



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

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE  
BRIQUETAS ELABORADAS CON ASERRÍN, DESECHOS SÓLIDOS, VACASA Y  
TETRABRIK, UTILIZANDO ALMIDÓN Y CAL COMO AGLUTINANTES**

**Ana Lucía Martínez Maldonado**

Asesorado por el MSc. Ing. Jaime Domingo Carranza González

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE  
BRIQUETAS ELABORADAS CON ASERRÍN, DESECHOS SÓLIDOS, VACASA Y  
TETRABRIK, UTILIZANDO ALMIDÓN Y CAL COMO AGLUTINANTES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ANA LUCÍA MARTÍNEZ MALDONADO**

ASESORADO POR EL MSC. ING. JAIME DOMINGO CARRANZA GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE 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. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **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:

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE  
BRIQUETAS ELABORADAS CON ASERRÍN, DESECHOS SÓLIDOS, VACASA Y  
TETRABRIK, UTILIZANDO ALMIDÓN Y CAL COMO AGLUTINANTES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de enero de 2013.



**Ana Lucía Martínez Maldonado**

Guatemala julio de 2015

Ingeniero

Victor Manuel Monzón Valdez

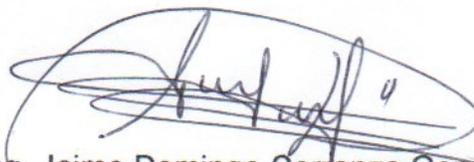
Director Escuela de Ingeniería Química

Universidad De San Carlos De Guatemala

Por este medio hago constar que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación de la estudiante Ana Lucía Martínez Maldonado con carné 200914927, el cual se titula: **DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE BRIQUETAS ELABORADAS CON ASERRÍN, DESECHOS SÓLIDOS, VACASA Y TETRABRIK, UTILIZANDO ALMIDÓN Y CAL COMO AGLUTINANTES**

En base a lo anterior, lo someto a su consideración a efecto de continuar con el trámite respectivo para continuar con su aprobación.

Atentamente,



Ing. Jaime Domingo Carranza González

ASESOR

Ing. Quím. Sanitarista Jaime Carranza  
Especialista Manejo de Desechos Sólidos  
No. Colegiado 440



Guatemala, 25 de agosto de 2015.  
Ref. EIQ.TG-IF.058.2015.

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 **097-2012** 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 la estudiante universitaria: **Ana Lucía Martínez Maldonado**.  
Identificada con número de carné: **2009-14927**.  
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

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:

### DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE BRIQUETAS ELABORADAS CON ASERRÍN, DESECHOS SÓLIDOS, VACASA Y TETRABRIK, UTILIZANDO ALMIDÓN Y CAL COMO AGLUTINANTES

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **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 Mario Estrada Asturias  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.132.2015

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 de la estudiante, **ANA LUCÍA MARTÍNEZ MALDONADO** titulado: "**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE BRIQUETAS ELABORADAS CON ASERRÍN, DESECHOS SÓLIDOS, VACASA Y TETRABRIK, UTILIZANDO ALMIDÓN Y CAL COMO AGLUTINANTES**". 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. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, septiembre 2015

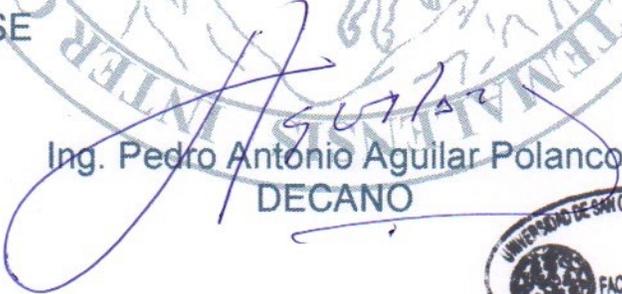
Cc: Archivo  
VMMV/ale





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: **DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE BRIQUETAS ELABORADAS CON ASERRÍN, DESECHOS SÓLIDOS, VACASA Y TETRABRIK, UTILIZANDO ALMIDÓN Y CAL COMO AGLUTINANTES**, presentado por la estudiante universitaria: **Ana Lucía Martínez Maldonado**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
DECANO



Guatemala, septiembre de 2015

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por la vida y las oportunidades, por nunca dejarme sola, por darme las fuerzas y la sabiduría para alcanzar mis metas.
- Mis padres** Miriam Maldonado y Jorge Martínez, por su ejemplo, enseñanzas, amor, apoyo incondicional y por hacerme una mujer soñadora.
- Mis hermanos** Camilo, Luis Alejandro y Siggrid Martínez Maldonado, por su apoyo incondicional, ejemplo, amor y motivación.
- Mi abuela** Yolanda Batres, por ser un ejemplo de lucha, superación y por su apoyo.
- Imelda Batres** Por sus enseñanzas, por ser una inspiración en mi vida y por su apoyo en todo momento.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme la oportunidad de formarme como profesional.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por enseñarme a esforzarme para ser una persona exitosa.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Por su apoyo a lo largo de la carrera, por su amistad, por las risas y por no darme la espalda.
<b>Laboratorio de Gestión de la Calidad</b>	Por darme la oportunidad de realizar mi investigación y brindarme las herramientas necesarias.
<b>Ing. Jaime Carranza</b>	Por su asesoría durante la investigación y su apoyo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XI
OBJETIVOS .....	XIII
Hipótesis .....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. Biomasa en Guatemala .....	5
2.2. Briquetas energéticas .....	6
2.2.1. Tipos de procesos para fabricación de briquetas .....	8
2.2.1.1. Artesanales .....	8
2.2.1.2. Semindustriales .....	10
2.2.1.3. Industriales .....	12
2.3. Materia prima apropiada para briquetar .....	14
2.4. Mecanismo de enlace para aglomerados .....	15
2.5. Aglutinante .....	17
2.5.1. Tipos y propiedades de los aglutinantes .....	18
2.5.1.1. Almidones .....	19
2.5.1.2. Cal .....	20
2.6. Briquetación .....	21
2.6.1. Características energéticas de las briquetas .....	21

	2.6.1.1.	Forma y tamaño.....	21
	2.6.1.2.	Aspecto (color y brillo) .....	23
	2.6.1.3.	Densidades.....	23
	2.6.1.4.	Humedad .....	24
	2.6.1.5.	Friabilidad .....	25
2.7.		Proceso de compactación .....	25
	2.7.1.	Briqueteadoras de pistón (densificación por impacto) .....	25
	2.7.2.	Briqueteadoras de tornillo (densificación por extrusión).....	26
	2.7.3.	Briqueteadoras hidráulicas y neumáticas .....	26
3.		DISEÑO METODOLÓGICO.....	27
	3.1.	Variables .....	27
	3.1.1.	Variables independientes .....	27
	3.1.2.	Variables dependientes .....	28
	3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	28
	3.3.	Recursos humanos disponibles.....	29
	3.4.	Recursos materiales disponibles .....	29
	3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa .....	31
	3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	31
	3.6.1.	Método de formulación .....	31
	3.6.2.	Método de obtención de las briquetas .....	32
	3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	35
	3.7.1.	Tabulación de información.....	35
	3.8.	Análisis estadístico.....	35
	3.8.1.	Determinación del número de repeticiones.....	35
	3.8.2.	Tratamiento estadístico de datos .....	36

3.8.2.1.	Cálculos estadísticos.....	36
4.	RESULTADOS.....	39
4.1.	Resultado núm. 1. Determinación de la formulación adecuada para las briquetas con los diferentes materiales.....	39
4.2.	Resultado núm. 2. Análisis sensorial antes y después de la combustión .....	41
4.3.	Resultado núm. 3. Determinación del porcentaje de humedad eliminada, la densidad, el poder calorífico y la resistencia a la compresión .....	42
4.4.	Resultado núm. 4. Costo de producción de las briquetas .....	44
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	47
	CONCLUSIONES.....	53
	RECOMENDACIONES.....	55
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	APÉNDICES.....	59
	ANEXOS .....	69



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Tipos de briquetas.....	8
2.	Instrumentos para briquetación 1 .....	9
3.	Instrumentos para briquetación 2 .....	10
4.	Briquetadoras con sistema de calentamiento .....	11
5.	Tecnología industrial .....	13
6.	Planta briqueteadora industrial.....	14
7.	Mecanismos enlazantes que actúan como dos partículas .....	16
8.	Posibles mecanismos enlazantes que actúan sobre las briquetas .....	17
9.	Secciones comunes de las briquetas .....	22
10.	Delimitación del campo de estudio .....	29
11.	Obtención de las briquetas.....	32
12.	Producto final (briquetas) .....	40
13.	Porcentaje de humedad eliminada en función de la composición material biocombustible-aglutinante .....	42
14.	Densidad en función de la composición material biocombustible-aglutinante .....	43
15.	Poder calorífico en función de la composición material biocombustible-aglutinante.....	43
16.	Resistencia a la compresión en función de la composición material biocombustible-aglutinante.....	44

## TABLAS

I.	Descripción de variables independientes.....	27
II.	Descripción de variables dependientes.....	28
III.	Determinación de formulación .....	32
IV.	Procedimientos cuantitativos de evaluación.....	34
V.	Tabla de análisis Anova.....	37
VI.	Formulaciones elaboradas.....	39
VII.	Análisis sensorial.....	41
VIII.	Costo de producción.....	45

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>cm</b>	Centímetro
<b>dm</b>	Decímetro
<b><math>\rho</math></b>	Densidad
<b>F</b>	Fisher
<b>g</b>	Gramo
<b>gal</b>	Galón
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>h</b>	Hora
<b>J</b>	Joule
<b>kJ</b>	Kilojoule
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>km</b>	Kilómetro
<b>lb</b>	Libra
<b>MPa</b>	Mega Pascal
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>ml</b>	Mililitro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>P.C.</b>	Poder calorífico
<b>Q</b>	Quetzal
<b><math>\mu</math></b>	Media
<b>s</b>	Segundo
<b>t</b>	Tonelada

**V**

Volumen

**W**

Watt

## GLOSARIO

<b>Aglutinante</b>	Sustancia capaz 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.
<b>Biocombustible</b>	Combustible de origen biológico, obtenido de manera renovable a partir de restos orgánicos.
<b>Briqueta</b>	Producto sólido 100 % ecológico y renovable, catalogado como bioenergía sólida, que viene en forma cilíndrica o de ladrillo y sustituye a la leña con muchas ventajas.
<b>Combustión</b>	Reacción química de oxidación, en la cual se desprende generalmente una gran cantidad de energía en forma de calor y luz, manifestándose visualmente, gracias al fuego, u otros. Proceso de quema que se produce cuando el combustible, el oxígeno y el calor están presentes simultáneamente.
<b>Compactación</b>	Proceso por el cual las partículas son obligadas a estar más en contacto las unas con las otras, mediante una reducción del índice de vacíos.

