables involucradas en el

proceso tales como, la fracción de carbón activado, los diámetros internos y externos, y la altura.

Se encontrará el índice de friabilidad, densidad, humedad, porcentaje de cenizas y poder calorífico.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

- Investigador: Omar Fernando Ordoñez Rivera
- Asesor: Ing. Federico Salazar.
- Coasesor: Ing. Jaime Carranza

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

Recursos materiales necesarios para la realización del experimento, esto abarca los conceptos de recursos de la materia prima necesaria, de la cristalería a utilizar y del equipo.

#### **3.4.1. Materia prima**

- Pino blanco (*Pinus pseudostrobus Lindl*)
- Carbón activado
- Almidón de yuca

#### **3.4.2. Cristalería y equipo**

- Calorímetro de bomba de chaqueta sencilla equipado con bomba de oxígeno Parr con lecturas de temperatura de termómetro digital con un rango de trabajo de 10 a 40 °C y una resolución de 0,0001 °C.

- Desecador tapa llave, 300 mm con capacidad de hasta 14 litros, brida plana, tapa con tubuladura esmerilada y llave de vidrio para vacío, con disco de porcelana, marca ECO.
- Secador eléctrico de bandejas de flujo transversal marca Serproma.
- Horno tipo mufla temperatura 1 100° C con capacidad 8,2 L, y con temperatura 1 300°C con capacidad 6,7 L
- Plancha de calentamiento con agitación, marca Corning, modelo PC-620120 V/ 100 V, frecuencia 60 Hz, potencia 1 113 w, rango 0 – 4 800 C, 0 –1 100 rpm.
- Cronómetro digital, con marcador de segundos, minutos y hora, marca Casio.
- Vaso de precipitados de 1 000 mL, marca Pirex.
- Termómetros de mercurio rango 0-100 °C.
- Crisol.
- Tubo PVC 3”.
- Tubo PVC 1”.
- Agua.
- Tamices num. 5,10,12.

### **3.5. Técnica cuantitativa**

- Selección de los materiales
- Preparación de los materiales
- Obtención:
  - Obtención de una correlación del poder calorífico respecto al porcentaje de carbón activado en la muestra, mediante bomba calorimétrica
  - Obtención de una correlación del poder calorífico respecto al porcentaje de carbón activado en la muestra, mediante un análisis inmediato.
  - Formulación de las briquetas un respecto al porcentaje de carbón activado:
    - Kilogramos de aglutinante necesarios
    - Densidad
    - Tiempo de secado
    - Friabilidad de las briquetas
    - Tiempo de consumo de las briquetas

#### **3.5.1. Selección de los materiales**

Se seleccionará el aserrín de pino blanco (*Pinus pseudostrabus Lindl*) que tengan tamaño inferior a 3 mm se encuentre seco y libre de partículas extrañas. El carbón activado proviene de las torres de purificación.

El material vegetal a utilizar debe estar libre de materia extraña que pueda afectar los resultados del experimento. La materia extraña está constituida por toda la materia prima que no cumple con la descripción botánica del Pino blanco (*Pinus pseudostrobus Lindl*). Así como objetos metálicos o plásticos que se hayan mezclado por equivocación.

Respecto al carbón activado la selección es nula, ya que ha de ser extraídos de las torres directamente no atiende a estar contaminado con partículas extrañas. Pesar 100 g de materia vegetal y verificar que cumplan con los siguientes requisitos:

- seleccionar la viruta de aserrín de un tamaño inferior de 3 mm de pino
- Determinar el porcentaje de materia extraña en la muestra.
- Eliminar toda la materia extraña presente y secar la materia prima.

### **3.5.2. Preparación de los materiales**

El material será secado con el fin de disminuir su contenido de agua y por consiguiente la actividad de los microorganismos presentes, desacelerando de esta manera la descomposición de la materia vegetal. Secar el material en un secador eléctrico.

Determinar la humedad de una muestra de 1 g del material en una balanza de humedad, cada hora aproximadamente, si esta presenta una lectura mayor al 10 %. El material será secado nuevamente hasta que la humedad sea menor al 10 %.

### **3.5.3. Caracterización del material vegetal**

El porcentaje de cenizas permite estimar la cantidad de minerales en la materia vegetal. El procedimiento para determinar el porcentaje de cenizas consiste en:

- Pulverizar una porción del material vegetal a evaluar
- Pesar 1g del material pulverizado en un crisol previamente tarado
- Incinerar a una temperatura menor de 450 °C
- Enfriar en una desecadora y pesar
- Determinar el porcentaje de cenizas

### **3.5.4. Selección de los porcentajes de mezcla**

Se evaluarán diez distintos porcentajes de mezclas empezando por una briqueta de mezcla de aserrín con aglomerante y aumentando progresivamente. La cantidad de carbón activado, en la mezcla de las siguientes briquetas, hasta llegar a una briqueta de carbón activado con aglomerante. Los porcentajes a utilizar serán elegidos en función del índice de friabilidad que obtengan. El grado de hidratación de los materiales será inversamente proporcional a la viscosidad que posea el material aglomerante (almidón de yuca).

### **3.5.5. Aglomeración y compactación de los materiales**

Las mezclas se realizarán por medio de un método artesanal en el cual se utilizarán el aserrín de pino blanco (*Pinus pseudostrobus Lindl*). El carbón activado y las diferentes cantidades de material aglomerante (almidón de yuca) según sea la demanda de la mezcla. Las mezclas serán compactadas en un

molde cilíndrico de 2 pulgadas de diámetro y perforadas por un tubo de 0,5 pulgada de diámetro.

- Pesar 100 gramos de los materiales previamente secados y tamizados.
- Agregar la mezcla cocida de almidón de yuca.
- Agitar hasta conseguir que el material sea homogéneo.
- Dosificar la mezcla en los moldes cilíndricos y apelmazar.
- Insertar en el centro de la mezcla el molde cilíndrico interior y retirarlo lleno de la mezcla.
- Colocar la briqueta en el secador.
- Una vez seca la briqueta se retiraran los moldes.
- Se pesarán de nuevo para obtener cuánto almidón de yuca.
- Se realizarán cinco corridas.
- Y se variará 10 fracciones parciales.

### **3.5.6. Poder calorífico de las briquetas**

- Se medirá un gramo de pino blanco (*Pinus pseudostrobus Lindl*) y mediante el calorímetro obtener el poder calorífico en kilojoules sobre kilogramo.
- Se medirá un gramo de carbón activado y mediante el calorímetro obtener el poder calorífico en kilojoules sobre kilogramo.
- Se medirá un gramo de almidón de yuca y mediante el calorímetro obtener el poder calorífico en kilojoules sobre kilogramo.
- Mediante las propiedades parciales y teniendo el poder calorífico de los materiales puros se procede según sea las fracciones averiguar el poder calorífico de las mezclas.

- Teniendo conocimiento del poder calorífico de toda las mezclas se realizará un gráfico el cual demostrará el comportamiento del poder calorífico según incrementar la fracción (p/p) del carbón activado.

### 3.5.7. Caracterización de las briquetas

Se evaluarán las propiedades fisicoquímicas de todas las briquetas obtenidas. Los ensayos a realizarse son:

- Determinación de la densidad de la briketa
- Determinación de la humedad relativa de la briketa
- Tiempo de secado óptimo
- Porcentaje de almidón consumido

### 3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Tablas a utilizar para la recolección y ordenamiento de los datos, obtenidos durante la experimentación y necesarios para el procesamiento de datos y el cumplimiento de los objetivos.

Tabla VI. **Porcentaje de materia extraña**

Corrida	Peso de Materia (g)	Material utilizable	Peso de Materia Extraña (g)	
			Otra madera	Otro tamaño
1				
2				
3				

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Secado del carbón activado**

<b>Tiempo de Secado (min)</b>	<b>Masa inicial (g)</b>	<b>Masa final (g)</b>	<b>Porcentaje de Humedad</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Porcentaje de cenizas**

<b>Corrida</b>	<b>Peso de muestra (g)</b>	<b>Tara de Crisol (g)</b>	<b>Peso de Cenizas (g)</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Kilogramos de aglomerante utilizados**

<b>Mezcla</b>	<b>kg de aglutinante</b>	<b>% aglutinante en mezcla</b>
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Poder calorífico de las materias primas**

<b>Materia</b>	<b>Poder calorífico (kJ/kg)</b>
Aserrín de pino blanco ( <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl)	
Carbón activado	
Almidón de yuca	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Volumen de briquetas**

Mezcla	Volumen (m3)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Friabilidad**

Mezcla	Índice friabilidad (%)
1	
2	
3	

Fuente: elaboración propia.

### 3.6.1. Determinación de corridas a realizar

Para determinar la cantidad de tratamientos a realizar, se asumió probabilidad de éxito del 90 %, probabilidad de fracaso de un 10 %, con un nivel de significancia del 4 % y un error estimado del 35 %, por lo que:

$$N = \frac{Z^2 PQ}{E^2}$$

Donde:

Z = confiabilidad

P = probabilidad de éxito

Q = probabilidad de fracaso (1 –P)

E = error estimado

N = número de tratamientos

De la ecuación anterior se obtuvo la cantidad de corridas a utilizar:

$$N = \frac{(1,96)^2 * 0,90 * 0,10}{(0,35)^2}$$

$$N = 2,8224 \approx 3$$

### 3.6.2. Diseño de tratamientos

El experimento a realizar será tomando de diferentes tipos de mezclas variando la fracción parcial (p/p) del carbón activado. Se realizarán cinco corridas donde se tomarán los datos de densidad, poder calorífico, consumo de aglutinante, tiempo de combustión y tiempo de secado. Las 3 briquetas de mejor resultado se le realizarán la prueba de friabilidad donde se fabricarán 100 briquetas de cada tipo para la corrida de la prueba según la norma colombiana.

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Ecuaciones utilizadas durante la experimentación para el cumplimiento de los objetivos y comprobación de la hipótesis estadística.

#### 3.7.1. Porcentaje de materia extraña

Ecuación para calcular el porcentaje de materia extraña, presentes en cada diferente materia prima.

$$\%Me = \frac{Me*100}{Mv} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde:

%Me: porcentaje de materia extraña (%)

Me: materia extraña (g)

Mv: materia vegetal utilizada (g)

#### 3.7.2. Porcentaje de cenizas

Ecuación para calcular el porcentaje de cenizas presentes en cada diferente materia prima.

$$\%C = \frac{SD}{Mv} * 100 \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde:

%C: porcentaje de cenizas (%)

SD: sólidos depositados (g)

Mv: materia vegetal utilizada (g)

### 3.7.3. Porcentaje de extraíbles

Ecuación para calcular el porcentaje de extraíbles, presentes en cada diferente materia prima.

$$\%SE = \frac{E}{M} * 100 \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Donde:

%SE: porcentaje de extraíbles

E: extraíbles (g)

M: mezcla (g)

### 3.7.4. Densidad

Ecuación para calcular la de densidad de cada formulación.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \text{[Ecuación 7]}$$

Donde:

$\rho$ : densidad (g/mL)

M: Masa (kg)

V: volumen de extracto (m<sup>3</sup>)

### 3.7.5. Determinación del índice de friabilidad

Ecuación para calcular el índice de friabilidad de los combustibles sólidos densificados.

$$I = \frac{Pq}{Pt} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

Donde:

I: índice de friabilidad

Pq: pruebas ilesas

Pt: pruebas totales

### 3.8. Análisis estadístico

En el estadístico se hará un cálculo de promedio para obtener datos más exactos con las corridas inicialmente planteadas. El promedio se calculó de la siguiente manera:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Donde:

$\bar{x}$  = valor promedio

$x_i$  = valor i

n = número de datos

A partir del promedio, también se encuentra la desviación estándar (S) que permite observar la dispersión entre valores para una misma medición respecto al promedio. El cálculo de la desviación estándar se representa por:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

$\bar{x}$  = valor promedio

$x_i$  = valor  $i$

$n$  = número de datos

$S$  = desviación estándar

Adicionalmente se realizó el análisis estadístico de varianza (Anova), con la finalidad de comprobar cuál hipótesis estadística es la que mejor se ajusta a la parte experimental del estudio, ya sea esta la hipótesis nula o la hipótesis alternativa planteada.

La idea de este método es expresar una medida de la variación total de un conjunto de datos como una suma de términos, que se pueden atribuir a fuentes o causas específicas de variación. En su forma más simple, se aplica a experimentos que se planifican como diseños completamente aleatorios.

Tabla XIII. **Organización de datos Anova**

<b>Tratamientos</b>				
<b>Repeticiones</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
1	$Y_{11}$	$Y_{21}$	$Y_{31}$	
2	$Y_{12}$	$Y_{22}$	$Y_{32}$	
3	$Y_{13}$	$Y_{23}$	$Y_{33}$	
Total	$Y_{1*}$	$Y_{2*}$	$Y_{3*}$	$T_{**}$

Fuente: WALPOLE, Ronad E; et. Al .*Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*.  
p. 720.

Las fórmulas empleadas son las siguientes:

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - \frac{T_{**}^2}{nK}$$

$$SSA = \frac{\sum_{i=1}^k T_i^2}{n} - \frac{T_{**}^2}{nK}$$

$$SSE = SST - SSA$$

$$S_1^2 = \frac{SSA}{k - 1}$$

$$S^2 = \frac{SSE}{k(n - 1)}$$

$$f = \frac{S_1^2}{S^2}$$

Donde:

SSA= suma de cuadrados de tratamientos

SSE= suma de cuadrados del error

SST= suma de cuadrados totales

k= número de tratamientos

i= subíndice para tratamientos

$T_{**}$  = total general

$T_{i*}$  = total de tratamiento i

$S^2$  = cuadrado medio del Error

$S_1^2$  =cuadrado medio del tratamiento

f= f de pruebas para tratamientos

$Y_{ij}^2$  =todos los datos de todas las muestras

### **3.9. Plan de análisis de los resultados**

La investigación será analizada al detalle, empleando la más reciente versión de hoja de cálculo de Microsoft Excel 2007<sup>®</sup>. Se emplearán las funciones integradas del programa para el manejo, compilación y análisis de datos. Además de las herramientas de análisis estadístico complementarias, y eventualmente, de ser necesario, el uso del complemento Visual Basic para la gestión de información que sea de difícil manejo.

## 4. RESULTADOS

A continuación se presentan los datos cuantitativos y cualitativos obtenidos después de realizar la experimentación:

Tabla XIV. **Cantidad de materia extraña o material no deseado proveniente de las muestras de materia prima**

<b>Material</b>	<b>% Materia extraña</b>	<b>Desviación</b>
Aserrín	3,077	2,926237538
Almidón de yuca	0,4	0,547722558
Carbón activado	7,634	1,082300504

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Humedad de las materias primas previo a la experimentación**

<b>Material</b>	<b>Humedad (%p/p)</b>
Aserrín	10,46
Almidón de yuca	10,46
Carbón activado	11,27

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Poder calorífico de las materias primas**

<b>Material</b>	<b>Poder calorífico (kJ/kg)</b>
Aserrín	17 540
Almidón de yuca	15 300
Carbón activado	9 760

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Porcentaje de cenizas para cada materia prima**

<b>Material</b>	<b>% Cenizas</b>
Aserrín	0,995
Almidón de yuca	0,941
Carbón activado	0,891

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Formulación inicial de los combustibles sólidos densificados**

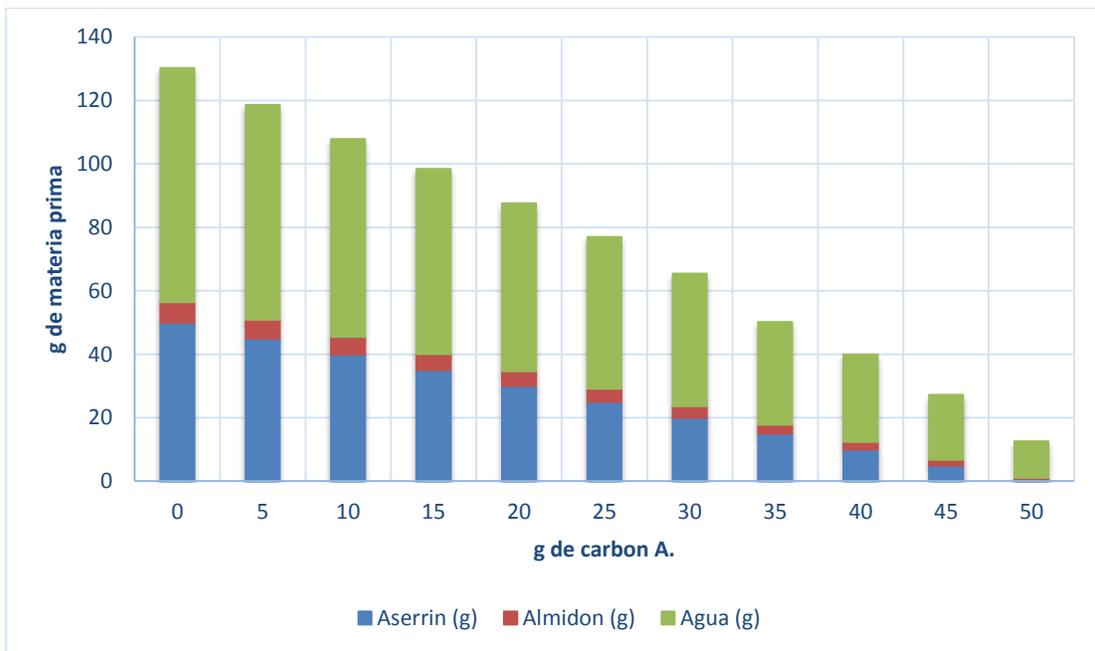
<b>Aserrín (g)</b>	<b>Carbón A. (g)</b>	<b>Almidón (g)</b>	<b>Agua (g)</b>
50	0	6,416	73,784
45	5	5,888	67,712
40	10	5,424	62,376
35	15	5,072	58,328
30	20	4,608	52,992
25	25	4,16	47,84

Continuación de la tabla XVIII.

20	30	3,632	41,768
15	35	2,816	32,384
10	40	2,4	27,6
5	45	1,776	20,424
0	50	1,008	11,592

Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Formulación inicial de los combustibles sólidos densificados**



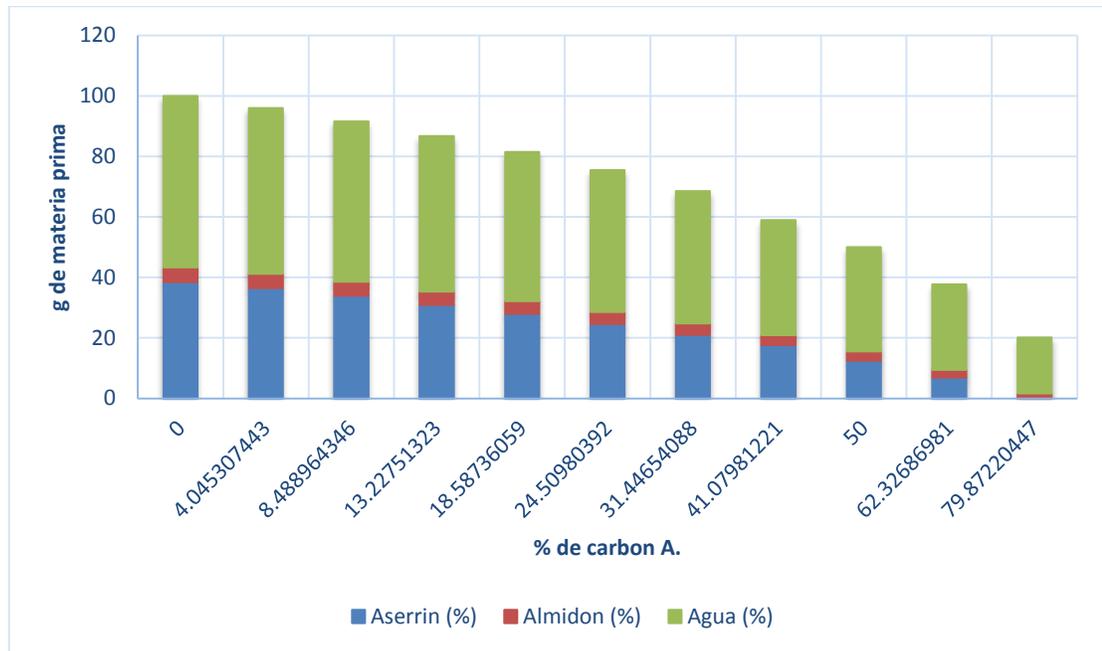
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Porcentajes de las materias primas utilizadas para cada formulación de los combustibles sólidos densificados**

<b>núm.</b>	<b>Aserrín (%)</b>	<b>Carbón A. (%)</b>	<b>Almidón (%)</b>	<b>Agua (%)</b>
1	38,40245776	0	4,927803379	56,66973886
2	36,40776699	4,045307443	4,763754045	54,78317152
3	33,95585739	8,488964346	4,604414261	52,95076401
4	30,86419753	13,22751323	4,472663139	51,4356261
5	27,88104089	18,58736059	4,282527881	49,24907063
6	24,50980392	24,50980392	4,078431373	46,90196078
7	20,96436059	31,44654088	3,807127883	43,78197065
8	17,6056338	41,07981221	3,305164319	38,00938967
9	12,5	50	3	34,5
10	6,925207756	62,32686981	2,459833795	28,28808864
11	0	79,87220447	1,610223642	18,51757188

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Porcentajes de las materias primas utilizadas para cada formulación de los combustibles sólidos densificados en función del carbón activo**



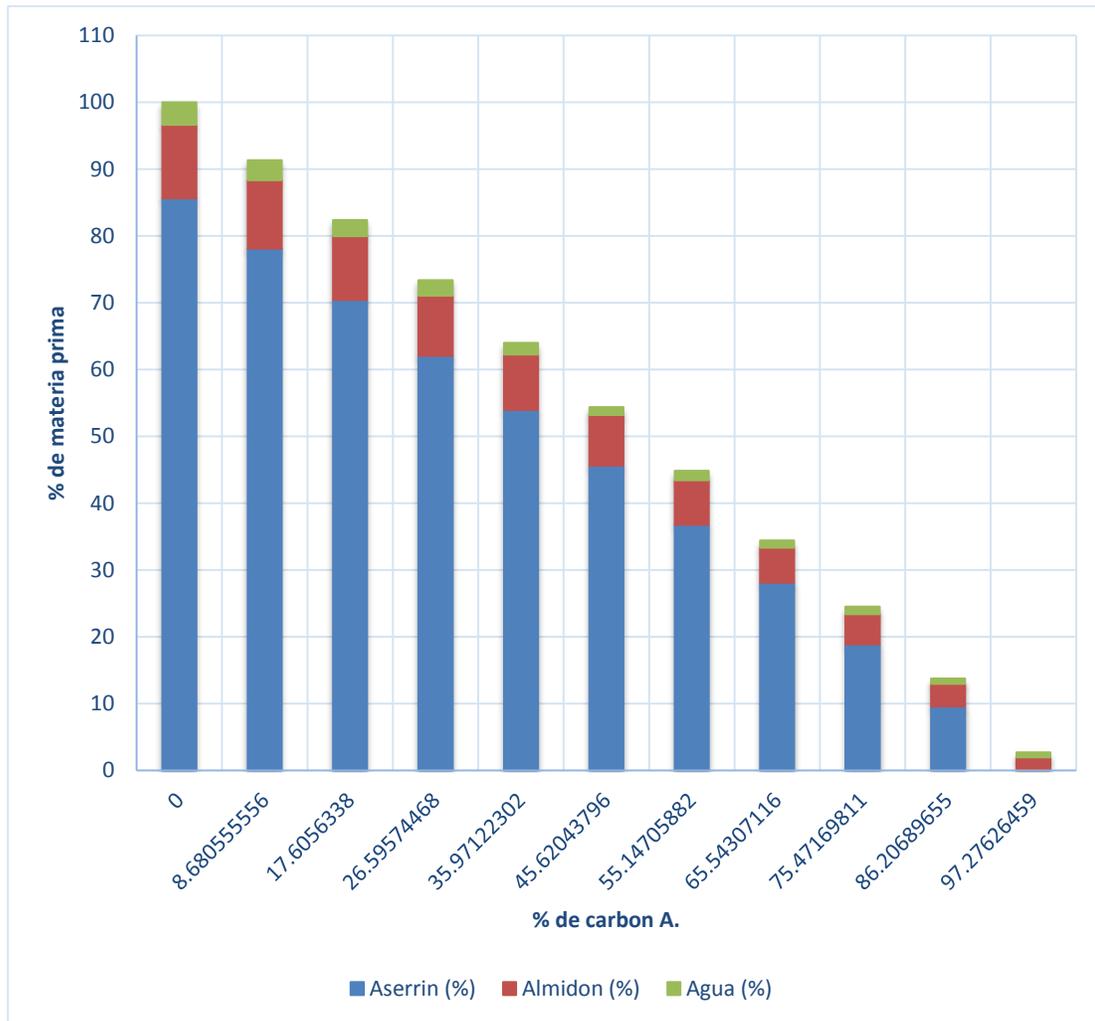
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Formulación de los combustibles sólidos densificados después de un proceso de secado**

<b>núm.</b>	<b>Aserrín (%)</b>	<b>Carbón A. (%)</b>	<b>Almidón (%)</b>	<b>Agua (%)</b>
1	85,61643836	0	10,98630137	3,397260274
2	78,125	8,680555556	10,22222222	2,972222222
3	70,42253521	17,6056338	9,549295775	2,422535211
4	62,05673759	26,59574468	8,,992907801	2,354609929
5	53,95683453	35,97122302	8,287769784	1,784172662
6	45,62043796	45,62043796	7,591240876	1,167883212
7	36,76470588	55,14705882	6,676470588	1,411764706
8	28,08988764	65,54307116	5,27340824	1,093632959
9	18,86792453	75,47169811	4,528301887	1,132075472
10	9,578544061	86,20689655	3,402298851	0,812260536
11	0	97,27626459	1,961089494	0,762645914

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Formulación de los combustibles sólidos densificados después del proceso de secado**



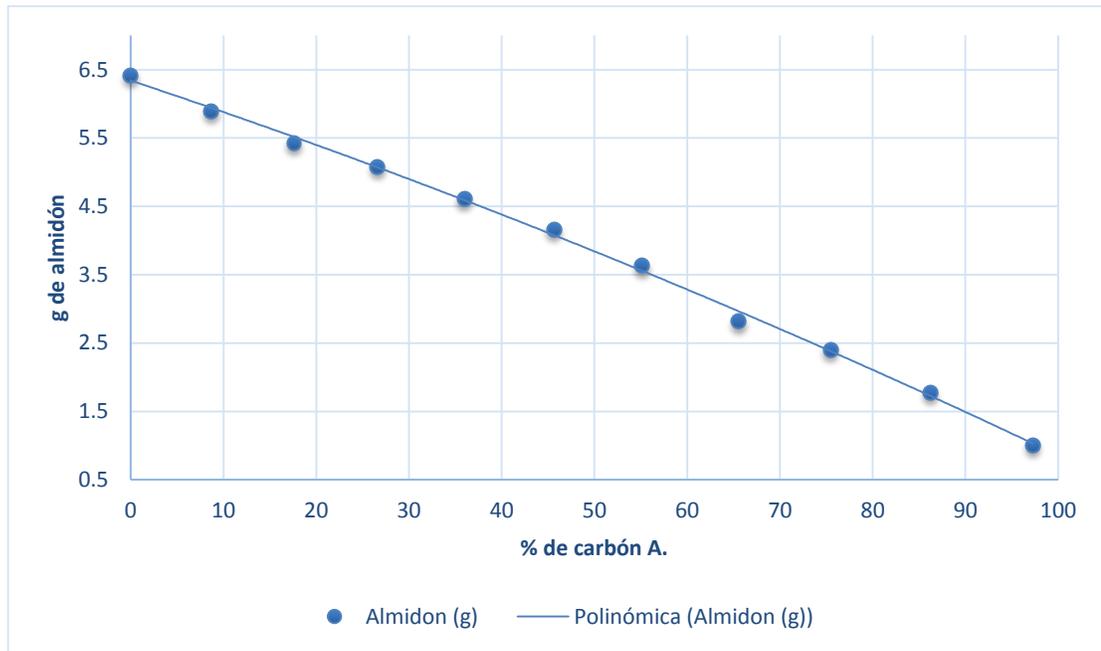
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Consumo de almidón de las formulaciones en función del carbón activado**