<b>Densificación</b>	Proceso de compresión o compactación de la biomasa residual, que permite aumentar su densidad y modificar sus propiedades fisicoquímicas para obtener un combustible de características más eficientes y de fácil almacenamiento.
<b>Energía renovable</b>	Energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.
<b>Poder calorífico</b>	Cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible.
<b>Presión</b>	Magnitud física que mide la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie y sirve para caracterizar cómo se aplica determinada fuerza resultante sobre una línea.
<b>Propiedades fisicoquímicas</b>	Aquellas que se pueden medir sin que se afecte la composición o la identidad de la sustancia.
<b>Propiedades mecánicas</b>	Aquellas que tienen que ver con el comportamiento de un material bajo fuerzas aplicadas y se expresan en términos de cantidades que son funciones del esfuerzo o de la deformación.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación tuvo como objetivo principal evaluar la influencia de dos diferentes aglutinantes (cal y almidón) sobre las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de briquetas elaboradas con aserrín, vacasa, desechos sólidos y tetrabrik. Las propiedades evaluadas son: poder calorífico, humedad eliminada, densidad y resistencia a la compresión.

Para la elaboración de las briquetas, se inició con encontrar la formulación ideal entre biocombustible y aglutinante. En principio, se agregaron 45 g de aglutinante, tanto de cal como de almidón, así como 105 g de biocombustible y 200 g de agua, pero no se formaba una briqueta sólida cuando se sometía a la compactación de 5 toneladas de presión por 10 minutos. Por lo tanto, se disminuyó el porcentaje, teniendo mejores resultados al utilizar una formulación de 34 % de biocombustible y 9 % de almidón, caso diferente con la cal, ya que con ella fueron 39 % de biocombustible y 4 % de cal.

Al tener la formulación ideal, se realizó la mezcla de la masa con 200 g de agua. Luego, se pesó la mezcla húmeda y posteriormente se introdujo la mezcla en un molde en forma de cilindro con un diámetro de 4,5 cm. Después, se procedió a realizar la compactación, utilizando 5 toneladas de presión durante 10 minutos. Al terminar la compactación, se extrajo la briqueta del molde, se pesó y se introdujo en un horno durante 10 minutos a una temperatura de 60 °C. Por último, se pesó cada una de las muestras secas.

Las propiedades de las muestras fueron evaluadas en tres distintos. El poder calorífico se midió en el Laboratorio de Recursos Alternativos, en las

instalaciones de Cementos Progreso. La resistencia a la compresión se evaluó en el Laboratorio de Sección de Metales y Productos Manufacturados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos. Las propiedades de densidad y humedad fueron evaluadas en el Laboratorio de Gestión de la Calidad de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La briqueta con mayor poder calorífico fue la briqueta de tetrabrik con almidón, siendo este de 26 011 J/g, y la que tuvo el valor más bajo fue la de vacasa con almidón, con un valor de 8 101 J/g. En el caso de la densidad, las briquetas con más densidad fueron las de vacasa-algutinante, con valores de 0,806 g/cm<sup>3</sup> utilizando almidón, 1,021 g/cm<sup>3</sup> con cal y 0,367 g/cm<sup>3</sup> únicamente con agua.

También se evaluaron los porcentajes de humedad eliminada en las briquetas y la que tuvo el mayor porcentaje fue la briqueta de aserrín con agua, con un valor de 24,76 %, debido a que no desprendió mucha agua en el proceso de compactación y al ser sometida a calor, el agua se evaporó. Por último, se evaluó la resistencia a la compresión, las briquetas con mayor resistencia fueron las de tetrabrik, obteniendo 23,175 kg/cm<sup>2</sup> con almidón, 26,555 kg/cm<sup>2</sup> con cal y 26,797 kg/cm<sup>2</sup> solo con agua.

El biocombustible con mejores propiedades fue la briqueta de tetrabrik y almidón con los siguientes valores: poder calorífico 26 011 J/kg, densidad 0,830 g/cm<sup>3</sup>, humedad eliminada del 17,31 % y resistencia a la compresión de 23,175 kg/cm<sup>2</sup>.

# OBJETIVOS

## General

Determinar el efecto de dos aglutinantes (cal y almidón) sobre las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de briquetas elaboradas con aserrín, vacasa, desechos sólidos y tetrabrik.

## Específicos

1. Establecer la formulación adecuada para la elaboración de las briquetas.
2. Realizar un análisis sensorial antes y después de la combustión.
3. Determinar el porcentaje de humedad eliminada, la densidad, la resistencia a la compresión y el poder calorífico de las briquetas.
4. Determinar la formulación del material biocombustible: aglutinante de la briqueta más favorable en función de sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas y el costo para producirlas.

## **Hipótesis**

### **Hipótesis alterna**

Ha: existe diferencia significativa en el poder calorífico, densidad, humedad eliminada y la resistencia a la compresión en las briquetas, al utilizar los aglutinantes cal y almidón.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

### **Hipótesis nula**

Ho: no existe diferencia significativa en el poder calorífico, densidad, humedad eliminada y la resistencia a la compresión en las briquetas, al utilizar los aglutinantes cal y almidón.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha desarrollado una problemática ambiental sobre el almacenamiento de residuos sólidos al aire libre, por lo que la mejor solución se encuentra dentro del marco de energía renovable.

Estos materiales, al ser compactados, disminuyen la cantidad de residuos en las industrias y el riesgo a los incendios, debido a que son ecológicos.

La briqueta es un biocombustible sólido densificado 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, 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.

Es un producto 100 % ecológico y renovable, catalogado como bioenergía sólida, 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 comercializado normalmente en bolsas de 5 a 20 kg. La materia prima utilizada proviene comúnmente de residuos de industrias forestales, agrícolas, ganaderos, entre otras.

En la actualidad han sido desarrolladas para revalorizar un conjunto de residuos sólidos orgánicos y así producir calor en su combustión.

## 1. ANTECEDENTES

Sobre el tema de densificados de biomasa y elaboración de briquetas, se tiene pocos estudios en Guatemala, pero en otros países sí existe una variedad de investigaciones realizadas, como las que se detallan a continuación:

En 2004, el MSc. Ing. Raúl González López realizó el trabajo de tesis de grado en Ciencias Técnicas titulado *Producción de materiales de construcción y energía a partir de desechos orgánicos: el bloque sólido combustible*, en la Universidad Central Marta Abreu de las Villas, en Santa Clara, Cuba. El objetivo principal era demostrar la conveniencia de obtener cenizas reactivas de la combustión de la biomasa-arcilla, para fabricar un aglomerante de cal-puzolana que logre un mejor comportamiento fisicomecánico de las pastas con él elaboradas, unido al empleo de la energía generada del bloque sólido combustible, constituyendo una alternativa económica y ambientalmente compatible para lograr los materiales de construcción de buen desempeño.

En el mismo año, el Dr. Ing. Fernando Martirena y MSc. Ing. Iván Machado realizaron un estudio titulado *Obtención de biomasa densificada con baja energía de compactación como fuente de energía renovable* en Cuba. En él se propone el uso de la combustión directamente o sea la conversión térmica de la biomasa en presencia de agentes oxidantes como aire u oxígeno, obteniendo en esta reacción la producción de gases combustibles y no combustibles, vapor de agua y cenizas. La reacción es altamente exotérmica y la proporción de los productos obtenidos depende de factores, como: características fisicoquímicas de la biomasa, tamaño de la muestra y el suministro de aire.

En 2007, Andrés Valderrama y Herve Curo publicaron en la Revista de Investigación CEDIT de Perú un estudio titulado *Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica en cocinas no convencionales*, en el cual se utilizaron los residuos sólidos orgánicos como materia prima principal en la elaboración de briquetas que son quemadas en una cocina no convencional para obtener energía calorífica, siendo una alternativa de reemplazo a los combustibles líquidos tradicionales. Por último, se compararon 3 diferentes tipos de briquetas y se obtuvo el tamaño de briqueta óptima, nivel de densificación y poder calorífico.

En 2009 se realizó el único estudio acerca de la biomasa en la Universidad de San Carlos de Guatemala, el cual fue elaborado por Cristóbal Francisco Traña Sánchez, como trabajo de graduación, titulado *Aprovechamiento de la biomasa (raquis) como combustible para incrementar la producción de energía térmica (vapor) en la caldera*. Este tuvo como objetivo principal diseñar e implementar una mejora en el área de producción de la palma, en la planta extractora Palmas de Horizonte S. A., a través del uso de la biomasa (raquis) como combustible orgánico para incrementar la producción de energía térmica. Se concluyó que al utilizar la biomasa (raquis) como combustible orgánico disminuyó la contaminación del medio ambiente en la finca Palmas del Horizonte, S. A., ya que el raquis vacío es aprovechado en la caldera en lugar de ser tirado al patio, lo que provocaba la proliferación de roedores, mosca e insectos varios.

En 2011, Joe Ralph Hernández Áviles realizó su tesis de grado en Ecuador titulada *Estudio técnico para la obtención de briquetas de fácil encendido a partir de carbón de la cascarilla de palma africana y su producción en la Empresa Tysai S. A.* El objetivo principal era desarrollar el estudio técnico para la obtención de briquetas de fácil encendido a partir de carbón de

cascarilla de la palma africana y su producción en la empresa antes mencionada. También analizar la situación del proceso productivo y el desempeño de la briqueta de carbón de cascarilla de palma africana en su encendido, así como estudiar las distintas alternativas que mejoran el encendido de la briqueta, para determinar la reformulación de la misma, efectuando un análisis comparativo, y elegir la alternativa más eficiente y conveniente para el proceso productivo.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Biomasa en Guatemala**

Guatemala es un país que cuenta con una gran cantidad de recursos naturales de tipo renovable, los cuales tienen un gran potencial energético. La fuente energética de mayor demanda en el país es la leña; se estima que la cobertura forestal del país alcanza los 37.000 km<sup>2</sup>, o sea, un 34% de la superficie nacional, con una tasa de deforestación de 2,1% anual.

En Guatemala se utiliza la biomasa en diversas formas, tal es el caso de la leña, cogeneración con bagazo de caña, biodigestión y otras.

El balance energético nacional muestra que en el consumo nacional de energía, la leña constituye el 63% del consumo final de energía. Le sigue en importancia el diesel con el 12%; las gasolinas representan el 8%; seguidamente están el fuel oil y la electricidad con el 4% respectivamente, y finalmente el bagazo de caña y el gas licuado de petróleo (gas propano) con el 3%.

El alto consumo de leña obedece a que la mayor parte de la población vive en el área rural, siendo en su mayoría de escasos recursos económicos, lo que les impide tener acceso y disponibilidad a otras fuentes energéticas. Además, existe una tradición cultural que se refleja en los hábitos alimenticios: la utilización del tipo de estufa denominada "Tres Piedras" para cocinar, las ollas de barro adecuadas para este fuego abierto, el sabor de los alimentos y la relativa disponibilidad del recurso.

La leña como combustible es utilizada en forma ineficiente, por cuanto el 81% de los hogares que la consumen, utilizan la estufa de "Tres Piedras", la cual desaprovecha casi el 90% de la energía consumida. Cabe mencionar en este punto que en los poblados con bajas temperaturas, el calor que desaprovecha

este tipo de estufa, es aprovechado para mantener una temperatura confortable en el interior de las viviendas. (FAO, 2006).