<b>Carbón A. (%)</b>	<b>Almidón (g)</b>
0	6,416
8,680555556	5,888
17,6056338	5,424
26,59574468	5,072
35,97122302	4,608
45,62043796	4,16
55,14705882	3,632
65,54307116	2,816
75,47169811	2,4
86,20689655	1,776
97,27626459	1,008

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Consumo de almidón por las formulaciones en función del porcentaje de carbón activado**



Color	Modelo matemático	Coficiente	Intervalo (%)
	$y = -1E-04x^2 - 0,0451x + 6,3399$	$R^2 = 0,9982$	0-100

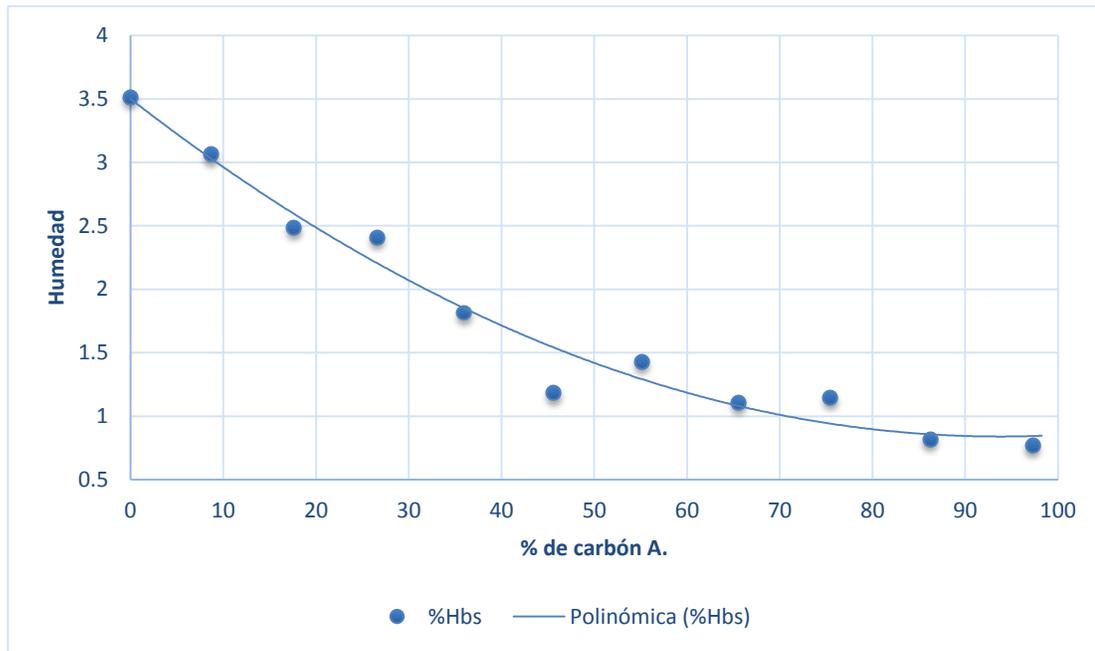
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Porcentaje de humedad en base seca de los combustibles sólidos densificados**

<b>Carbón A. (%)</b>	<b>%Hbs</b>
0	3,516732842
8,680555556	3,063269396
17,6056338	2,482678984
26,59574468	2,411388727
35,97122302	1,816583651
45,62043796	1,1816839
55,14705882	1,431980907
65,54307116	1,05725538
75,47169811	1,145038168
86,20689655	0,818912237
97,27626459	0,768506901

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **porcentaje de humedad de los combustibles sólidos densificados en función del carbón activado**



Color	Modelo matemático	Coefficiente	Intervalo (%)
	$y = 0,0003x^2 - 0,0567x + 3.5$	$R^2 = 0,971$	0-100

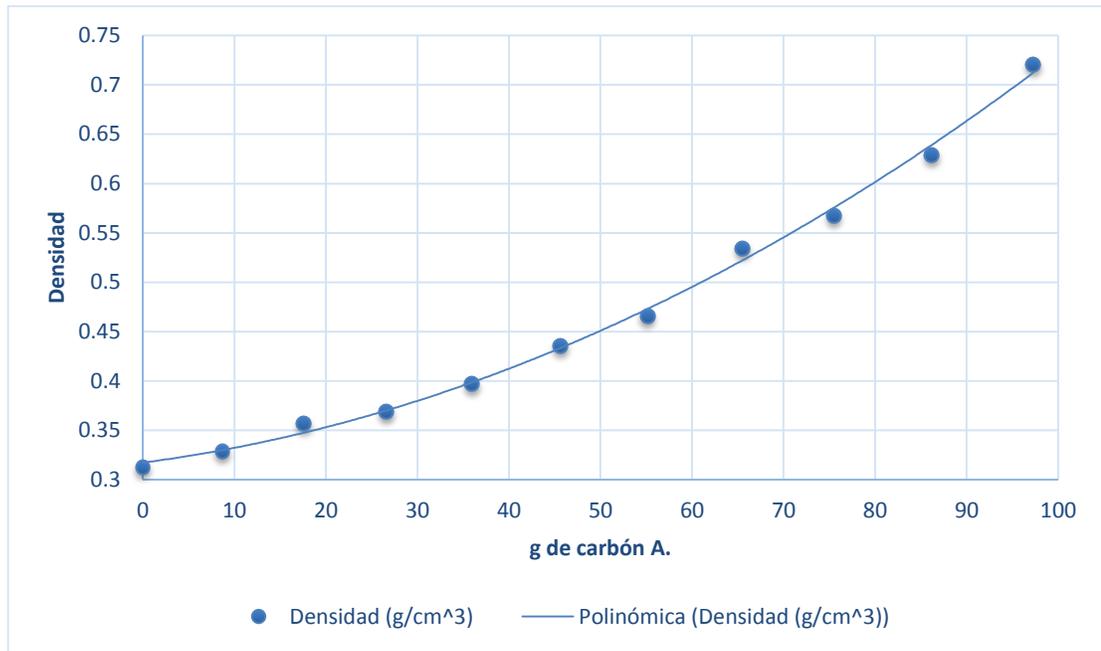
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Densidad de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón activado**

<b>Carbón A. (%)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
0	0,312794585
8,680555556	0,329077043
17,6056338	0,357327743
26,59574468	0,36864298
35,97122302	0,397063446
45,62043796	0,435730234
55,14705882	0,466192477
65,54307116	0,534883749
75,47169811	0,567743596
86,20689655	0,629070616
97,27626459	0,720790909

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Densidad de los combustibles sólidos densificados en función de porcentaje de carbón activado**



Color	Modelo matemático	Coficiente	Intervalo (%)
	$y = 3E-05x^2 + 0,0012x + 0,3173$	$R^2 = 0,9968$	0-100

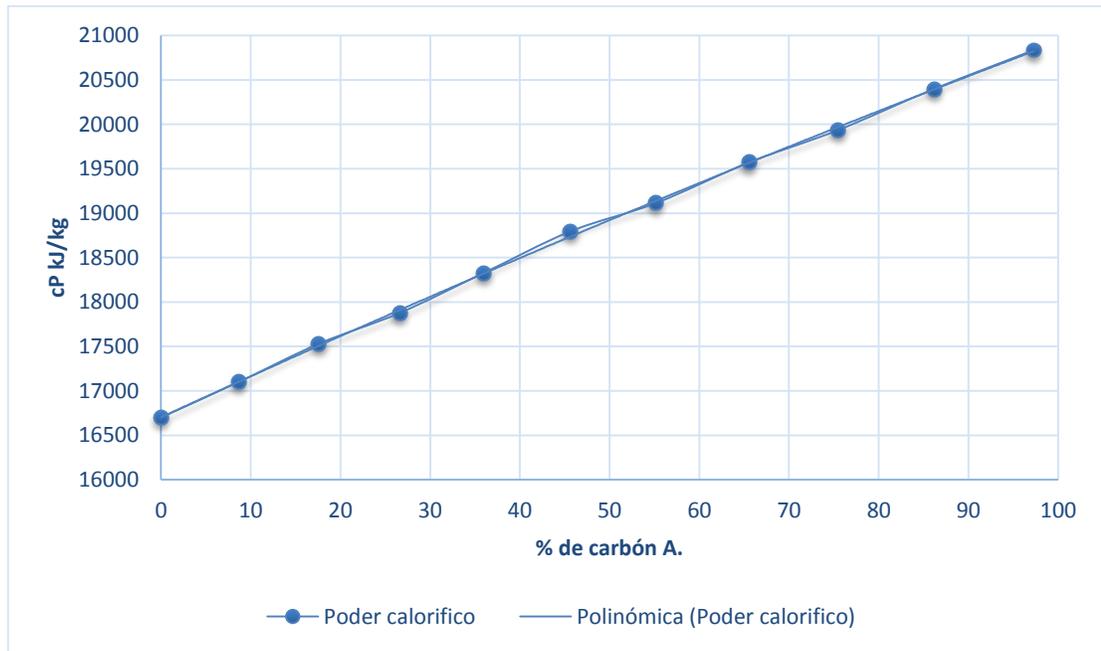
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Poder calorífico de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón activado**

<b>Carbón A. (%)</b>	<b>Poder calorífico</b>
0	16698,0274
8,680555556	17099,59028
17,6056338	17529,70423
26,59574468	17875,02837
35,97122302	18325,58273
45,62043796	18793,75912
55,14705882	19111,57353
65,54307116	19569,94007
75,47169811	19934,33962
86,20689655	20398,90421
97,27626459	20835,06615

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Poder calorífico de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón activado**



Color	Modelo matemático	Coficiente	Intervalo (%)
	$y = -0,043x^2 + 46,526x + 16\ 703$	$R^2 = 0,9996$	0-100

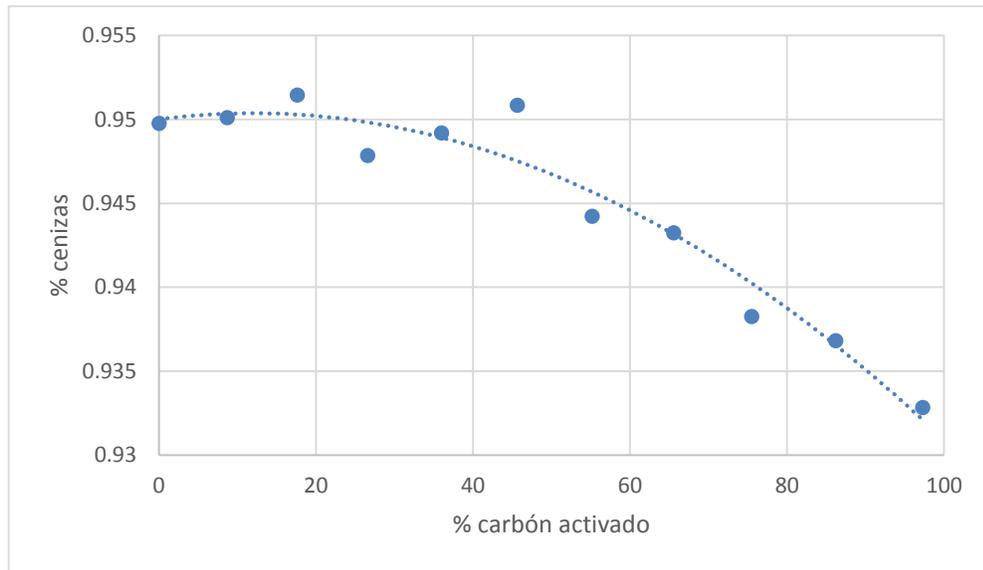
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Porcentaje de cenizas de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón activado**

<b>Carbón A. (%)</b>	<b>% cenizas</b>
0	0,949771507
8,680555556	0,950107778
17,6056338	0,951457465
26,59574468	0,947857305
35,97122302	0,949203741
45,62043796	0,950849635
55,14705882	0,94423
65,54307116	0,943240749
75,47169811	0,938271698
86,20689655	0,936827893
97,27626459	0,932842957

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Porcentaje de cenizas de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón activado**



Color	Modelo matemático	Coefficiente	Intervalo (%)
	$y = -3E-06x^2 + 6E-05x + 0,95$	$R^2 = 0,9441$	0-100

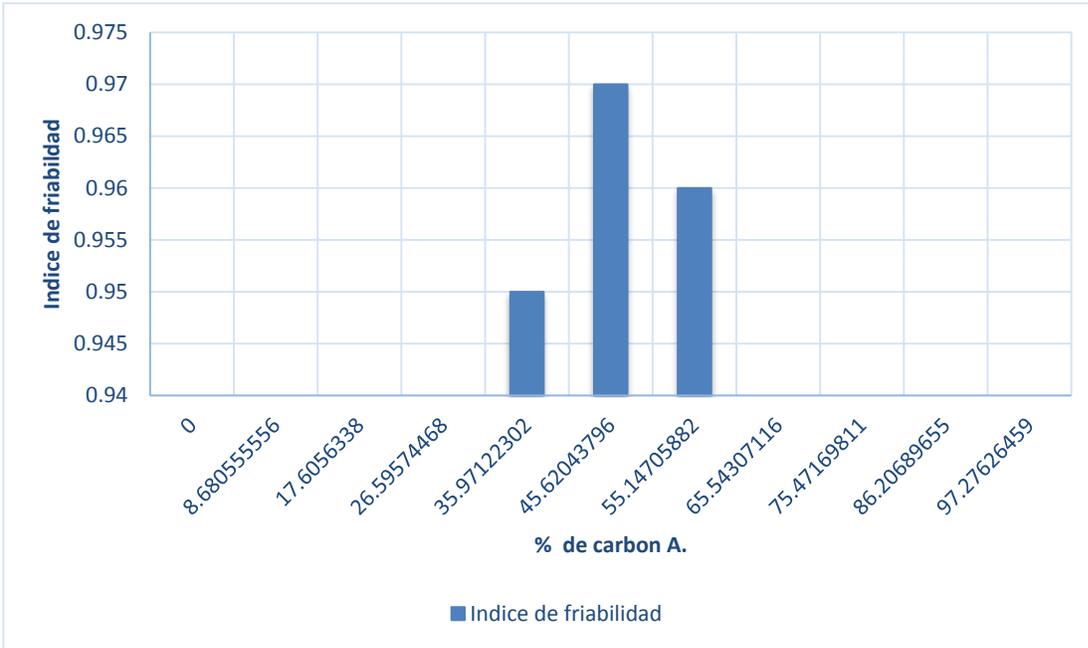
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Índice de friabilidad en función de porcentaje de carbón activado**

Carbón A. (%)	Índice de friabilidad
35,97122302	0,95
45,62043796	0,97
55,14705882	0,96

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Índice de friabilidad en función del porcentaje de carbón activado



Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la tabla XIX se presentó la cantidad másica de cada materia prima que conformó cada una de las once formulaciones de los combustibles sólidos densificados. En la figura 4, de la sección de resultados, se puede observar que la dosificación del aserrín es lineal e inversamente proporcional a la dosificación del carbón activado y le corresponde un valor  $R^2$  de 1. Para la dosificación del agua se tiene una ecuación polinómica con un valor  $R^2$  de 0,9979 y para la dosificación del almidón se tiene una ecuación de cuarto grado un valor de  $R^2$  de 0,998.

Para estas dos últimas se puede observar que tienen un comportamiento decreciente conforme aumenta la cantidad de carbón activado dentro de la formulación, como se puede observar en la tabla XXII, conforme aumenta el porcentaje de carbón activado disminuirán la cantidad de almidón necesaria para la aglomeración del combustibles sólidos densificado. Esto se traduce como un menor consumo de solución de almidón de yuca conforme aumenta la cantidad de carbón activado en la formulación.

Las formulaciones de 25 gramos y las de 40 gramos de carbón activado son las de mayor precisión al presentar un valor de desviación estándar de 0. Mientras que la que obtuvo menor presión fue la de 0 gramos de carbón activado al presentar un valor de desviación estándar de 1,095. Los errores se debieron a la forma de manipulación, al error en el pesaje de los materiales, en el mezclado de las formulaciones y al momento de ser compactadas.

En los recipientes de mezclado y en los moldes de compactación existieron pérdidas de mezcla al ser retiradas y compactadas como se puede observar en las figuras 17 y 18 del apéndice 2. Otra fuente de desviación en los datos fue el control de la dosificación de la solución de almidón, pues al no existir algún parámetro fácilmente reconocible mediante el pesaje o similar, se realizó por una medición cualitativa identificando el máximo nivel de absorción del material sin exceder ese punto de saturación de humedad.

En la tabla XX se presenta el comportamiento de cada material utilizado para cada una de las once formulaciones húmedas. En la tabla XXI se presenta el comportamiento de cada material posterior al proceso de secado de los combustibles sólidos densificados en porcentajes, estableciéndose el porcentaje de carbón activado dentro de cada mezcla como variable experimental se utilizará para correlacionar el estudio de las propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas de los combustibles sólidos densificados. Dichos comportamiento se pueden ver gráficamente en las figuras 5 y 6.

En la tabla XXIII se observó el comportamiento de la humedad en base seca de los combustibles sólidos densificados al ser secados a intemperie, siendo para la primera formulación la humedad máxima en el cual hay ausencia de carbón activado de 3,15 % y decreciendo de manera polinómica, como se puede observar en la figura 8, hasta llegar a un valor de humedad mínima del 0,768 % para la formulación donde hay ausencia de aserrín de pino blanco.

Se tomaron como variables de interferencia no controlables a la temperatura, el tiempo de exposición al sol, la velocidad y el flujo de corriente de aire en el secado debido a esto se analizó únicamente el cambio de peso del combustible sólido densificado en la formulación inicial y al final de un período de tiempo de secado. se tomará como variable de interferencia controlable a la

presión de compactación la cual se ve reflejada en la figura 8, pues los combustibles sólidos densificados al ser compactados de mejor forma retendrán mayor cantidad de humedad. Por lo tanto saltan de la línea de tendencia, esto pasa de igual manera cuando los combustibles sólidos no son compactados de igual manera perdiendo mayor humedad en el proceso de secado, de igual manera ocurre si el combustible sólido sufre fracturas en las cuales con mayor facilidad el agua no ligada y por tanto o el combustibles sólido densificado pierde humedad, este tipo de fracturas se ven en la figura 20 del apéndice 2.

El comportamiento se puede ver de mejor manera en la figura XXX donde se ve claramente un comportamiento descendente conforme aumenta el porcentaje de carbón activado en la formulación con una correlación cuadrática cóncavo hacia abajo y un Valor R de 0,97. Esto indica que a mayor porcentaje de carbón activado en mezcla de combustible sólido densificado tendrán una mayor velocidad de secado y o almacenar a menor humedad.

En la tabla XXV, se realizó el análisis Anova para la interpretación de la hipótesis de trabajo planteada en base de las variables de operación para la humedad con base seca en los combustibles sólidos densificados. Esto como la cual indicó que dicho humedad presentó diferencia significativa al variar la formulación de los materiales incrementando la cantidad de carbón activado. Por lo que se rechaza la primera hipótesis de investigación encontrando una variación significativa para la humedad entre las distintas formulaciones.

En la tabla XXIV, se presenta las densidades para las diferentes formulaciones de los combustibles sólidos densificados. Siendo para la primera formulación en la cual hay ausencia de carbón activado una densidad de  $0,313 \text{ g/cm}^3$  e incrementando de manera polinómica hasta llegar a una densidad de

0,7 g/cm<sup>3</sup> que corresponden a la formulación de 97,28 % de carbón activado el comportamiento.

Se puede ver en la figura 9 donde se muestra una tendencia del tipo cuadrática cóncava hacia abajo y con un valor de R de 0,9968. Este aumento de la densidad se debe al gradiente en disminución del aserrín de pino blanco pues posee una densidad aparente bastante alta a comparación del carbón activado y que no es compactado altas presiones para disminuir su densidad aparente.

Las diferencias de precisión se debieron a la forma de la manipulación y el secado de los combustibles sólidos densificados al perderse materia por arrastre del viento, por la manipulación en sí, y añadido a esto el efecto de los errores en la elaboración de la formulación inicial.

En la tabla XXVII, se realizó el análisis Anova para la interpretación de la hipótesis de trabajo planteada con base en las variables de operación de la varianza de la densidad respecto a la formulación del combustible sólido densificado al aumentar su contenido de carbón activado. Esto la cual indicó que dicha variación presentó diferencia significativa al variar el porcentaje de carbón activado en la formulación de los combustibles sólidos densificados con lo que se rechaza la hipótesis de investigación.

En la tabla XXVIII, se presentó el poder calorífico de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón un activado en la formulación. Siendo la formulación que obtuvo mayor poder calorífico la que contenía 97,28 % de carbón activado con un poder calorífico de 20 835,07 kJ/kg, decreciendo conforme el porcentaje de carbón activado en la formulación, esto debido aquel carbón activado es el material con mayor poder calorífico de los

materiales utilizados para la formulación de los combustibles sólidos densificados así el poder calorífico es proporcional a la cantidad de carbón activado que hay dentro de la formulación, por lo tanto la formulación con 0 % de carbón activado en la formulación posee el menor poder calorífico 16 698,03 kJ/kg, las formulaciones arriba del 17,6 % de carbón activado en la formulación poseen un poder calorífico más altos que el de las leñas tradicionales de pino blanco.

En la figura 10, se observa la correlación para el poder calorífico en función del porcentaje de carbón activado en la formulación dicha correlación es de orden cuadrática semejante a una línea recta y con un valor R de 0,9996. Para dichos resultados se trabajó mediante propiedades parciales para el cálculo del poder calorífico según los porcentajes de cada material dentro de la formulación de los combustibles sólidos densificados el poder calorífico del material puro.

En la tabla XXIX, se realizó el Anova para la interpretación de la hipótesis de trabajo planteada en base de las variables de operación sus de la varianza del poder calorífico respecto a la formulación del combustible sólido densificados al aumentar su contenido de carbón activado, la cual indicó que dicha variación presentó diferencia significativa al variar el porcentaje de carbón activado en la formulación de los combustibles sólidos densificados con lo que se rechaza la hipótesis de investigación.

En la tabla XXXII, se presentó de índice de friabilidad de los combustibles sólidos densificados en función de friabilidad del porcentaje de carbón activado en la formulación. Se realizó una prueba preliminar de friabilidad con cinco cilindros de cada formulación en la cual todas las formulaciones obtuvieron un índice igual a la unidad. De ellas se considera satisfactoria en la prueba de friabilidad, de las cuales se escogido las tres briquetas más convenientes para realizar la prueba de friabilidad con 100 briquetas de cada tipo de formulación.

Se procedió a escoger las tres formulaciones que partiendo de observaciones realizadas en la fabricación de dichas briquetas. Es así como se descartaron las primeras cuatro formulaciones, ya que estas al ser compactadas tendían a crearse pequeñas fisuras, en la figura 9 del apéndice 2.

En el proceso de compactación o en el proceso de secado estas fisuras no afectaban de manera directa a la debilidad, pero se podrían tomar como puntos débiles del combustible sólido densificado. Tampoco fueron tomadas en cuenta las últimas cuatro formulaciones, ya que si bien no se fracturaban golpe, tendían a tener pequeñas pérdidas de material.

Es así que la formulación de 35,97 %, 45,62 % y 55,15 % fueron las seleccionadas para la prueba de friabilidad, en las que se fabricaron cien probetas de cada una y fueron lanzadas de un metro de altura sobre un suelo cerámico el índice fue 95, 97 y 96, respectivamente. Las principales diferencias de precisión, para todas las variables de operación, se debieron a la forma de compactación y la velocidad de secado. La figura 12, también determinó el índice de friabilidad en función del porcentaje de carbón activado en la formulación del combustible sólido densificado.

En la tabla XXXIII, se realizó el Anova para la interpretación de la hipótesis de trabajo planteada con base con las variables de operación del índice de friabilidad para tres formulaciones escogidas, la cual indicó que los índices de friabilidad no presenta diferencia significativa al variar el porcentaje de carbón activado de la formulación de los combustibles sólidos densificados, por lo que es aceptable la hipótesis de investigación.

## CONCLUSIONES

1. El combustible sólido densificado que posee mayor poder calorífico conforme mayor sea el porcentaje de carbón activado dentro de la fórmula. Con una formulación del 17,6 % se obtienen un poder calorífico similar al de la madera de 17,540 kJ/kg.
2. La friabilidad máxima obtenida fue para la formulación que contiene 45.6% de carbón activado teniendo un índice en de 0,97, siguiendo la formulación de 55,14 % con 0,96 y la de 35,97 % con 0,95. Concluyendo que toda las formulaciones presentan una friabilidad aceptable en su formulación.
3. Al aumentar el carbón activado disminuye el porcentaje de cenizas.
4. En el proceso de secado estas no perdieron humedad de igual manera, observando que el aserrín contenía mayor humedad, que el carbón activado, por lo tanto conforme el incremento de carbón activado en la formulación esta posee menor humedad en base seca.
5. Con el aumento de carbón activado en la formulación se ve una mayor densidad de los combustibles sólidos densificados
6. Se observó que la mayor por porcentaje de carbón activado se requiere mayor por porcentaje de almidón como aglutinante.
7. Para las pruebas de humedad, consumo de almidón, densidad, poder calorífico y porcentajes de cenizas hay suficiente evidencia experimental

para concluir que existe diferencia significativa al variar el porcentaje de carbón activado en la formulación.

8. Hay suficiente evidencia experimental para concluir que no existe diferencia significativa entre los índices de friabilidad con la variación del porcentaje del carbón activado.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar un análisis de la influencia que posee el tamaño de las partículas de los materiales en las propiedades físico mecánicas, principalmente en la friabilidad de los combustibles sólidos densificados. Esta influencia también puede ser analizada para los estudios de la velocidad de combustión y la velocidad de secado para cada formulación que se desee.
2. Realizar un estudio comparativo de las propiedades físico mecánicas de los combustibles sólidos densificados variando el porcentaje de humedad de la materia prima. El análisis también es aplicable para la relación almidón-agua de la solución de almidón de yuca cocida.
3. Realizar estudios comparativos de las propiedades fisicomecánicas y del consumo de almidón de yuca para los combustibles sólidos densificados variando la presión de compactación sobre la mezcla.
4. Analizar de qué manera afecta la morfología de los combustibles sólidos densificados en sus propiedades fisicomecánicas, principalmente en la friabilidad, la velocidad de secado, humedad y velocidad de combustión.
5. Realizar los estudios que permitan la creación de las curvas de secado para cada formulación propuesta en este trabajo de graduación.