La única fuente biomásica que se ha utilizado para la producción de energía eléctrica en Guatemala, ha sido el bagazo de caña de azúcar. Guatemala depende en un 80 % de la energía eléctrica que le provee el sector público, el Instituto Guatemalteco de Electrificación (Inde) y la Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A. (EEGSA), que suministra, en conjunto, alrededor de 653 MW. Por otro lado, el sector privado colabora con el restante 20 %, que son 170 MW en este año, totalizando 820 MW de potencia disponible para el país.

En Guatemala, la electricidad se genera básicamente por medio de las centrales hidroeléctricas, con un porcentaje de capacidad instalada del 52 %, las centrales térmicas con un 40 % y los cogeneradores con el restante 8 %.

## **2.2. Briquetas energéticas**

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 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.

Es un producto 100 % ecológico y renovable, catalogado como bioenergía sólida, 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 comercializado en bolsas de 5 a 20 kg. El término briqueta, puede ser a veces confuso, 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.

Los motivos por los cuales han sido desarrolladas son: para revalorizar un conjunto de residuos sólidos orgánicos que producen calor en su combustión, para aumentar la densidad de ciertos biocombustibles que eran muy caros de transportar debido a los bajos valores de los mismos, para sustituir combustibles sólidos fósiles y para 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 y tamaño de partículas (granulometría) aceptables. La fabricación de briquetas es una forma bastante eficiente para concentrar la energía disponible de la biomasa. El mayor enemigo que se les presenta a las técnicas de densificación es su aparente sencillez.

Figura 1. Tipos de briquetas



a) Formas usuales.



b) Briquetas de aserrín.

Fuente: *Briquetas*. <https://www.google.es/search?q=briquetas>.

Consulta: 2 de noviembre de 2012.

### 2.2.1. Tipos de procesos para fabricación de briquetas

A continuación se describen los tipos de procesos para la fabricación de briquetas.

#### 2.2.1.1. 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 lo que importa es conformar las briquetas y obtenerlas de una forma no continua, práctica y sencilla, sin ser estricto y preciso en parámetros como 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 utilizan aglutinantes como estiércol de animales, papel, aserrín, almidones, arcillas, y otros. En las siguientes figuras se aprecian los instrumentos utilizados para la fabricación de briquetas de forma artesanal.

Figura 2. **Instrumentos para briquetación 1**



a) Prensa briquetadora artesanal.



b) Proceso de mezclado

Fuente: *Briquetas*. <https://www.google.es/search?q=briquetas>.

Consulta: 2 de noviembre de 2012.

Figura 3. **Instrumentos para briquetación 2**



a) Proceso de compactación.      b) Prensa de tecnología artesanal.

Fuente: *Briquetas*. <https://www.google.es/search?q=briquetas>.

Consulta: 2 de noviembre de 2012.

### **2.2.1.2. Semindustriales**

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 semindustrial son mayores que en el artesanal y, 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. Debido a 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 lo que 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.

Figura 4. **Briquetadoras con sistema de calentamiento**



a) Briquetadora de extrusión.



b) Briquetadora de pistón.  
b)

Fuente: *Briquetas*. <https://www.google.es/search?q=briquetas>.

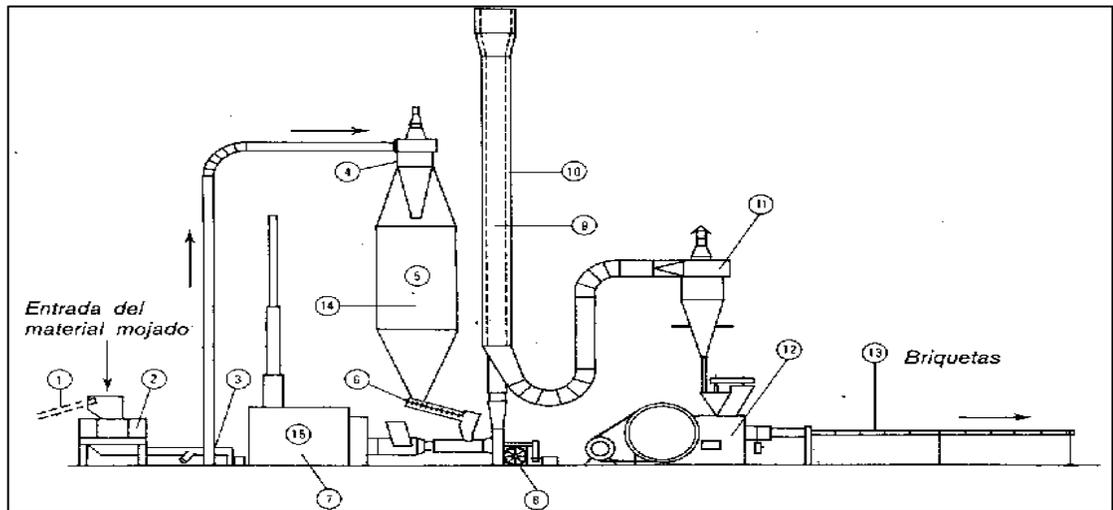
Consulta: 2 de noviembre de 2012.

### **2.2.1.3. 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, pero 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 material lignocelulósico que aporta lignina propia como aglutinante. Por ejemplo, la madera al ser calentada sobre el rango de su temperatura de plasticidad, que es aproximadamente 165 °C, pierde su elasticidad permitiendo comprimirla de manera más fácil. Generalmente se tienen varias fases de compactado.

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

Figura 5. Tecnología industrial



Partes: 1. Cinta transportadora. 2. Trituradora. 3. Ventilador. 4. Extractor de polvo. 5. Depósito para el material húmedo. 6. Descarga del depósito. 7. Horno para calentar las briquetas. 8. Ventilador. 9. Secador de suspensión. 10. Aislamiento. 11. Extractor de polvo. 12. Prensa para la fabricación de briquetas. 13. Línea de enfriamiento. 14. Material triturado húmedo. 15. Aire caliente.

Fuente: *Briquetas*. <https://www.google.es/search?q=briquetas>.

Consulta: 2 de noviembre de 2012.

Figura 6. **Planta briqueteadora industrial**



Fuente: *Briquetas*. <https://www.google.es/search?q=briquetas>.

Consulta: 2 de noviembre de 2012.

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

En las combinaciones de los elementos constituyentes de la briqueta se debe obtener una mezcla cuyas características importantes son: lograr porcentajes mínimos de aglomerante para la briquetación, en función de la cantidad de materia prima (combustible) granulada que garantice un bajo costo de fabricación y, 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

#### **2.4. Mecanismo de enlace para aglomerados**

Los mecanismos enlazantes para el aumento del tamaño por aglomeración fueron definidos y clasificados por Rumpf (1962) y posteriormente fueron recogidos por Pietsch (1991). Durante una operación particular de aumento de tamaño se puede aplicar más de un mecanismo. Se dividen en cinco grupos y varios subgrupos.

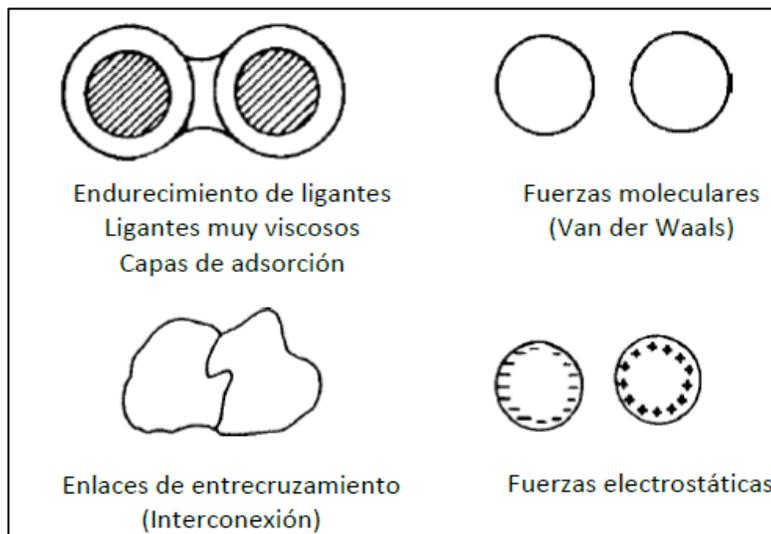
Los puentes sólidos se forman entre partículas por medio de la sintetización de minerales, la cristalización de sustancias disueltas durante el secado, como sucede en la granulación de fertilizantes y endurecimiento de los agentes de enlace tales como las gomas y resinas. Entre los subgrupos están: puentes 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 o cohesión se aprovechan plenamente y la capacidad de aglutinación es mucho mayor. Entre los subgrupos están: 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 de 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 están: 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; pero es probablemente solo un contribuyente menos de la fuerza de conglomeración en la mayoría de los casos.

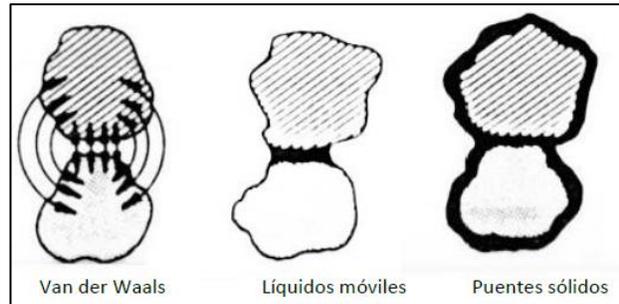
Figura 7. **Mecanismos enlazantes que actúan como dos partículas**



Fuente: *Briquetas*. <https://www.google.es/search?q=briquetas>.

Consulta: 2 de noviembre de 2012.

Figura 8. **Posibles mecanismos enlazantes que actúan sobre las briquetas**



Fuente: *Briquetas*. <https://www.google.es/search?q=briquetas>.  
Consulta: 2 de noviembre de 2012.

## 2.5. **Aglutinante**

Los aglutinantes (ligantes, aglomerantes) son sustancias 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:

- Fácil preparación
- Fácil aplicación
- Fácil obtención
- 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

### **2.5.1. 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 se clasifican en combustibles y no combustibles. Son combustibles: resinas naturales y sintéticas, alquitrán, estiércol animal, manteca, aguas servidas, residuales o barro, gelatina, papel, restos y residuos de pescado, algas, almidones, entre otros. Entre los no combustibles están: limo, arcilla, barro, cemento, cal, entre otros.

También se clasifican los aglutinantes en orgánicos e inorgánicos. Los orgánicos son: albuminatos, alcoholes, almidones, alquitranes, azúcares, breas, caseína, cola, dextrina, gelatinas, humatos, ligninas-lignosulfonatos, melazas, papel, aserrín, resinas, turba; y 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 están:

- 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.

#### **2.5.1.1. 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, proporciona gran parte de la energía que los humanos consumen en 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 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 para formar las largas cadenas del almidón, que pueden llegar a tener hasta 2 000 o 3 000 unidades de glucosa.

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

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

#### **2.5.1.2. Cal**

Se ha usado, desde la más remota antigüedad, como conglomerante en la construcción; también para pintar (encalar) muros y fachadas de los edificios construidos con adobes o tapial (habitual en las antiguas viviendas mediterráneas) o en la fabricación de fuego griego.