6. Realizar los estudios que permitan analizar y correlacionar la velocidad de combustión para cada formulación propuesta en este trabajo de graduación.
7. Realizar los estudios propuestos en el trabajos de graduación con otros materiales de reciclaje para su estudio y aprovechamiento.
8. Se recomienda realizar un estudio financiero sobre el costo de fabricación de las diferentes formulaciones de combustibles sólidos densificados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. *Equilibrio ácido-base.* [en línea]. <<https://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/32428/1/beltranhernandez.pdf>> [Consulta: 24 de noviembre de 2014].
2. *Estructuras antociánicas.* [en línea]. <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422008000500051](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422008000500051)> [Consulta: 23 de marzo de 2015].
3. *Extracción sólido-líquido.* [en línea]. <<https://www.google.com.gt/search?q=extracci%C3%B3n+sólido+líquido+diagrama+de+equilibrio+triangulo+rectangulo>> [Consulta: 17 de febrero de 2015].
4. FUENTES MIRANDA, Walter Vinicio. *Extracción, Cuantificación y estabilidad de Colorantes Naturales Presentes en los Frutos de Prunus capuli Cav. (Cereza), Rubus urticaefolius Poir (Mora) y Sambucus canadensis L. (Saúco) como Alternativas Naturales de Consumo de los Colorantes Artificiales Rojo No.40, Rojo No.3 y Rojo No.2, en bebidas en el rango de pH: 3, 4 y 5.* Trabajo de graduación de Lic. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, 2005. 230 p.

5. G. Devore, *Química Orgánica*. Publicaciones Culturales S.A, México, D.1970. 644-646 p.
6. *Generalidades de antocianinas*. [en línea].  
<<http://www.bdigital.unal.edu.co/5351/1/197518.2011.pdf>>  
[Consulta: 24 de marzo de 2015].
7. *Indicadores ácido-base*. [en línea].  
<<http://quimica.laguia2000.com/general/indicadores-acido-base>>  
[Consulta: 18 de agosto de 2015].
8. McCABE, Warren L; SMITH, Julianny; HARRIOT Meter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 4a ed. México: McGraw-Hill. 2000. 1 114 p.
9. *Neutralización de ácidos y bases*. [en línea].  
<<http://www.ehu.eus/biomoleculas/ph/neutra.htm#n2>>. [Consulta: 14 de enero de 2015].
10. *Propiedades físicas del rábano*. [en línea].  
<<http://www.infoagro.com/hortalizas/rabano.htm>>. [Consulta: 10 de octubre de 2014].
11. *Transferencia de materia*. [en línea].  
<<http://fjarabo.webs.ull.es/Practics/Oba/ObaFiles/AMater.pdf>>.  
[Consulta: 17 de marzo de 2015].

12. Briquetas combustibles para uso doméstico. [en línea].  
<http://tienda.icontec.org/brief/NTC2060.pdf> [Consulta: 17 de marzo de 2015].
13. TREYBAL, Robert E. *Operación en transferencia de masa*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 2000. 50-70 p.
14. WALPOLE, Ronad E; et. al .*Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 8a ed. México: Pearson Educación, 2007. 720 p.



## APÉNDICES

### Apéndice 1. Datos calculados

A continuación se presentan los datos cuantitativos y cualitativos obtenidos después de realizar la experimentación:

#### Apéndice 1.A. Humedad de las materias primas previo a la experimentación

Material	Humedad (% p/p)
Aserrín	10.46
Almidón de yuca	10.46
Carbón activado	11.27

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 1.B. Poder calorífico de las materias primas

Material	Poder calorífico (kJ)
Aserrín	17540
Almidón de yuca	15300
Carbón activado	9760

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1.C. **Cantidad de materia extraña o material no deseado  
proveniente de las muestras de materia prima**

<b>Material</b>	<b>Cantidad (kg)</b>	<b>Materia extraña</b>	<b>% Materia Extraña</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación</b>
Aserrín	104.00	1.00	0.96	3.08	2.93
	105.00	6.00	5.71		
	104.00	1.00	0.96		
	105.00	1.00	0.95		
	103.00	7.00	6.80		
Almidón de yuca	100.00	0.00	0.00	0.40	0.55
	100.00	0.00	0.00		
	100.00	1.00	1.00		
	100.00	1.00	1.00		
	100.00	0.00	0.00		
carbón activado	103.00	6.00	5.83	7.63	1.08
	102.00	8.00	7.84		
	100.00	8.00	8.00		
	103.00	9.00	8.74		
	103.00	8.00	7.77		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1.D. **Porcentaje de cenizas para cada materia prima**

<b>Material</b>	<b>% cenizas</b>
Aserrín	0.995
Almidón de yuca	0.941
Carbón activado	0.891

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1.E. **Formulación inicial de los combustibles sólidos densificados**

<b>Aserrín (g)</b>	<b>Carbón A. (g)</b>	<b>Almidón (g)</b>	<b>Almidón (g)</b>	<b>Almidón (g)</b>	<b>Agua (g)</b>	<b>Agua (g)</b>	<b>Agua (g)</b>
50.00	0.00	6.48	6.42	0.09	74.52	73.78	1.01
50.00	0.00	6.32			72.68		
50.00	0.00	6.32			72.68		
50.00	0.00	6.48			74.52		
50.00	0.00	6.48			74.52		
45.00	5.00	5.84	5.89	0.04	67.16	67.71	0.50
45.00	5.00	5.84			67.16		
45.00	5.00	5.92			68.08		
45.00	5.00	5.92			68.08		
45.00	5.00	5.92			68.08		
40.00	10.00	5.44	5.42	0.04	62.56	62.38	0.41
40.00	10.00	5.36			61.64		
40.00	10.00	5.44			62.56		
40.00	10.00	5.44			62.56		
40.00	10.00	5.44			62.56		
35.00	15.00	5.12	5.07	0.04	58.88	58.33	0.50

Continuación del apéndice 1.E.

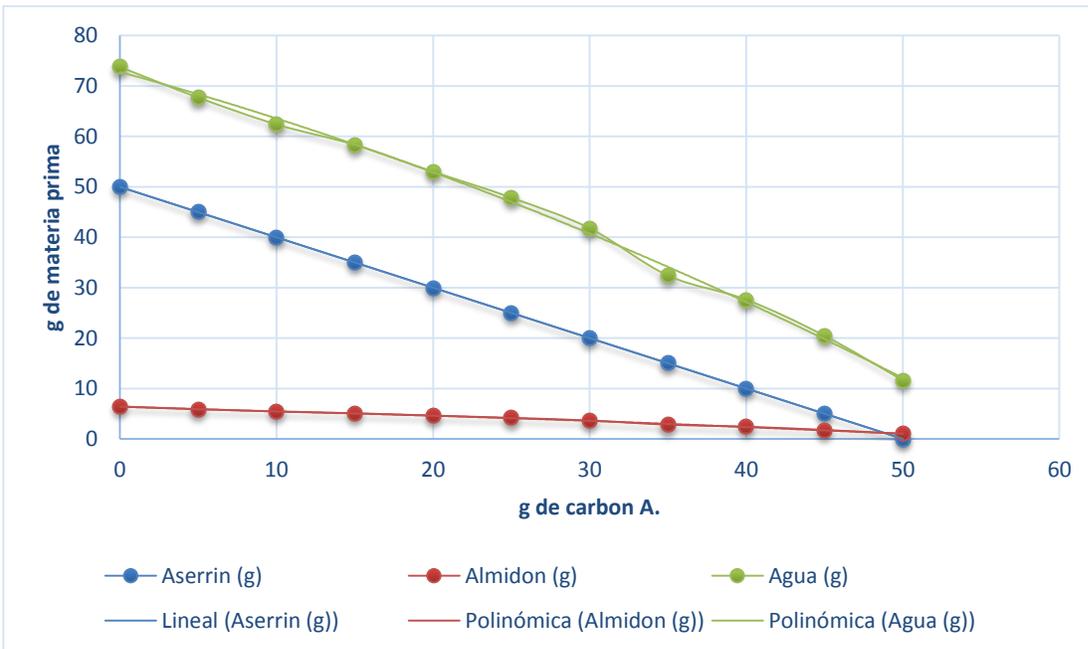
35.00	15.00	5.04			57.96		
35.00	15.00	5.12			58.88		
35.00	15.00	5.04			57.96		
35.00	15.00	5.04			57.96		
30.00	20.00	4.56			52.44		
30.00	20.00	4.56			52.44		
30.00	20.00	4.64	4.61	0.04	53.36	52.99	0.50
30.00	20.00	4.64			53.36		
30.00	20.00	4.64			53.36		
25.00	25.00	4.16			47.84		
25.00	25.00	4.16			47.84		
25.00	25.00	4.16	4.16	0.00	47.84	47.84	0.00
25.00	25.00	4.16			47.84		
25.00	25.00	4.16			47.84		
20.00	30.00	3.60			41.40		
20.00	30.00	3.60			41.40		
20.00	30.00	3.68	3.63	0.04	42.32	41.77	0.50
20.00	30.00	3.68			42.32		
20.00	30.00	3.60			41.40		
15.00	35.00	2.80			32.20		
15.00	35.00	2.88			33.12		
15.00	35.00	2.80	2.82	0.04	32.20	32.38	0.41
15.00	35.00	2.80			32.20		
15.00	35.00	2.80			32.20		

Continuación de la tabla 1.E.

10.00	40.00	2.40	2.40	0.00	27.60	27.60	0.00
10.00	40.00	2.40			27.60		
10.00	40.00	2.40			27.60		
10.00	40.00	2.40			27.60		
10.00	40.00	2.40			27.60		
5.00	45.00	1.84	1.78	0.04	21.16	20.42	0.41
5.00	45.00	1.76			20.24		
5.00	45.00	1.76			20.24		
5.00	45.00	1.76			20.24		
5.00	45.00	1.76			20.24		
0.00	50.00	1.04	1.01	0.04	11.96	11.59	0.50
0.00	50.00	1.04			11.96		
0.00	50.00	0.96			11.04		
0.00	50.00	1.04			11.96		
0.00	50.00	0.96			11.04		

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.A. **Formulación inicial de los combustibles sólidos densificados**



Color	Modelo matemático	Coficiente	Intervalo (g)
	$y = -0.0073x^2 - 0.85x + 72.779$	$R^2 = 0.9979$	0-50
	$y = -x + 50$	$R^2 = 1$	0-50
	$y = 8E-07x^4 - 9E-05x^3 + 0.0024x^2 - 0.1101x + 6.4016$	$R^2 = 0.9985$	0-50

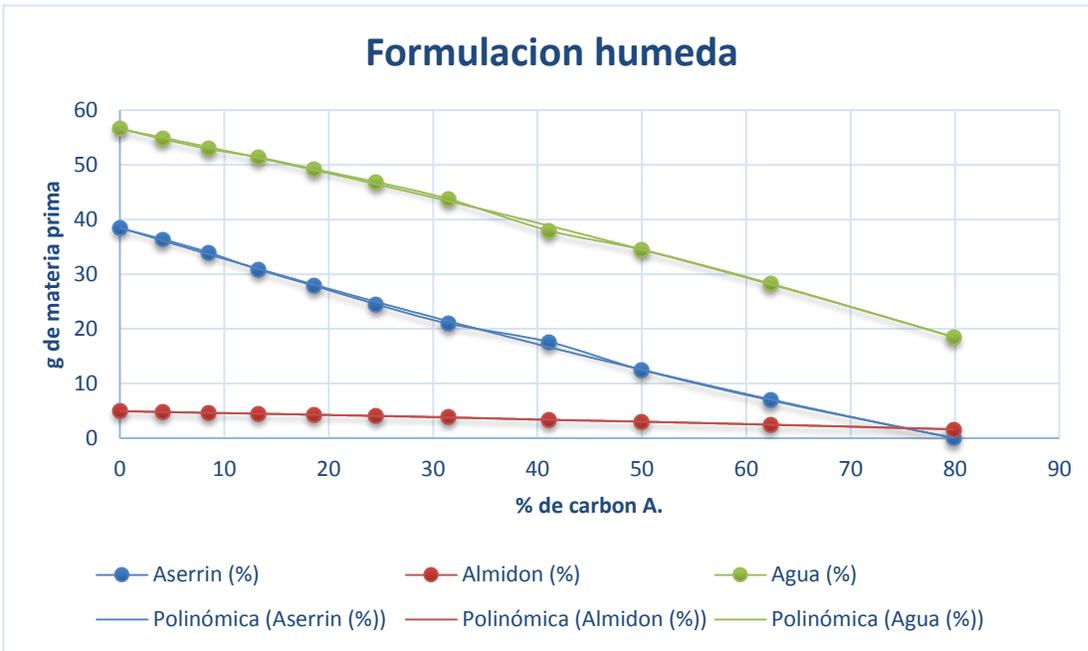
Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.F. **Porcentajes de las materias primas**

<b>No.</b>	<b>Aserrín (%)</b>	<b>Carbón A. (%)</b>	<b>Almidón (%)</b>	<b>Agua (%)</b>
1	38.40245776	0	4.927803379	56.66973886
2	36.40776699	4.045307443	4.763754045	54.78317152
3	33.95585739	8.488964346	4.604414261	52.95076401
4	30.86419753	13.22751323	4.472663139	51.4356261
5	27.88104089	18.58736059	4.282527881	49.24907063
6	24.50980392	24.50980392	4.078431373	46.90196078
7	20.96436059	31.44654088	3.807127883	43.78197065
8	17.6056338	41.07981221	3.305164319	38.00938967
9	12.5	50	3	34.5
10	6.925207756	62.32686981	2.459833795	28.28808864
11	0	79.87220447	1.610223642	18.51757188

Fuente: elaboración propia.