## **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 con equipos mecánicos. En el proceso de briquetado 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 tienen 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.

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

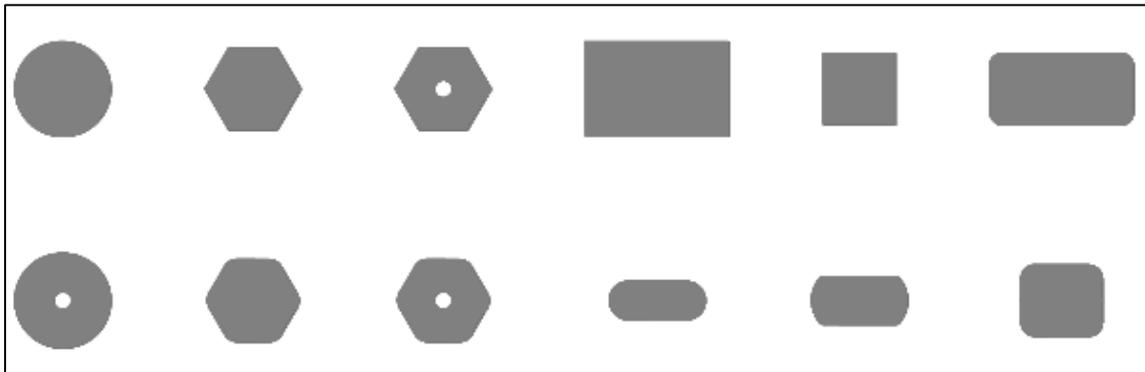
A continuación se describen las características energéticas de las briquetas.

#### **2.6.1.1. Forma y tamaño**

La forma de las briquetas puede ser muy variable y depende de la maquinaria utilizada en su obtención. Cuando las briquetas se fabrican con una

prensa de tipo tornillo sinfín, dejan un hueco en su interior, con lo que la relación superficie–volumen es mayor.

Figura 9. **Secciones comunes de las briquetas**



Fuente: *Briquetas*. <https://www.google.es/search?q=briquetas>.

Consulta: 2 de noviembre de 2012.

Casi todas las briquetas fabricadas en la actualidad son de forma cilíndrica, cuyo diámetro supera los 5 cm, siendo el diámetro más usual comprendido entre los 7,5 cm y los 9,0 cm. La longitud es variable entre los 50 y 80 cm. Normalmente, a mayor diámetro mayor es la longitud.

El agujero interno de las briquetas conlleva ventajas y desventajas, entre ellas, se consigue una ignición más rápida, se reduce el tiempo de secado; esto puede resultar ventajoso o perjudicial (dependiendo del objetivo buscado).

Las formas cilíndricas o de sección rectangular, redondeada en las esquinas ayudan a que la briketa no se desintegre por golpes. Estas últimas arden más despacio y se almacenan mucho mejor, pues ocupan menos volumen a igualdad de peso que el tipo cilíndrico o el de prisma octogonal

hueco. En una briqueta las dimensiones dependen del fabricante, para que sea utilizada en fines requeridos y específicos.

#### **2.6.1.2. Aspecto (color y brillo)**

Como la composición de las briquetas es variable, también lo será su color, dependiendo del tipo de la materia orgánica, como si en la cara exterior de la briqueta se produce la baquetización de la misma, el color es más oscuro y parece como negruzco.

Si la briqueta está compuesta con parafina es de color blanco–amarillento. Se procura que el aspecto de la briqueta sea lo más parecido a la leña, para que parezca que en las chimeneas arde leña, por ello se prefieren las briquetas cilíndricas.

#### **2.6.1.3. Densidades**

La principal característica de las briquetas frente a las astillas es que son más densas que estas, con lo que facilitan el transporte, manipulación y almacenaje. El inconveniente es que resultan más caras que las astillas, pues requieren un proceso industrial de fabricación.

Al tener mayor densidad, este producto se transportará ocupando menos volumen (a igualdad de peso) que las leñas y astilla, y será más sencilla su manipulación. El objetivo final de los procesos de briquetado es siempre lo mismo: obtener un producto final de mayor densidad que los productos iniciales.

Para determinar la densidad de las briquetas deben realizarse ensayos de laboratorio en los que basta evaluar su masa (en una balanza) y su volumen (cálculos geométricos) para obtener la densidad aproximada.

Pero, para obtener un resultado más exacto, se utiliza el llamado método de desplazamiento de agua que consiste en pasar una determinada cantidad de briquetas y embutirlas en silicona, si el peso antes es  $p$  y el peso cuando están embutidas en silicona es  $t$ , el peso de la silicona será  $t-p$ . A continuación, se introducen en el agua y se mide el volumen de agua desplazada.

La densidad de la biqueta de forma aproximada se obtiene por la fórmula:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

$\rho$  = densidad de la biqueta (kilogramos por metro cúbico)

$m$  = masa de la biqueta (kilogramo)

$V$  = volumen de la biqueta (metros cúbicos)

#### **2.6.1.4. Humedad**

La humedad de los biocombustibles sólidos varía mucho, porque la humedad de los combustibles derivados de la madera depende del momento de la recolección, de la ubicación, del tipo y la duración del almacenamiento, así como de la preparación del combustible. Oscila entre menos del 10 % (subproductos de la industria de la madera) y un 50 % (astillas de madera forestal). La humedad no tiene que ver solamente con el poder calorífico, sino con las condiciones de almacenamiento y la temperatura de combustión, así como el volumen de los gases resultantes de la combustión.

La cantidad de agua existente en el biocombustible afecta de forma decisiva la energía disponible de cada biocombustible, por lo que, suelen emplearse dos métodos (base seca y base húmeda) para especificar la humedad de los biocombustibles sólidos. Procede distinguir entre ellas, sobre todo cuando la humedad es alta.

#### **2.6.1.5. Friabilidad**

Un material es friable cuando se desmenuza fácilmente (que es lo contrario la resistencia al golpeteo sin desmenuzarse). La friabilidad es una variable muy importante en las briquetas, pues se están manipulando continuamente y chocando unas con otras.

### **2.7. Proceso de compactación**

La compactación se realiza luego de tener la mezcla con el aglutinante homogénea, valiéndose de equipos apropiados, como los que a continuación se mencionan:

#### **2.7.1. Briqueteadoras de 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 a 1 500 kg/h, aunque existen equipos que procesan hasta 2 000 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 aproximadamente de 20 a 60 W/kg.

### **2.7.2. Briqueteadoras de tornillo (densificación por extrusión)**

Es un sistema basado en la presión ejercida sobre la biomasa por un tornillo sin fin especial, de aleaciones de cromo níquel o de carburo de tungsteno, que gira con velocidad variable, haciendo avanzar el producto hasta una cámara que se estrecha progresivamente en forma cónica. Algunos de estos modelos disponen de una camisa térmica (manto caliente) para regular la temperatura y favorecer la plastificación. La producción de briquetas con estos equipos es del orden de 500 a 2 500 kg/h, con humedades menores al 10 % y densidades que oscilan entre 1 a 1,3 kg/dm<sup>3</sup>. Pero, en modelos que cuentan con calefacción forzada que favorece la plastificación de la lignina, se puede trabajar con porcentajes de hasta el 12 al 14 %. El consumo de energía es de 50 a 65 W/kg.

### **2.7.3. Briqueteadoras hidráulicas y neumáticas**

La presión en estas máquinas es a través de varios pistones (1, 2, o 3), que son accionados mediante sistemas hidráulicos o neumáticos. Se utilizan con frecuencia con residuos de muy mala calidad como el algodón, papel, aserrín húmedo, entre otros, cuando no se requiere gran calidad de la briqueta, o solo se necesita reducir espacio ocupado por los residuos. Las presiones alcanzadas de estos equipos son pequeñas de 200, 400 o 600 kg/cm<sup>2</sup>. El costo de producción es bajo y el volumen producido es de 50 hasta 5 000 kg/h con densidades de 0,7 a 0,8 kg/dm<sup>3</sup> o, en ocasiones, hasta 0,9 a 1,0 kg/dm<sup>3</sup>. La energía que consumen estos equipos es de 40 a 120 W/kg.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

La elaboración de las briquetas se realizará por medio del proceso de densificación, en el cual se debe tener en consideración las siguientes variables: el porcentaje de composición, el tiempo de prensado, el tamaño de la briqueta y la fuerza de compactación. Por lo tanto, afectará a las propiedades de cada briqueta como el poder calorífico, la densidad, la humedad eliminada y la resistencia a la compresión.

##### 3.1.1. Variables independientes

En tabla I se describen las variables independientes asociadas al proceso de densificación.

Tabla I. Descripción de variables independientes

Descripción de variables independientes						
			Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
Núm.	Variable	Unidad	Constante	Variable	Monitoriable	No monitoriable
1	Tamaño de la briqueta	cm	X		X	
2	Porcentaje de composición	%		X	X	
3	Presión de compactación	t	X		X	

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. Variables dependientes

En tabla II se describen las variables dependientes asociadas al proceso de densificación.

Tabla II. Descripción de variables dependientes

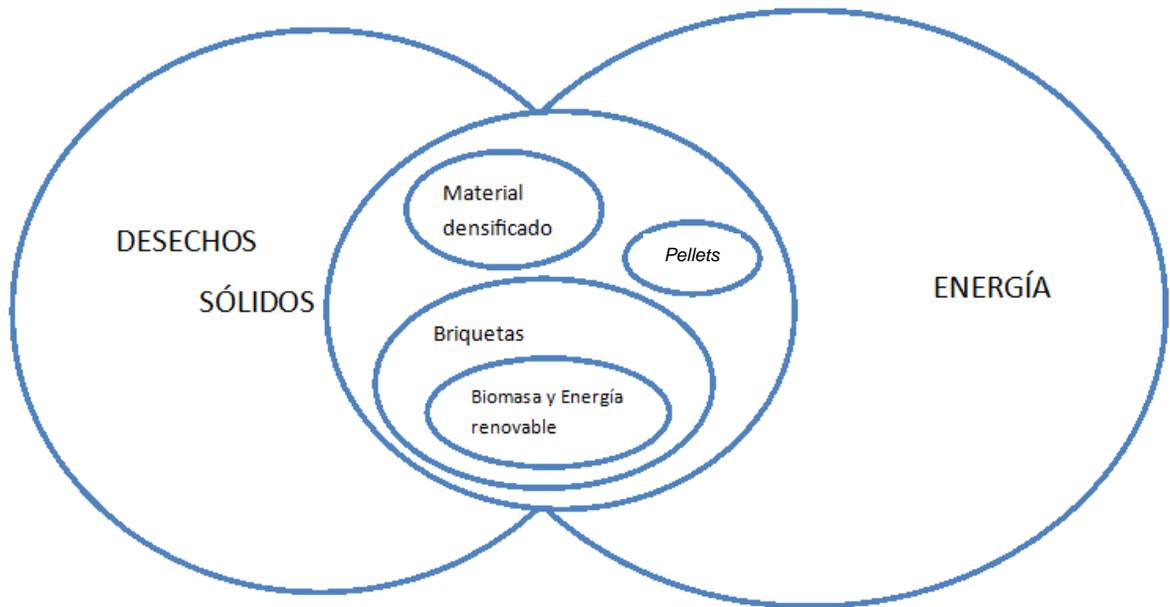
Descripción de variables dependientes						
			Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
Núm.	Variable	Unidad	Constante	Variable	Monitoreable	No monitoreable
1	Humedad de la briqueta	%		X	X	
3	Densidad	g/cm <sup>3</sup>		X	X	
4	Resistencia a la compresión	kg/cm <sup>2</sup>		X	X	
5	Poder calorífico	J/kg		X	X	
6	Masa	g	X		X	
7	Volumen	cm <sup>3</sup>		X	X	

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación del campo de estudio

La investigación es de tipo experimental – comparativa, utilizando un enfoque cuantitativo debido a que se compararán los resultados de las propiedades de las briquetas y en el cual se utilizarán métodos estadísticos para determinar si existe diferencia comparativa al utilizar los diferentes insumos para la elaboración de las mismas.

Figura 10. **Delimitación del campo de estudio**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigadora: Ana Lucía Martínez Maldonado.
- Asesor: Ing. Qco. Jaime Domingo Carranza González.

### 3.4. Recursos materiales disponibles

Insumos y equipo requerido para la elaboración de la briqueta.

- Materiales combustibles
  - Aserrín de madera de pino
  - Tetrabrik
  - Estiércol de vaca
  - Desechos sólidos orgánicos
  
- Aglutinantes
  - Cal
  - Almidón
  
- Cristalería
  - *Beacker* 100 ml
  
- Equipo
  - Prensa hidráulica
  - Horno
  - Molde de acero
  - Tamices # 100 W.S. Tyler
  - Molino

Equipos utilizados específicamente para determinar sus propiedades químicas, físicas y mecánicas.

- Bernier Mitutoyo, determinación de diámetro y largo de briqueta
- Calorímetro IkaWerke, determinación del poder calorífico
- Baldwin Lima-Hamilton, determinación de resistencia de materiales

Equipos e instrumentos generales del investigador para documentar y evidenciar los resultados y procedimientos.

- Balanza analítica
- Calculadora
- Cronómetro
- Cámara fotográfica

### **3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa**

Durante la investigación se utilizarán ambos enfoques. El enfoque cualitativo por medio de un análisis sensorial. Por otro lado, se utilizará un enfoque cuantitativo al comparar los distintos aglutinantes en el momento de la compactación, relacionado con el rendimiento de los mismos. Se determinará, por medio de un análisis estadístico, por lo que predomina el enfoque cuantitativo.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

A continuación se describen los métodos utilizados para la recolección y ordenamiento de la información.

#### **3.6.1. Método de formulación**

Para la obtención de la formulación material biocombustible-aglutinante óptima, se efectuaron algunas pruebas de variaciones en los porcentajes, se realizó el proceso de densificación y luego se extrajo la briqueta. Pero, en algunos casos la briqueta no se extraía completamente y en otros sí, como se muestra en la tabla III.

Tabla III. **Determinación de formulación**

<b>Aglutinante</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Extracción completa</b>
<b>Cal</b>	13,0 %	NO
<b>Almidón</b>	13,0 %	NO
<b>Cal</b>	9,00 %	NO
<b>Almidón</b>	9,00 %	SÍ
<b>Cal</b>	4,00 %	SÍ
<b>Sin aglutinante</b>	0,00 %	SÍ

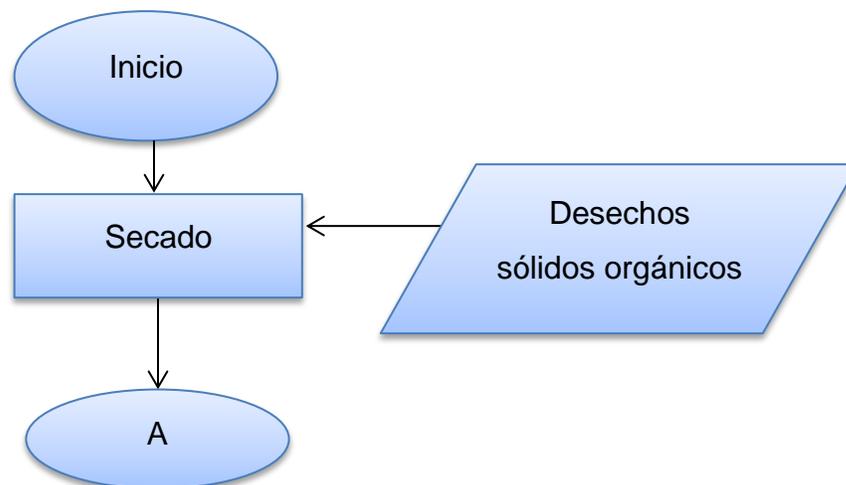
Fuente: elaboración propia.

Nota: el 57 % del peso es agua, el otro porcentaje de material biocombustible y el resto del porcentaje de aglutinante.

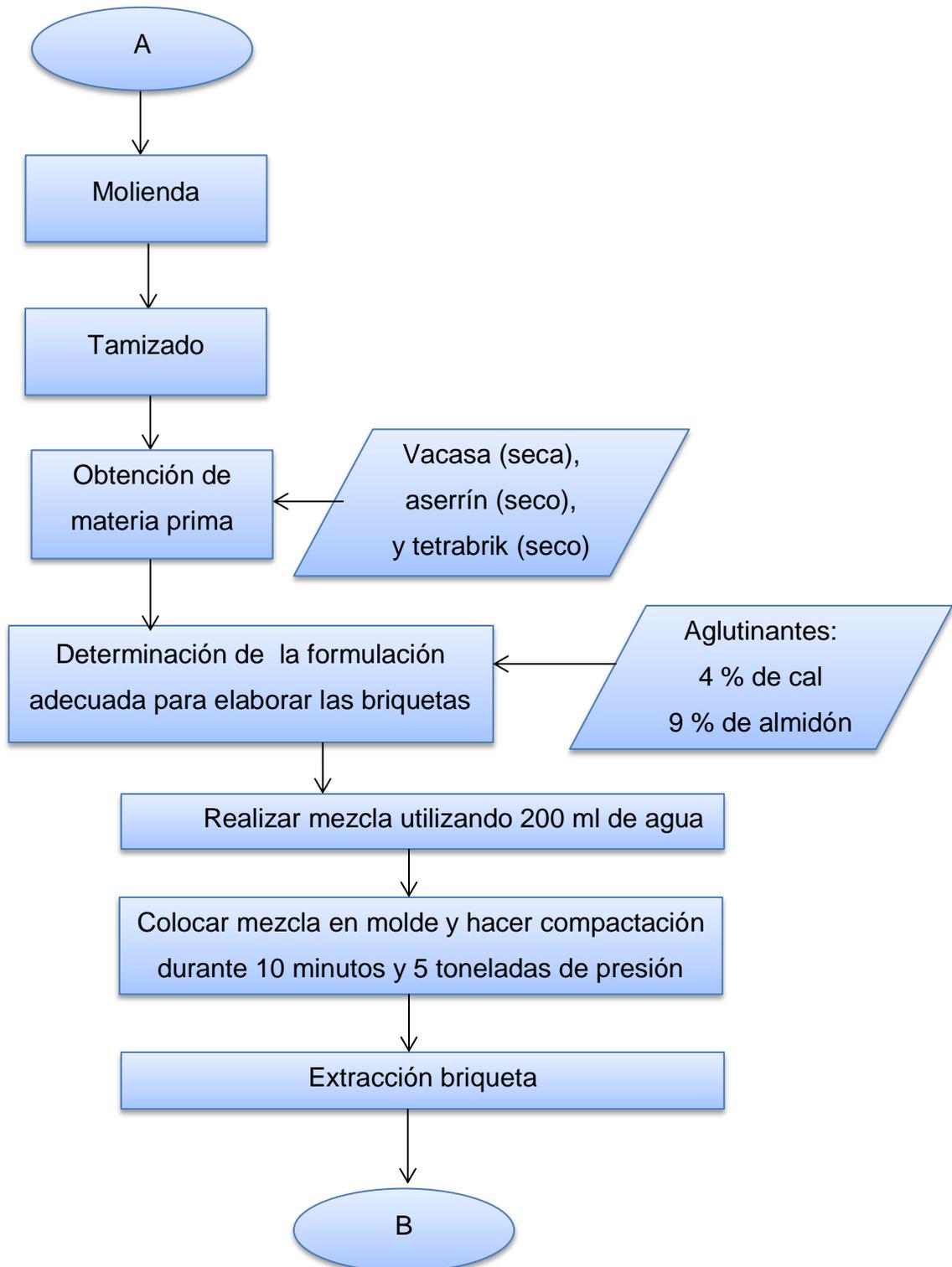
### 3.6.2. **Método de obtención de las briquetas**

A continuación se detalla el método de obtención de la briqueta en un diagrama de flujo.

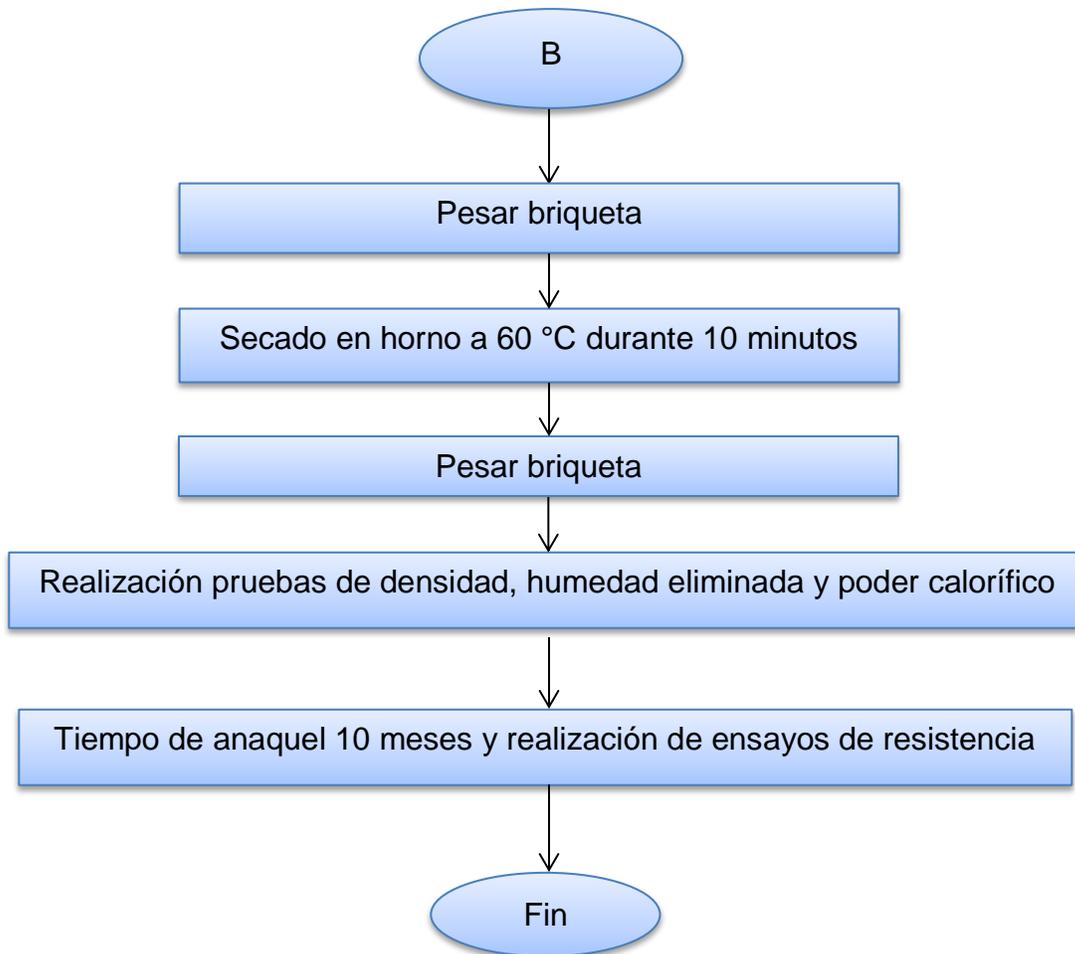
Figura 11. **Obtención de las briquetas**



Continuación de la figura 11.