Figura. 1.B. Porcentajes de las materias primas



Color	Modelo matemático	Coficiente	Intervalo (g)
	$y = -0.0012x^2 - 0.382x + 56.572$	$R^2 = 0.9991$	0-80
	$y = 0.0013x^2 - 0.5848x + 38.508$	$R^2 = 0.999$	0-80
	$y = -0.0001x^2 - 0.0332x + 4.9193$	$R^2 = 0.9991$	0-80

Fuente: elaboración propia.

Tabla. 1.G. **Formulación de los combustibles sólidos densificados**

<b>Aserrín (g)</b>	<b>Carbón A. (g)</b>	<b>Almidón (g)</b>	<b>Almidón (g)</b>	<b>Almidón D (g)</b>	<b>Agua (g)</b>	<b>Agua (g)</b>	<b>Agua (g)</b>
50.00	0.00	6.48	6.42	0.09	2.52	1.98	0.81
50.00	0.00	6.32			1.68		
50.00	0.00	6.32			0.68		
50.00	0.00	6.48			2.52		
50.00	0.00	6.48			2.52		
45.00	5.00	5.84	5.89	0.04	1.16	1.71	0.50
45.00	5.00	5.84			1.16		
45.00	5.00	5.92			2.08		
45.00	5.00	5.92			2.08		
45.00	5.00	5.92			2.08		
40.00	10.00	5.44	5.42	0.04	1.56	1.38	0.41
40.00	10.00	5.36			0.64		
40.00	10.00	5.44			1.56		
40.00	10.00	5.44			1.56		
40.00	10.00	5.44			1.56		
35.00	15.00	5.12	5.07	0.04	1.88	1.33	0.50
35.00	15.00	5.04			0.96		
35.00	15.00	5.12			1.88		
35.00	15.00	5.04			0.96		
35.00	15.00	5.04			0.96		

Continuación tabla 1.G.

30.00	20.00	4.56	4.61	0.04	0.44	0.99	0.50
30.00	20.00	4.56			0.44		
30.00	20.00	4.64			1.36		
30.00	20.00	4.64			1.36		
30.00	20.00	4.64			1.36		
25.00	25.00	4.16	4.16	0.00	0.84	0.64	0.45
25.00	25.00	4.16			0.84		
25.00	25.00	4.16			0.84		
25.00	25.00	4.16			0.84		
25.00	25.00	4.16			0.16		
20.00	30.00	3.60	3.63	0.04	0.40	0.77	0.50
20.00	30.00	3.60			0.40		
20.00	30.00	3.68			1.32		
20.00	30.00	3.68			1.32		
20.00	30.00	3.60			0.40		
15.00	35.00	2.80	2.82	0.04	0.20	0.58	0.53
15.00	35.00	2.88			1.12		
15.00	35.00	2.80			0.20		
15.00	35.00	2.80			0.20		
15.00	35.00	2.80			1.20		
10.00	40.00	2.40	2.40	0.00	0.60	0.60	0.00
10.00	40.00	2.40			0.60		
10.00	40.00	2.40			0.60		
10.00	40.00	2.40			0.60		
10.00	40.00	2.40			0.60		

Continuación tabla 1.G.

5.00	45.00	1.84	1.78	0.04	1.16	0.42	0.41
5.00	45.00	1.76			0.24		
5.00	45.00	1.76			0.24		
5.00	45.00	1.76			0.24		
5.00	45.00	1.76			0.24		
0.00	50.00	1.04	1.01	0.04	0.04	0.39	0.56
0.00	50.00	1.04			0.04		
0.00	50.00	0.96			1.04		
0.00	50.00	1.04			0.96		
0.00	50.00	0.96			0.04		

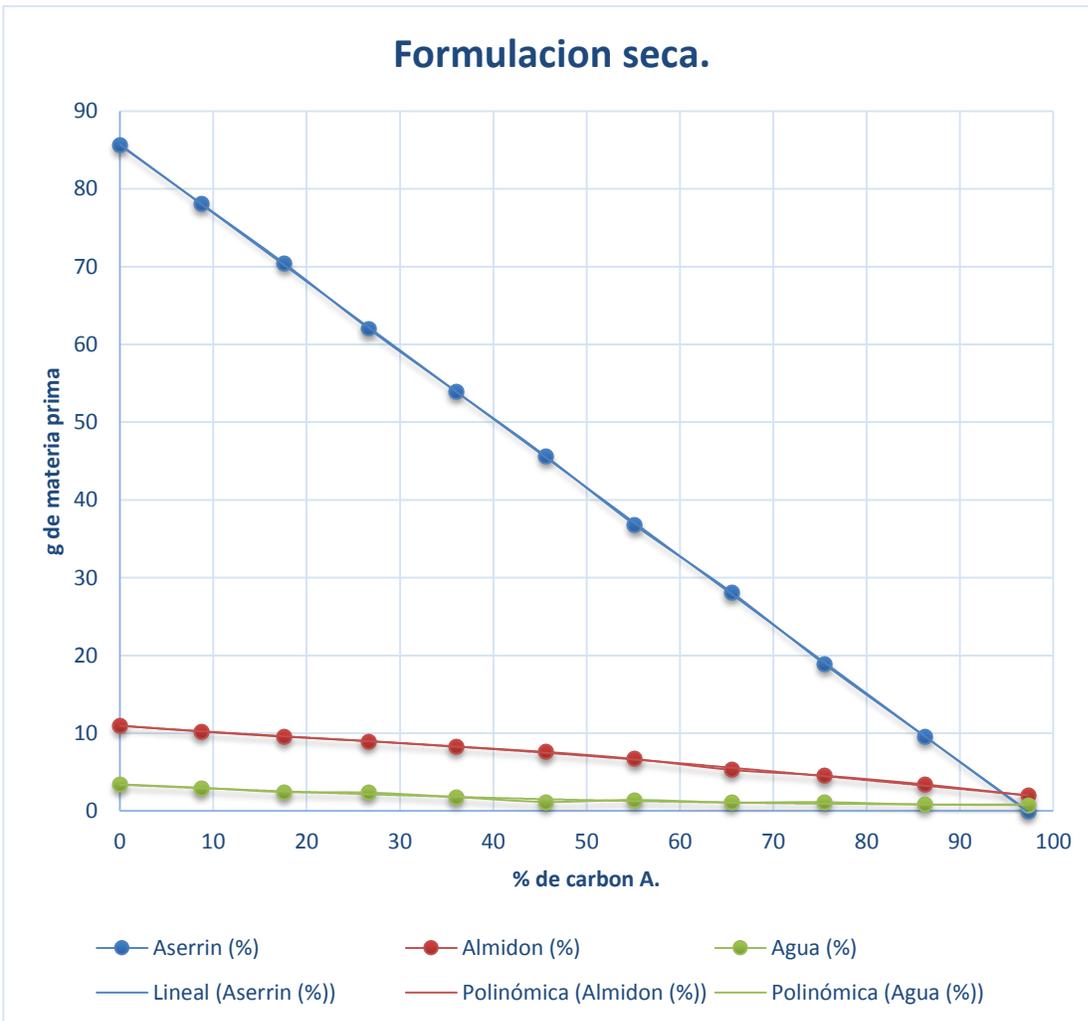
Fuente: elaboración propia.

Tabla. 1.H. **Formulación de los combustibles sólidos densificados después de un proceso de secado**

núm.	Aserrín (%)	Carbón A. (%)	Almidón (%)	Agua (%)
1	85.61643836	0	10.98630137	3.397260274
2	78.125	8.680555556	10.22222222	2.972222222
3	70.42253521	17.6056338	9.549295775	2.422535211
4	62.05673759	26.59574468	8.992907801	2.354609929
5	53.95683453	35.97122302	8.287769784	1.784172662
6	45.62043796	45.62043796	7.591240876	1.167883212
7	36.76470588	55.14705882	6.676470588	1.411764706
8	28.08988764	65.54307116	5.27340824	1.093632959
9	18.86792453	75.47169811	4.528301887	1.132075472
10	9.578544061	86.20689655	3.402298851	0.812260536
11	0	97.27626459	1.961089494	0.762645914

Fuente: elaboración propia.

Figura. 1.A. **Formulación de los combustibles sólidos densificados**



Color	Modelo matemático	Coficiente	Intervalo (%)
	$y = -0.0012x^2 - 0.382x + 56.572$	$R^2 = 1$	0-100
	$y = 0.0013x^2 - 0.5848x + 38.508$	$R^2 = 0.9984$	0-100
	$y = -0.0001x^2 - 0.0332x + 4.9193$	$R^2 = 0.9707$	0-100

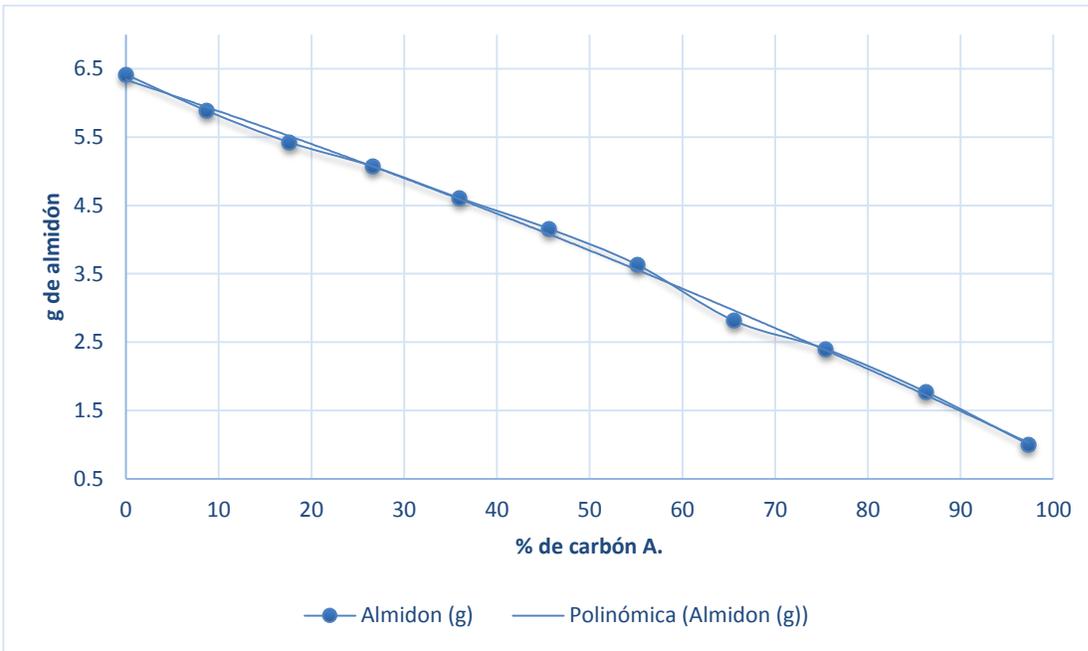
Fuente: elaboración propia.

Tabla. 1.I. **Consumo de almidón de las formulaciones en función del carbón activado**

<b>Carbón A. (%)</b>	<b>Almidón (g)</b>
0	6.416
8.680555556	5.888
17.6056338	5.424
26.59574468	5.072
35.97122302	4.608
45.62043796	4.16
55.14705882	3.632
65.54307116	2.816
75.47169811	2.4
86.20689655	1.776
97.27626459	1.008

Fuente: elaboración propia.

Figura. 1.C. Consumo de almidón por las formulaciones



Color	Modelo matemático	Coefficiente	Intervalo (%)
	$y = -1E-04x^2 - 0.0451x + 6.3399$	$R^2 = 0.9982$	0-100

Fuente: elaboración propia.

Tabla. 1.J. **ANOVA para la interpretación de la hipótesis planteada en base de las variables de operación del consumo de almidón para cada formulación de los combustibles sólidos densificados**

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Carbón A. (%)	11	514.118584	46.7380531	1036.62657
gramos de almidón	11	43.2	3.92727273	3.09111622

ANÁLISIS DE VARIANZA

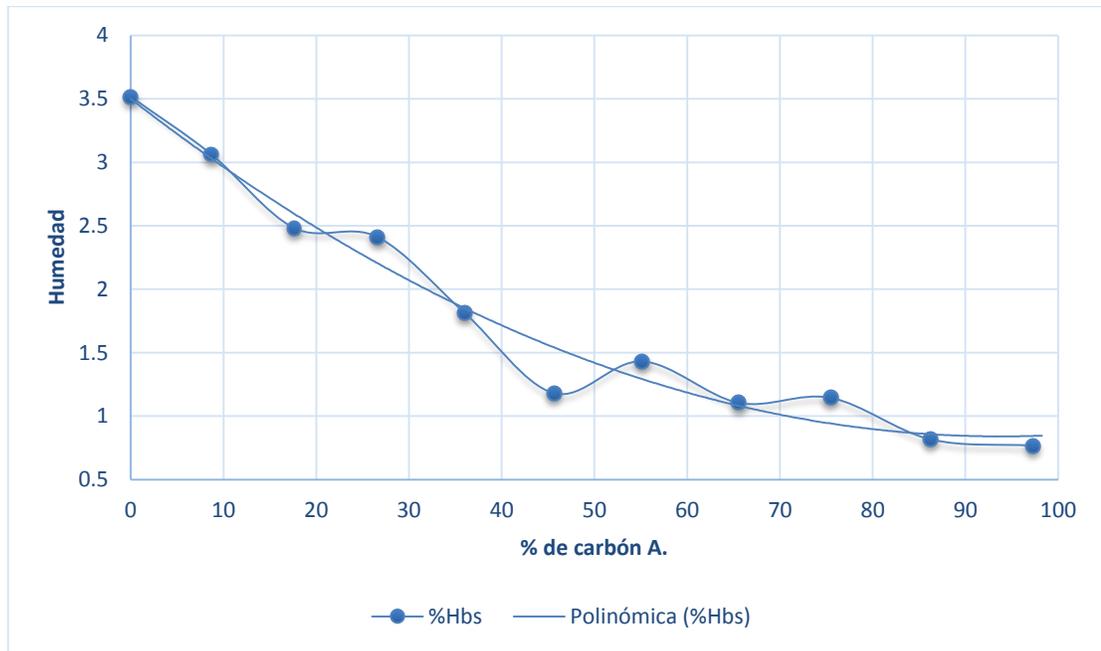
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	10080.196	1	10080.196	19.3902559	0.00027401	4.3512435
Dentro de los grupos	10397.1769	20	519.858844			
Total	20477.3729	21				

Tabla. 1.K. **Porcentaje de humedad en base seca de los combustibles sólidos densificados**

<b>Carbón A. (%)</b>	<b>%Hbs</b>
0	3.516732842
8.680555556	3.063269396
17.6056338	2.482678984
26.59574468	2.411388727
35.97122302	1.816583651
45.62043796	1.1816839
55.14705882	1.431980907
65.54307116	1.105725538
75.47169811	1.145038168
86.20689655	0.818912237
97.27626459	0.768506901

Fuente: elaboración propia.