Continuación de la figura 11.



Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Procedimientos cuantitativos de evaluación**

Variabes	Norma ASTM
Poder calorífico	E 711-87
Humedad	E 871-82
Densidad	E 873-82
Resistencia a la compresión	C 873

Fuente: elaboración propia.

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

A continuación se muestra el proceso de tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.

#### **3.7.1. Tabulación de información**

Todos los datos obtenidos en la experimentación se encuentran tabulados en el apéndice, así como las tablas con los resultados obtenidos de poder calorífico y resistencia a la compresión.

### **3.8. Análisis estadístico**

Con el fin de realizar una comparación al utilizar dos aglutinantes diferentes por medios estadísticos, se realizaron los siguientes cálculos.

#### **3.8.1. Determinación del número de repeticiones**

Para obtener el número ideal de repeticiones del experimento, se utilizó la distribución de probabilidad normal de Gauss, la cual se muestra a continuación:

- Utilizando:
  - Nivel de confianza = 95 %
  - Nivel de significancia = 5 %

$$n = \frac{z_{\alpha/2}^2 * P * Q}{e^2}$$

Donde:

$P$  = probabilidad de éxito = 0,95

$Q$  = probabilidad de fracaso = 0,05

$z$  = variable aleatoria de la distribución normal = 1,96

$e$  = error estimado = 0,25

$$n = \frac{(1,96)^2 * (0,95) * (0,05)}{(0,25)^2} = 2,9196$$

Mediante aproximación, se obtiene que el número ideal de corridas debe ser 3.

### **3.8.2. Tratamiento estadístico de datos**

Los datos obtenidos de las propiedades mecánicas y fisicoquímicas de las briquetas fueron tratados de la siguiente manera.

#### **3.8.2.1. Cálculos estadísticos**

- Cálculo de la media muestral

$$\text{Media muestral: } \bar{X}_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Donde:

$\bar{X}_l$  = media muestral

$x_i$  = valor de la repetición

$N$  = número total de datos

- Cálculo de análisis de varianza de un factor

Tabla V. **Tabla de análisis Anova**

Propiedad\ Análisis Anova	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Valor teórico de F
X	Tratamientos	SSA	$k - 1$	$s_1^2 = \frac{SSA}{k - 1}$	$\frac{s_1^2}{s^2}$	
	Error	SSE	$k(n - 1)$	$s^2 = \frac{SSE}{k(n - 1)}$		
	Total	SST	$nk - 1$			

Fuente: WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. p. 468.

Nota: el  $F_{\text{teórico}}$  se obtiene de las tablas de Anova con un nivel de significancia de  $1 - 0,99 = 0,01 \%$ .



## 4. RESULTADOS

### 4.1. Resultado núm. 1. Determinación de la formulación adecuada para las briquetas con los diferentes materiales

Los resultados se presentan en la tabla VI.

Tabla VI. **Formulaciones elaboradas**

<b>Aglutinantes Materiales</b>	<b>Almidón</b>	<b>Cal</b>	<b>Sin Aglutinante</b>
<b>Vacasa (estiércol de vaca)</b>	9 % 34 %	4 % 39 %	0 % 43 %
<b>Aserrín</b>	9 % 34 %	4 % 39 %	0 % 43 %
<b>Desechos sólidos orgánicos (DSO)</b>	9 % 34 %	4 % 39 %	0 % 43 %
<b>Tetrabrik</b>	9 % 34 %	4 % 39 %	0 % 43 %

Fuente: elaboración propia, con base en la experimentación dentro del Laboratorio de Sección de Gestión de la Calidad, Fiusac.

Base: 150 gramos de material biocombustible y 200 gramos de agua (57 %).

Figura 12. **Producto final (briquetas)**

Todas las briquetas realizadas



Briqueta tetrabrik-almidón



Briquetas vacasa-almidón



Fuente: elaboración propia en el Laboratorio de Sección de Gestión de la Calidad, Fiusac.

**4.2. Resultado núm. 2. Análisis sensorial antes y después de la combustión**

Los resultados se presentan en la tabla VII.

Tabla VII. **Análisis sensorial**

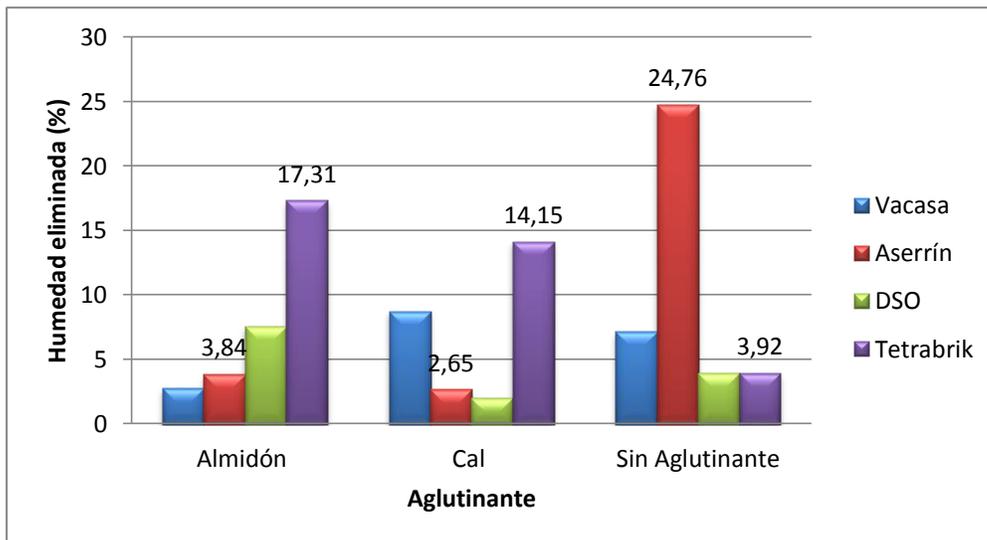
<b>Análisis sensorial</b>								
			Antes de la combustión			Después de la combustión		
No	Material	Aglutinante	Olor	Textura	Color briqueta	Olor	Color briqueta	Color
1	Vacasa	Almidón	Inodoro	Lisa	Café oscuro	No irritable	Negro	Gris claro
2	Vacasa	Cal	Inodoro	Lisa	Café oscuro	No irritable	Negro/gris	Gris claro
3	Vacasa	Sin aglutinante	Inodoro	Lisa	Café oscuro	No irritable	Negro	Gris
4	Aserrín	Almidón	Inodoro	Lisa	Café claro	No irritable	Negro	Gris claro
5	Aserrín	Cal	Inodoro	Lisa	Café claro	No irritable	Negro	Gris claro
6	Aserrín	Sin aglutinante	Inodoro	Lisa	Café claro	No irritable	Negro	Gris claro
7	DSO	Almidón	Inodoro	Lisa	Café oscuro	No irritable	Negro	Gris
8	DSO	Cal	Inodoro	Lisa	Café oscuro	No irritable	Negro/gris	Gris
9	DSO	Sin aglutinante	Inodoro	Lisa	Café oscuro	No irritable	Negro	Gris
10	Tetrabrik	Almidón	Inodoro	Rugosa	Varios colores	Irritable	Negro	Gris claro
11	Tetrabrik	Cal	Inodoro	Rugosa	Varios colores	Irritable	Negro	Gris
12	Tetrabrik	Sin aglutinante	Inodoro	Rugosa	Varios colores	Irritable	Negro	Gris

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3. Resultado núm. 3. Determinación del porcentaje de humedad eliminada, la densidad, el poder calorífico y la resistencia a la compresión

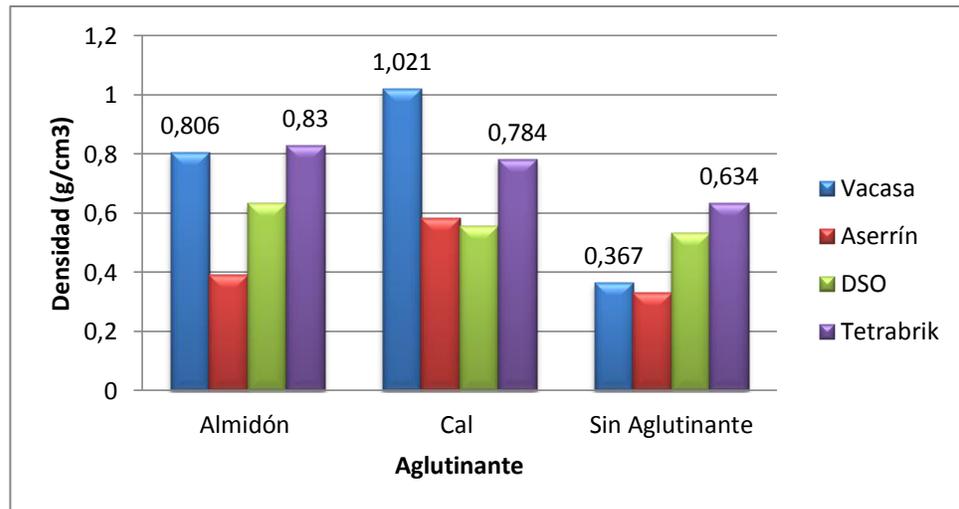
Los resultados se muestran en las figuras 13, 14, 15 y 16.

Figura 13. Porcentaje de humedad eliminada en función de la composición material biocombustible-aglutinante



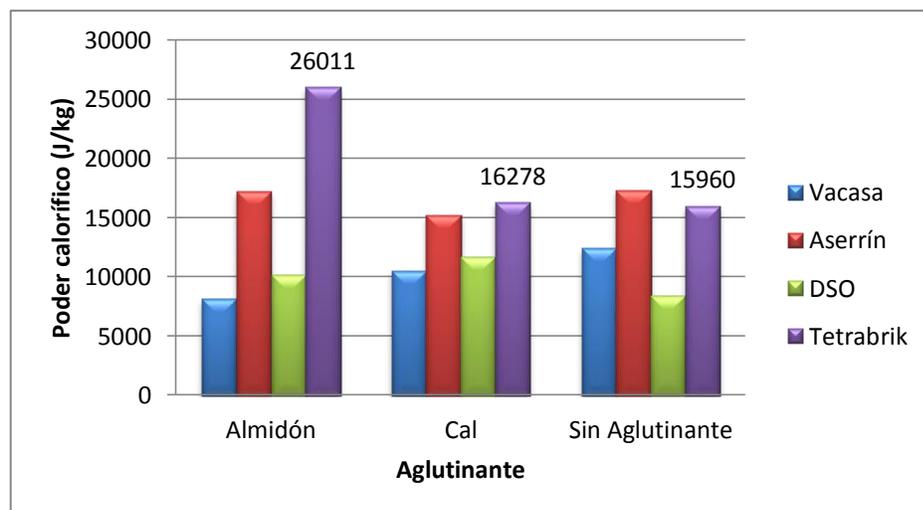
Fuente: elaboración propia, con base en datos del apéndice 3.

Figura 14. **Densidad en función de la composición material biocombustible-aglutinante**



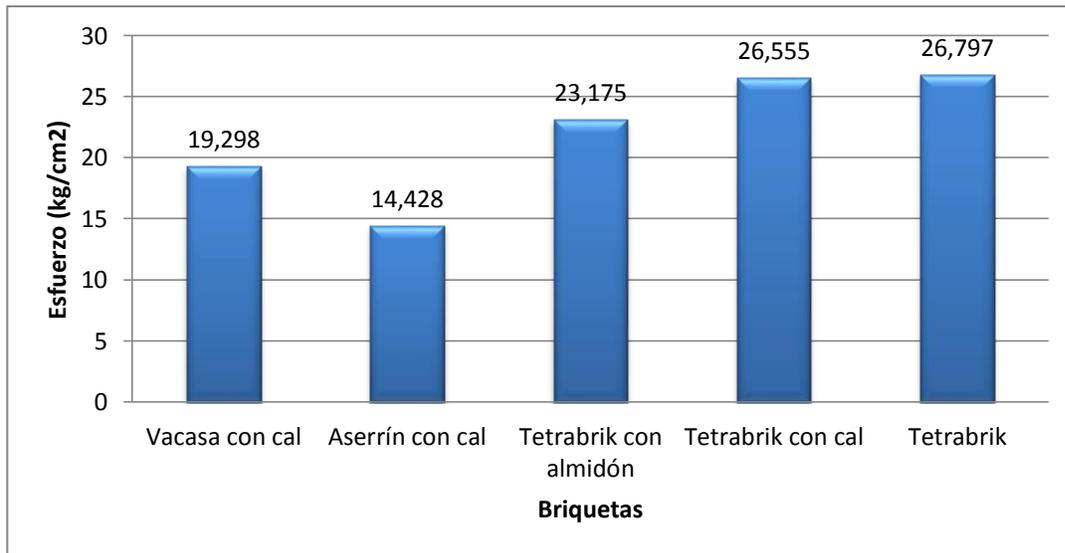
Fuente: elaboración propia, con base en datos del apéndice 3.

Figura 15. **Poder calorífico en función de la composición material biocombustible-aglutinante**



Fuente: elaboración propia, con base en datos del apéndice 3.

Figura 16. **Resistencia a la compresión en función de la composición material biocombustible-aglutinante**



Fuente: elaboración propia, con base en datos del apéndice 3.

Nota: por los 10 meses de anaquel, únicamente se logró hacer el ensayo a 5 briquetas.

#### 4.4. **Resultado núm. 4. Costo de producción de las briquetas**

Los resultados se muestran en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Costo de producción**

<b>Costo de producción</b>						
<b>Material</b>	<b>Aglutinante</b>	<b>Cantidad material</b>	<b>Cantidad aglutinante</b>	<b>Coste producción</b>	<b>Coste aglutinante</b>	<b>Coste total</b>
<b>Vacasa</b>	Almidón	120 g	30 g	Q 1,05	1 lb/ Q 3,0	Q 1,25
<b>Vacasa</b>	Cal	135 g	15 g	Q 1,05	1 lb/ Q 4,5	Q 1,35
<b>Vacasa</b>	Sin aglutinante	150 g	-----	Q 1,05	-----	-----
<b>Aserrín</b>	Almidón	120 g	30 g	Q 1,05	1 lb/ Q 3,0	Q 1,25
<b>Aserrín</b>	Cal	135 g	15 g	Q 1,05	1 lb/ Q 4,5	Q 1,35
<b>Aserrín</b>	Sin aglutinante	150 g	-----	Q 1,05	-----	-----
<b>DSO</b>	Almidón	120 g	30 g	Q 1,05	1 lb/ Q 3,0	Q 1,25
<b>DSO</b>	Cal	135 g	15 g	Q 1,05	1 lb/ Q 4,5	Q 1,35
<b>DSO</b>	Sin aglutinante	150 g	-----	Q 1,05	-----	-----
<b>Tetrabrik</b>	Almidón	120 g	30 g	Q 1,05	1 lb/ Q 3,0	Q 1,25
<b>Tetrabrik</b>	Cal	135 g	15 g	Q 1,05	1 lb/ Q 4,5	Q 1,35
<b>Tetrabrik</b>	Sin aglutinante	150 g	-----	Q 1,05	-----	-----

Fuente: elaboración propia.

Nota: por cada briqueta, hay que agregar un costo del equipo utilizado, horno, Q 0,35, prensa hidráulica, Q 0,40 y el molde, Q 0,30.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo de graduación consistió en la determinación del efecto de dos aglutinantes (cal y almidón) sobre las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de briquetas elaboradas con vacasa, aserrín, desechos sólidos orgánicos y tetrabrik, realizando una comparación de las diferentes briquetas para obtener el mejor biocombustible.

La mayor cantidad de la materia prima utilizada, se recolectó en el relleno sanitario de AMSA, ubicado en el kilómetro 22 carretera CA-9 sur, municipio de Villanueva en el departamento de Guatemala. También se recurrió a las carpinterías que trabajan con madera de pino, para obtener aserrín ya desechado por el carpintero. La materia prima, a excepción de los aglutinantes, son materiales que se pueden aprovechar después de su uso normal, por ejemplo, las cáscaras de fruta, aserrín, vacasa y tetrabrik, del cual se utilizó específicamente de las cajas de leche.

Al tener toda la materia prima recolectada, se procedió a la homogenización de las partículas, utilizando tamiz #100. El propósito de reducir el tamaño de la partícula es que con un peso bajo se puede obtener más volumen, aumentando el área de contacto al realizar la mezcla. En el caso de los aglutinantes, el tamaño de la partícula ya se encontraba con un diámetro pequeño, el cual permitió que lograra pasar en el tamiz #100.

Luego de tener la materia prima homogenizada, se realizaron diferentes experimentos para encontrar la formulación material-aglutinante más adecuada para la elaboración de las briquetas. En el caso del almidón, se concluyó utilizar 34 % de material y 9 % de almidón. Por el otro lado, con la cal, se realizó una composición de 39 % de material y 4 % de aglutinante; en ambos casos el complemento de la composición fue del 57 % de agua.

Se determinan a la cal y almidón como aglutinantes porque son agentes utilizados para impartir cualidades cohesivas y se encuentran en polvo. Estas sustancias otorgan a los comprimidos una cohesividad que asegura que estos permanezcan intactos después de la compresión, pero también mejoran las cualidades de libre flujo para las formulaciones de gránulos con la dureza y el tamaño deseados. Se disminuyó el porcentaje de cal en comparación al almidón porque, al utilizar el 9 % de cal, el densificado formaba una consistencia quebradiza que no permitía que las partículas permanecieran juntas y el almidón es un polímero natural que permite una fácil cohesión.

Para la elaboración de las diferentes briquetas, se inició con el pesaje de los materiales y aglutinantes en una balanza, se trabajó con una base de 350 g de masa, por lo que, al utilizar cal, la formulación fue de 39 % de material y 4 % de aglutinante y con el almidón fue de 34 % de material y 9 % de aglutinante, en ambos casos se utilizó 57 % de agua (tabla VI). Después del pesaje de material, se agregaron 200 ml de agua para realizar la mezcla y obtener una consistencia pastosa.

Al tener la mezcla, esta se introdujo en un molde de acero inoxidable, el cual sirvió de base para realizar la compresión. La presión ejercida sobre la mezcla fue de 5 toneladas de fuerza, ejercidas perpendicularmente a la mezcla, para lo cual se utilizó una prensa hidráulica y la misma presión fue aplicada

durante 10 minutos. Posteriormente, se procedió a la extracción del densificado del molde y se realizó un secado inducido, utilizando un horno a una temperatura de 60 °C por 8 minutos. Se utilizaron los mismos parámetros de fuerza de compresión y temperatura de secado en todos los densificados elaborados.

Luego del proceso de secado, se obtuvieron las diferentes briquetas (producto final), a las cuales se les realizó un análisis sensorial antes y después de la combustión (tabla VII). Antes de ser quemadas, ninguna briketa tuvo mal olor, fueron prácticamente inodoras y su textura era suave, a excepción de las de tetrabrik, ya que su textura fue rugosa. El color de las briquetas fue café oscuro, en el caso de las de vacasa y desechos sólidos orgánicos; color café claro, las de aserrín y de varios colores, las de tetrabrik. Después de la combustión, el aspecto de las briquetas se tornó a un color negro, con un olor natural, a excepción de las briquetas con tetrabrik y la de 100 % vacasa, que tuvieron un olor irritante y desagradable. El color del humo desprendido por las briquetas fue gris y únicamente 4 briquetas tuvieron flama (aserrín-almidón y las de tetrabrik). La briketa que se quemó más rápidamente fue la de 100 % de aserrín, siendo la más inflamable y, por el otro lado, la briketa que tuvo la combustión más lenta fue la de desechos sólidos orgánicos- almidón.

En la figura 13 se muestran los porcentajes de humedad eliminados en las briquetas después del secado en el horno a una temperatura de 60 °C durante 8 minutos, obteniendo el máximo porcentaje de humedad eliminado en la briketa de 100 % de aserrín, debido a que el agua pudo desprenderse de una manera más fácil del aserrín y fue la que absorbió más cantidad de agua en el proceso de compactación con un 24,76 %. Caso contrario lo que sucedió con la briketa de desechos sólidos orgánicos-cal, en la que únicamente se logró eliminar un 2,03 %, primero porque al realizar el proceso de compactación se

desprendió una considerable cantidad de agua, por lo que, al ser sometida al calor la briqueta, poca agua contenía. Por eso, es muy importante cambiar el tiempo y temperatura de secado para cada briqueta, porque la adhesión de las partículas con el agua no es igual.