Figura.1.D. **porcentaje de humedad de los combustibles sólidos densificados en función del carbón activado**



Color	Modelo matemático	Coeficiente	Intervalo (%)
	$y = 0.0003x^2 - 0.0567x + 3.5$	$R^2 = 0.971$	0-100

Fuente: elaboración propia.

Tabla. 1.L **Anova para la interpretación de la hipótesis planteada en base de las variables de operación del porcentaje de humedad del combustibles sólidos densificados**

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Carbón A. (%)	11	514.118584	46.7380531	1036.62657
He	11	19.7425013	1.79477284	0.88380985

ANÁLISIS  
DE  
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	11109.4414	1	11109.4414	21.4155764	0.00016254	4.3512435
Dentro de los grupos	10375.1038	20	518.755191			
Total	21484.5453	21				

Fuente: elaboración propia.

Tabla. 1.M. **Densidad de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón activado**

<b>Aserrín (g)</b>	<b>Carbón A. (g)</b>	<b>Almidón (g)</b>	<b>Agua (g)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
50.00	0.00	6.48	2.52	7.20	7.20	0.01	0.31
50.00	0.00	6.32	1.68	7.19			
50.00	0.00	6.32	0.68	7.22			
50.00	0.00	6.48	2.52	7.20			
50.00	0.00	6.48	2.52	7.21			
45.00	5.00	5.84	1.16	6.70	6.75	0.03	0.33
45.00	5.00	5.84	1.16	6.73			
45.00	5.00	5.92	2.08	6.76			
45.00	5.00	5.92	2.08	6.77			
45.00	5.00	5.92	2.08	6.77			
40.00	10.00	5.44	1.56	6.13	6.13	0.02	0.36
40.00	10.00	5.36	0.64	6.13			
40.00	10.00	5.44	1.56	6.15			
40.00	10.00	5.44	1.56	6.10			
40.00	10.00	5.44	1.56	6.13			
35.00	15.00	5.12	1.88	6.00	5.90	0.14	0.37
35.00	15.00	5.04	0.96	6.00			
35.00	15.00	5.12	1.88	5.80			
35.00	15.00	5.04	0.96	5.70			
35.00	15.00	5.04	0.96	6.00			

Continuación 1.M.

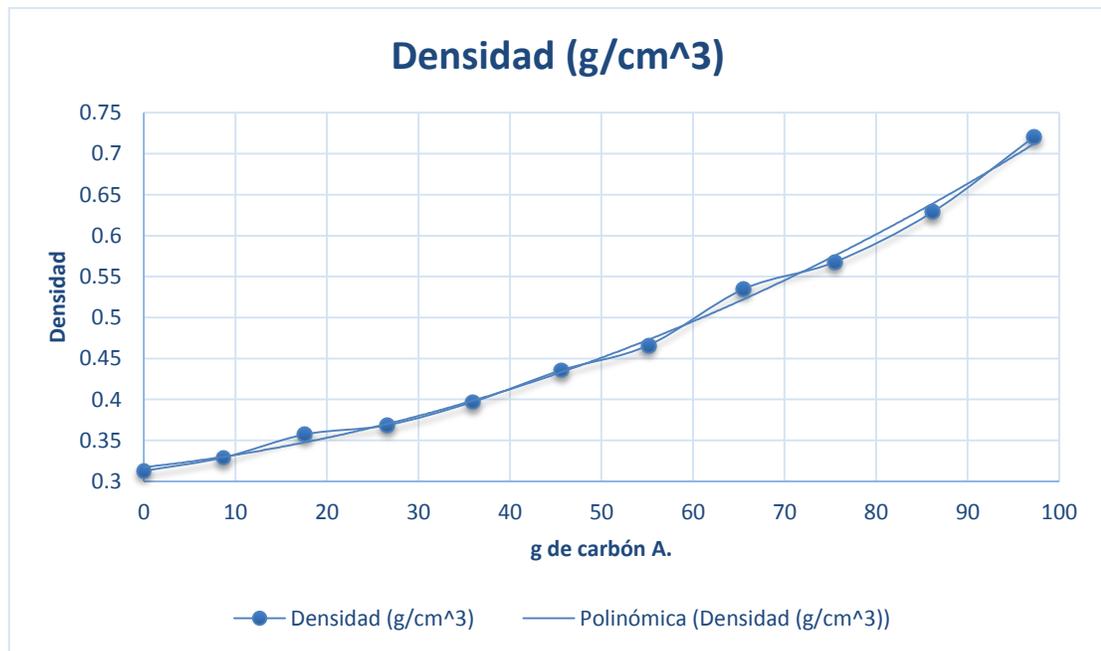
30.00	20.00	4.56	0.44	5.40	5.40	0.02	0.40
30.00	20.00	4.56	0.44	5.39			
30.00	20.00	4.64	1.36	5.38			
30.00	20.00	4.64	1.36	5.39			
30.00	20.00	4.64	1.36	5.44			
25.00	25.00	4.16	0.84	4.84	4.85	0.01	0.44
25.00	25.00	4.16	0.84	4.84			
25.00	25.00	4.16	0.84	4.85			
25.00	25.00	4.16	0.84	4.85			
25.00	25.00	4.16	0.16	4.85			
20.00	30.00	3.60	0.40	4.51	4.50	0.02	0.47
20.00	30.00	3.60	0.40	4.51			
20.00	30.00	3.68	1.32	4.52			
20.00	30.00	3.68	1.32	4.48			
20.00	30.00	3.60	0.40	4.50			
15.00	35.00	2.80	0.20	3.84	3.85	0.02	0.53
15.00	35.00	2.88	1.12	3.84			
15.00	35.00	2.80	0.20	3.88			
15.00	35.00	2.80	0.20	3.86			
15.00	35.00	2.80	1.20	3.85			
10.00	40.00	2.40	0.60	3.60	3.60	0.01	0.57
10.00	40.00	2.40	0.60	3.59			
10.00	40.00	2.40	0.60	3.62			
10.00	40.00	2.40	0.60	3.61			
10.00	40.00	2.40	0.60	3.59			

Continuación 1.M.

5.00	45.00	1.84	1.16	3.19	3.20	0.01	0.63
5.00	45.00	1.76	0.24	3.21			
5.00	45.00	1.76	0.24	3.18			
5.00	45.00	1.76	0.24	3.21			
5.00	45.00	1.76	0.24	3.20			
0.00	50.00	1.04	0.04	2.73	2.75	0.01	0.72
0.00	50.00	1.04	0.04	2.74			
0.00	50.00	0.96	1.04	2.75			
0.00	50.00	1.04	0.96	2.76			
0.00	50.00	0.96	0.04	2.75			

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.E. **Densidad de los combustibles sólidos densificados**



Color	Modelo matemático	Coeficiente	Intervalo (%)
	$y = 3E-05x^2 + 0.0012x + 0.3173$	$R^2 = 0.9968$	0-100

Anova para la interpretación de la hipótesis planteada en base de las variables de operación.

#### RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Carbón A. (%)	11	514.118584	46.7380531	1036.62657
DENSIDAD	11	5.11931738	0.46539249	0.01757795

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	11776.3752	1	11776.3752	22.7201883	0.00011778	4.3512435
Dentro de los grupos	10366.4415	20	518.322075			
Total	22142.8167	21				

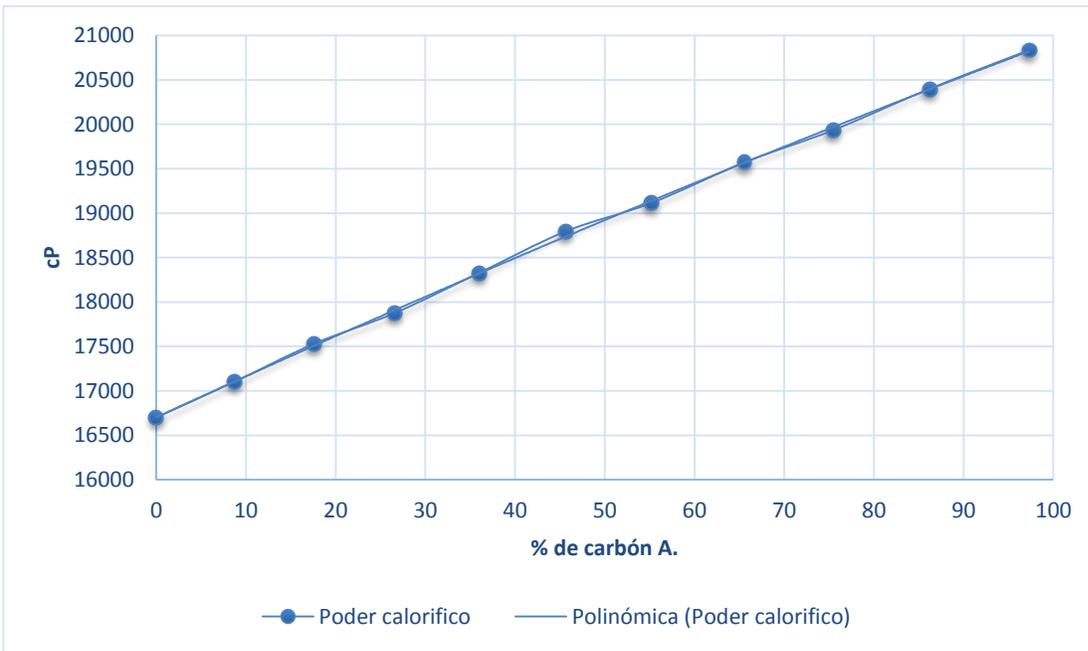
Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.N. **Poder calorífico de los combustibles sólidos densificados en función del porcentaje de carbón activado**

<b>Carbón A. (%)</b>	<b>Poder calorífico</b>
0	16698.0274
8.680555556	17099.59028
17.6056338	17529.70423
26.59574468	17875.02837
35.97122302	18325.58273
45.62043796	18793.75912
55.14705882	19111.57353
65.54307116	19569.94007
75.47169811	19934.33962
86.20689655	20398.90421
97.27626459	20835.06615

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.F. Poder calorífico de los combustibles sólidos densificados



Color	Modelo matemático	Coefficiente	Intervalo (%)
	$y = -0.043x^2 + 46.526x + 16703$	$R^2 = 0.9996$	0-100

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.Ñ. **Análisis de varianza Anova para la interpretación de la hipótesis planteada**

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Carbón A. (%)	11	514.118584	46.7380531	1036.62657
Poder calorífico	11	206171.516	18742.8651	1864270.93

ANÁLISIS  
DE  
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1922498409	1	1922498409	2061.32056	1.188E-21	4.3512435
Dentro de los grupos	18653075.5	20	932653.777			
Total	1941151484	21				

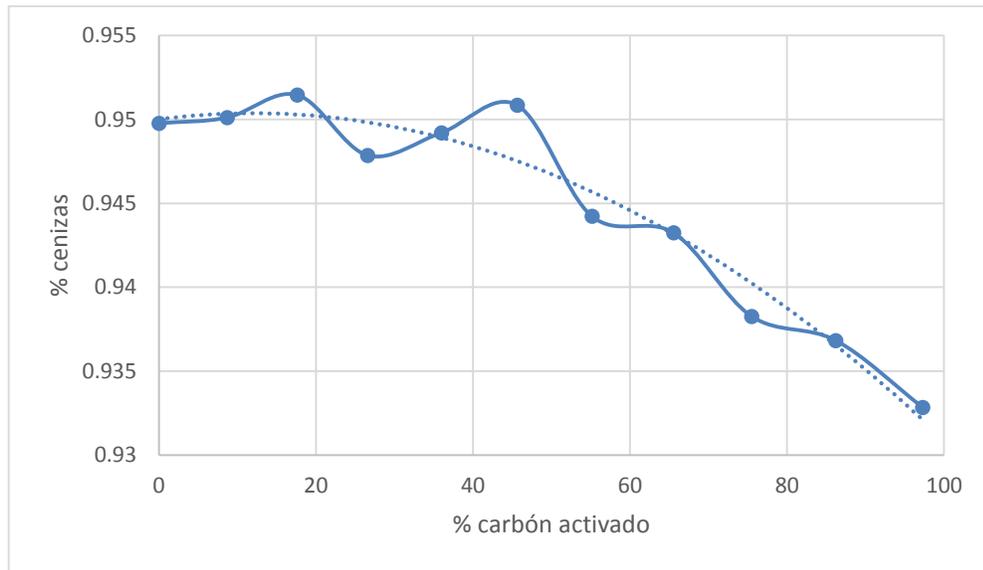
Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.O. **Porcentaje de cenizas de los combustibles sólidos densificados**

<b>Carbón A. (%)</b>	<b>% cenizas</b>
0	0.949771507
8.680555556	0.950107778
17.6056338	0.951457465
26.59574468	0.947857305
35.97122302	0.949203741
45.62043796	0.950849635
55.14705882	0.94423
65.54307116	0.943240749
75.47169811	0.938271698
86.20689655	0.936827893
97.27626459	0.932842957

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.G. **Porcentaje de cenizas de los combustibles sólidos densificados**



Color	Modelo matemático	Coefficiente	Intervalo (%)
	$y = -3E-06x^2 + 6E-05x + 0.95$	$R^2 = 0.9441$	0-100

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.P. **ANOVA para la interpretación de la hipótesis planteada**

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Carbón A. (%)	11	514.118584	46.7380531	1036.62657
Ceniza (%)	11	283.043907	25.7312643	7.88638846

ANÁLISIS  
DE  
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2427.06847	1	2427.06847	4.64727306	0.04346138	4.3512435
Dentro de los grupos	10445.1296	20	522.25648			
Total	12872.1981	21				

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.Q. Índice de friabilidad en función del porcentaje de carbón activado

núm	35.97	45.62	55.14
1	1	1	0
2	1	1	1
3	1	1	1
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1	1	1
7	1	1	1
8	1	1	1
9	1	1	1
10	0	1	1
11	1	1	1
12	1	1	1
13	1	1	1
14	1	1	1
15	1	1	1
16	1	1	1
17	1	1	1
18	1	1	1
19	1	1	1
20	1	1	1
21	1	1	1
22	1	1	1
23	1	1	1
24	1	1	1
25	1	1	1
26	1	1	1
27	1	1	1
28	1	1	1
29	1	1	1
30	1	1	1
31	1	1	1
32	1	0	1
33	1	1	1
34	1	1	1



Continuación Tabla 1.Q.

35	1	1	1
36	1	1	0
37	1	1	1
38	1	1	1
39	1	1	1
40	1	1	1
41	0	1	1
42	1	1	1
43	1	1	1
44	1	1	1
45	1	1	0
46	1	1	1
47	1	0	1
48	1	1	1
49	1	1	1
50	1	1	1
51	0	1	1
52	1	1	1
53	1	1	1
54	1	1	1
55	1	1	1
56	1	1	1
57	1	1	0
58	1	1	1
59	1	1	1
60	1	1	1
61	1	1	1
62	1	1	1
63	1	1	1
64	1	1	1
65	1	1	1
66	1	1	1
67	1	1	1
68	0	0	1
69	1	1	1
70	1	1	1

Continuación Tabla 1.Q.

71	1	1	1
72	1	1	1
73	1	1	1
74	1	1	1
75	1	1	1
76	1	1	1
77	1	1	1
78	1	1	1
79	1	1	1
80	1	1	1
81	1	1	1
82	1	1	1
83	1	1	1
84	1	1	1
85	0	1	1
86	1	1	1
87	1	1	1
88	1	1	1
89	1	1	1
90	1	1	1
91	1	1	1
92	1	1	1
93	1	1	1
94	1	1	1
95	1	1	1
96	1	1	1
97	1	1	1
98	1	1	1
99	1	1	1
100	1	1	1
Suma	95	97	96
Índice f.	0.95	0.97	0.96

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.H. Índice de friabilidad en función de porcentaje de carbón activado



Tabla 1.R. Anova para la interpretación de la hipótesis planteada

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.6224	1	1.6224	3.24447555	0.14602707	7.70864742
Dentro de los grupos	2.0002	4	0.50005			
Total	3.6226	5				

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Imágenes de la parte experimental

### Materias primas



Imagen 1: 25g de Carbon Activado.

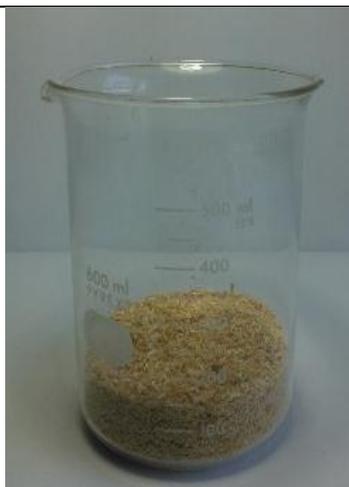


Imagen 2.: 25g de Aserrin de Pino Blanco.



Imagen 3: 8g de Almidon de Yuca.

### Materia extraña



Imagen 4: materia extraña del Aserrin de Pino Blanco

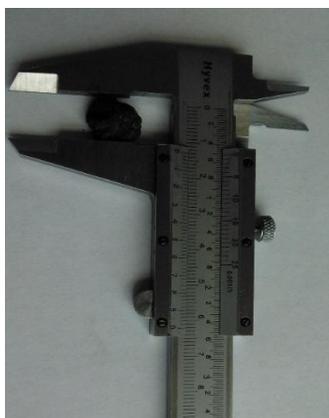


Imagen 5: Materia extraña del Carbon Activado



Imagen 6: Materia extraña del almidon de Yuca

### Materias primas para la Solución de almidón de yuca

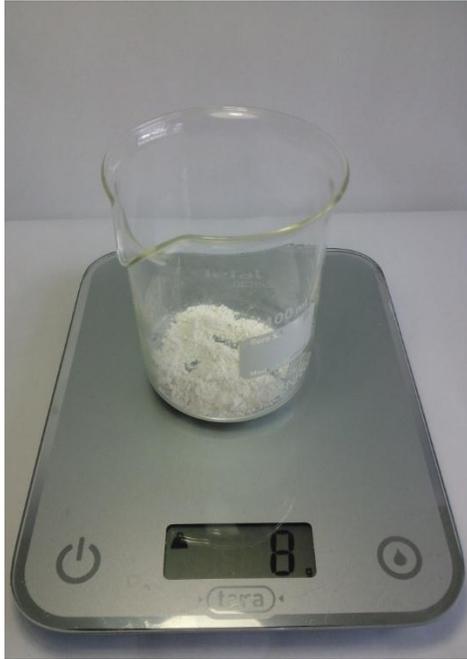


Imagen 7: Almidon de Yuca



Imagen 8: 95g de Agua

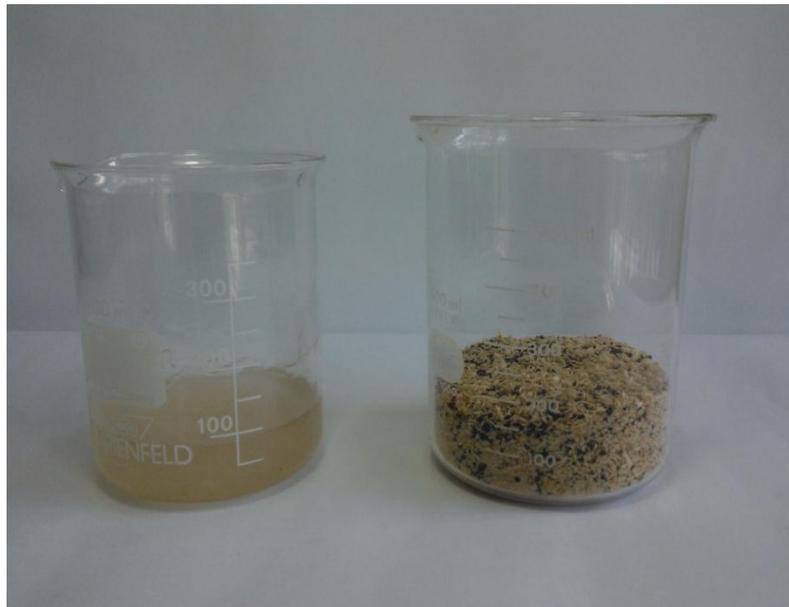


Imagen 9: Solución de almidón de yuca cocido y mezcla de aserrín-carbón activado



Imagen 10: mezcla de almidon de yuca, aserrin y cabon activado en el punto adecuado para poder apelmazar



Imagen 11: utensilios para moldear y apelmazar el material

### Compactación del material

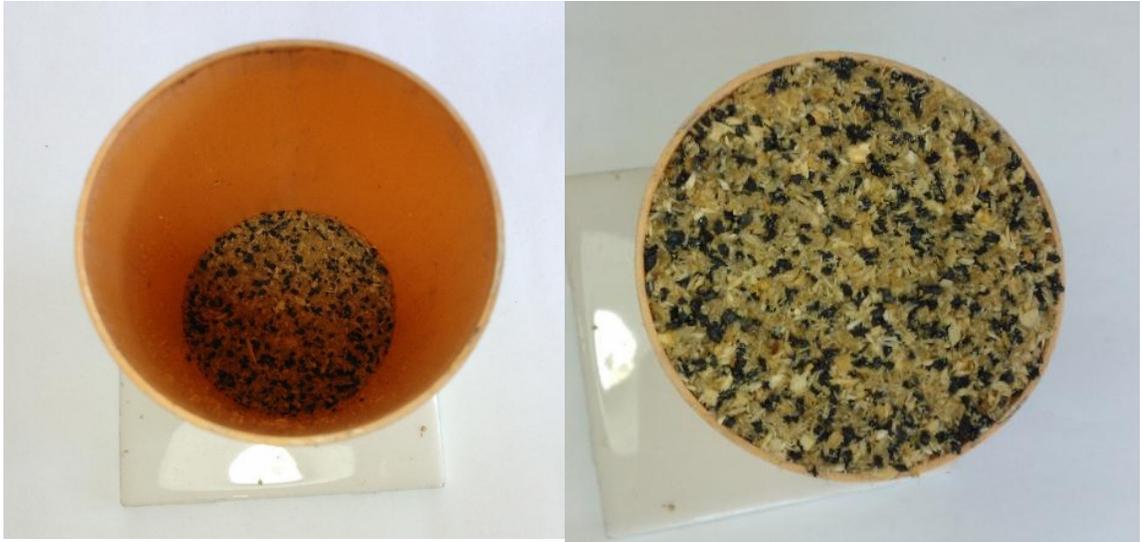


Imagen 12: parte superior

Imagen 13: parte inferior

### Desmolde de combustibles sólidos densificado



Imagen 14: la forma en la que queda el material compactado

### Peso del combustible sólido densificado

Previo al secado



Imagen 15: el peso que se obtiene al Desmoldarlo

Posterior al secado



Imagen 16: peso que se obtien En el proseso de secado

### Pérdidas del material adheridas al cristal, molde y mázco



Imagen 17: perdidas de material a la hora de la mezcla



Imagen 18. Perdida de material en el mazo a la hora de apelmazar



Imagen:19: Fracturas por secado



Imagen 20: Fracturas por pruebas de friabilidad



## **ANEXOS**



**RESULTADOS DE ANALISIS**

MUESTRA: **Almidón de Yuca**  
 PRESENTADA POR: Juan Jacobo Ordóñez  
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Juan Jacobo Ordóñez  
 PROCEDENCIA: Juan Jacobo Ordóñez  
 LOCALIZACION: Juan Jacobo Ordóñez  
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida  
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 18-05-15  
 FECHA DE ANALISIS: del 25 al 29-05-15  
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 20.00  
 ANALISTA: Jhonatan Ríos

DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)
PODER CALORIFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	-----	(c) 15.30
HUMEDAD, % volumen	Gravimétrico	-----	10.46

**OBSERVACIONES:**

- a) En el Acuerdo Ministerial No. 399-2012 no existen especificaciones para este producto.
- b) El resultado es válido solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio.
- c) El valor de 15.30 MJ/Kg es equivalente a 3653 Kcal/Kg y a 6576 Btu/Lb.



*[Signature]*  
 Ing. Julio Villalpinda  
 AREA DE HIDROCARBUROS

*[Signature]*  
 Vo. Bo. Inga Mayra Villatoro  
 COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS



sf

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico

**RESULTADOS DE ANALISIS**

MUESTRA: **Aserrín**  
PRESENTADA POR: Juan Jacobo Ordóñez  
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Juan Jacobo Ordóñez  
PROCEDENCIA: Juan Jacobo Ordóñez  
LOCALIZACION: Juan Jacobo Ordóñez  
FECHA DE MUESTREO: Desconocida  
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 18-05-15  
FECHA DE ANALISIS: del 25 al 29-05-15  
PRECIO DE ANALISIS: \$ 20.00  
ANALISTA: Jhonatan Ríos

DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)
PODER CALORIFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	-----	(c) 17.54
HUMEDAD, % volumen	Gravimétrico	-----	10.46

**OBSERVACIONES:**

- a) En el Acuerdo Ministerial No. 399-2012 no existen especificaciones para este producto.
- b) El resultado es válido solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio.
- c) El valor de 17.54 MJ/Kg es equivalente a 4189 Kcal/Kg y a 7539 Btu/Lb.



*[Signature]*  
Ing. Julio Villatoro  
ÁREA DE HIDROCARBUROS



*[Signature]*  
Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro  
COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS

sf

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico



**RESULTADOS DE ANALISIS**

MUESTRA: **Carbón Activado**  
 PRESENTADA POR: Omar Ordóñez  
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Omar Ordóñez  
 PROCEDENCIA: Desconocida  
 LOCALIZACION: Zona 8 de Mixco  
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida  
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 28-08-15  
 FECHA DE ANALISIS: 01-09-15  
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 19.00  
 ANALISTA: Roderico Zapeta

DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)
PODER CALORIFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	-----	(c) 21.11
HUMEDAD, % masa	Gravimétrico	-----	13.00

**OBSERVACIONES:**

- a) En el Acuerdo Ministerial No. 399-2012 no existen especificaciones para este producto.
- b) Los resultados son válidos solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio.
- c) El valor de 21.11 MJ/Kg es equivalente a 5043 Kcal/Kg y a 9077 Btu/Lb.



*[Signature]*  
 Ing. Julio Villacienda  
 AREA DE HIDROCARBUROS



*[Signature]*  
 Vo. Bo. Inge. María Villatoro  
 COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS

sf

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico  
 Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, www.mem.gob.gt