La densidad de los biocombustibles está afectada por el contenido de humedad de las briquetas. En la figura 14 se muestra el comportamiento de las distintas briquetas, con base en la densidad. Se obtuvo mayores densidades en las briquetas de vacasa y tetrabrik, las cuales no tienen ninguna relación en el momento de comparar los datos del porcentaje de humedad eliminados, ya que la briqueta con mayor densidad es la de vacasa con cal, lo que quiere decir que el material, el aglutinante y el agua lograron formar el mejor densificado en relación a la densidad. Se puede apreciar que, en el caso del tetrabrik, esta briqueta tiene los valores más constantes y más altos de densidad con  $0,830 \text{ g/cm}^3$ ,  $0,784 \text{ g/cm}^3$  y  $0,634 \text{ g/cm}^3$ ; siendo el primero con almidón, el segundo con cal y el último, únicamente con agua. Al utilizar los distintos aglutinantes, no existe diferencia significativa, al contrario, los valores son muy cercanos en todas las briquetas.

Se realizaron las pruebas de poder calorífico y se compararon en la figura 15. Se observa que, en las briquetas de vacasa, se obtiene un poder calorífico mayor en la briqueta de 53 % vacasa con un valor de  $12\,405 \text{ J/kg}$ , a pesar de tener la menor densidad y un valor menor en la briqueta vacasa-almidón con  $8\,101 \text{ J/kg}$  de poder calorífico, esto debido a que la vacasa tiene un alto contenido de materia orgánica vegetal. En el caso de las briquetas con aserrín, sucede lo mismo, obteniendo un mayor poder calorífico sin utilizar ningún aglutinante, con un valor de  $17\,358 \text{ J/kg}$ , pero con una mínima diferencia con la briqueta con almidón, que obtuvo un valor de  $17\,215 \text{ J/kg}$ , es más bajo el poder calorífico en la briqueta con cal, debido a que la cal no es combustible. Caso

contrario lo que sucedió con las briquetas de desechos sólidos orgánicos en las que se obtuvo un mejor rendimiento de poder calorífico en la briketa con cal, con un valor de 11 691 J/kg debido a que logró una mejor adhesión de partículas.

Con base en los valores de poder calorífico con tetrabrik, se determina que el tetrabrik es el material más combustionable, debido a que se obtuvo el máximo poder calorífico en la briketa con almidón, siendo este un valor de 26 011 J/kg. Se obtuvieron los valores más altos de poder calorífico en las briquetas de tetrabrik debido a que el tetrabrik está compuesto por una capa de aluminio, una capa de papel *kraft* (procedente de celulosa virgen) y tres capas de plástico polietileno, un polímero plástico altamente combustible. El aglutinante con el cual se logró mejores resultados en el poder calorífico fue el almidón.

Uno de los factores más importantes para la elaboración de briquetas, es la resistencia a la compresión, porque ayuda a saber si el producto puede ser almacenado sin ningún problema. Antes de realizar los ensayos, se esperó un tiempo de 10 meses de anaquel, para saber en realidad qué briquetas pueden permanecer compactas por más tiempo y sin sufrir un proceso de descomposición, aunque influye la humedad, pero depende del lugar y forma de almacenamiento. Analizando la figura 16, se observa la comparación de los distintos esfuerzos de cada briketa, obteniendo los mejores valores en las briquetas de tetrabrik, debido a que el polietileno tiene una alta capacidad de recuperación frente a impactos y tiene una gran flexibilidad. Se obtuvo el máximo esfuerzo en la briketa con 53 % de tetrabrik, con un valor de 26,797 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual significa que soportó una carga de 450 kg. La briketa que soportó menos carga y la cual tuvo un menor esfuerzo fue la briketa de aserrín con cal con un valor de 14,428 kg/cm<sup>2</sup>.

Únicamente se realizó el ensayo a 5 briquetas, ya que únicamente estas cumplían con los requisitos de altura mínima, después del tiempo de anaquel y el costo del ensayo tenía un alto valor económico. Los ensayos fueron realizados con un equipo llamado Baldwin Lima-Hamilton, en la sección de Metales y Productos Manufacturados del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Con base en los resultados mostrados en las figuras 13, 14 y 15, junto con la tabla VIII, se determinó que la formulación más apta para la realización de briquetas en función de sus propiedades y el costo de producción es la briqueta con 34 % de tetrabrik, 9% de almidón y 57 % de agua; siendo estos sus resultados: poder calorífico 26 011 J/kg, densidad 0,830 g/cm<sup>3</sup>, humedad eliminada del 17,31 % y una resistencia a la compresión de 23,175 kg/cm<sup>2</sup>. Realmente, el costo de producción de las briquetas es mínimo, porque se realiza con desechos. Razón por la cual se hace llamar un biocombustible, porque se elabora a partir de la biomasa y se produce energía renovable, que es la energía que se produce con los recursos inagotables de la naturaleza.

Por último, se elaboró un análisis de varianza Anova de un solo factor con un intervalo de confianza del 99 % para cada una de las propiedades. Al realizar el análisis se concluye que para las propiedades de poder calorífico, densidad y humedad eliminada, no existe diferencia significativa al utilizar los distintos aglutinantes, por lo que, se acepta la hipótesis nula. Al encontrar una formulación adecuada para la elaboración de briquetas con los aglutinantes, se demostró que los resultados en las propiedades no afecta, independientemente el aglutinante que se utiliza. Por otro lado, no se pudo realizar el análisis de varianza para la resistencia a la compresión, debido a que no se lograron tomar los resultados de todas las briquetas.

## CONCLUSIONES

1. Se determinó el efecto de dos aglutinantes (cal y almidón) sobre las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de briquetas elaboradas con aserrín, vacasa, desechos sólidos orgánicos y tetrabrik.
2. La formulación material-aglutinante más adecuada para la elaboración de briquetas fue de 9 % de almidón con 34 % de material y 4 % cal con 39 % de material, en ambos casos utilizando el 57 % de agua. Con esta formulación se logró la mejor cohesión de las partículas del densificado y fue fácil la extracción del molde.
3. Antes de la combustión, todas las briquetas fueron inodoras, la mayoría color café y de textura lisa, a excepción de las briquetas de tetrabrik. Después de la combustión, las briquetas expidieron un olor no irritante, a excepción de las briquetas de tetrabrik, y todas quedaron totalmente carbonizadas.
4. Las propiedades evaluadas fueron el porcentaje de humedad eliminada, el poder calorífico, la resistencia a la compresión y la densidad. Teniendo la briqueta de aserrín el porcentaje más alto de humedad eliminada con 24,76 %; la briqueta de tetrabrik con almidón el mayor poder calorífico con 26 011 J/kg; la máxima resistencia a la compresión, la briqueta de tetrabrik con un valor de 26,797 kg/cm<sup>2</sup> y la mayor densidad, la briqueta de vacasa con cal, siendo esta de 1,021 g/cm<sup>3</sup>.

5. Al comparar las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de las briquetas, así como el costo para producirlo, se concluye que la briqueta de tetrabrik con almidón tuvo el mayor rendimiento, teniendo un valor de poder calorífico de 26 011 J/kg, una densidad de 0,83 g/cm<sup>3</sup>, un porcentaje de 17,31 % de humedad eliminada y una resistencia a la compresión de 23,175 kg/cm<sup>2</sup>.
  
6. Con un intervalo de confianza del 99 % y una f de Fisher con valores de 0,158538 < 8,021517 con respecto al poder calorífico, 1,452517 < 8,021517 con respecto a la densidad y 0,166164 < 8,021517 con respecto a la humedad eliminada, se concluye que todas son propiedades fisicoquímicas que no se ven afectadas significativamente por el aglutinante utilizado.

## RECOMENDACIONES

1. Al utilizar el almidón como aglutinante se debe utilizar agua caliente, ya que el almidón al mezclarse con agua fría, forma una suspensión temporal y los gránulos se hinchan ligeramente, caso contrario, cuando el almidón se cuece, el hinchamiento es irreversible, lo cual permite que el almidón se utilice como espesante.
2. Se propone utilizar aglutinantes a partir de las resinas fenólicas de los almidones provenientes de los vegetales, en algunos casos modificados y de las arcillas. Los aglutinantes como las resinas presentan mejores propiedades de flexibilidad y resistencia en las operaciones de corte o desbaste y los aglutinantes que provienen de vegetales presentan mejores propiedades de cohesión para compactar biomasa.
3. Se puede dar más tiempo en el proceso de compactación para que, en el momento de la extracción de la briqueta del molde, no exista ninguna rotura o deformación de la misma.
4. Preferentemente, se debe realizar un secado natural y no un secado inducido, ya que los materiales no son iguales; algunos materiales necesitan menos tiempo de secado, por lo que puede quebrarse la briqueta, en otros casos, puede necesitar más tiempo y no se logra un secado completo.
5. En el caso de los desechos sólidos orgánicos, se recomienda utilizar un tamaño de partícula mayor para que se compacte de una mejor forma.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ARPI, Jorge. *Diseño de una máquina pelletizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros de la ciudad de Cuenca para su aprovechamiento energético*. [en línea]. <dspace.ups.edu.-ec/bitstream/123456789/832/13/UPSCT001696.pdf>. [Consulta: 30 de octubre del 2013].
2. GONZÁLEZ L., Raúl. *Producción de materiales de construcción y energía a partir de desechos orgánicos: el bloque sólido combustible*. [en línea]. <<http://www.ecosur.org/index.php/publicaciones/category/3-tesis>>. [Consulta: 2 de noviembre de 2013].
3. HERNÁNDEZ ÁVILES, Joe Ralph. *Estudio técnico para la obtención de briquetas de fácil encendido a partir de carbón de la cascarilla de Palma Africana y su producción en la Empresa Tysai, S.A.* [en línea]. <dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1740/1/85T-00188.pdf>. [Consulta: 1 de noviembre de 2013].
4. LOMAS ESTEBAN, José María. *Valoración de la biomasa en el País Vasco*. [en línea]. <<http://www.eve.es/CMSPages/GetFile.aspx?guid=8512077b-883d-4239-8ab9-39e2aeba2bca>>. [Consulta: 2 de noviembre de 2013].

5. TRAÑA S., Cristóbal. *Aprovechamiento de la biomasa (raquis) como combustible para incrementar la producción de energía térmica (vapor) en la caldera*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 40 p.
  
6. VALDERRAMA, Andrés. *Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica en cocinas no convencionales*. [en línea]. <<http://es.scribd.com/doc/116960058/briquetas-de-residuos-solidos-organicos-como-fuente-de-energia-calorifica-en-cocinas-no-convencionales#scribd>>. [Consulta: 30 de octubre de 2013].
  
7. WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Roig Vázquez, Pablo Eduardo (Ed). 6a ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1999. 403 p. ISBN: 9701702646.

## APÉNDICES

### Apéndice 1. Caracterización de materia prima

Materia prima	Tamaño de partícula # de tamiz
Vacasa	>#100
Aserrín	>#100
DSO	>#100
Tetrabrik	>#100
Almidón	>#100
Cal	>#100

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 2. Propiedades físicas de las briquetas

Aglutinante	Material	Masa	Diámetro	Altura
		kg	m	m
Almidón	Vacasa	0,163	0,042	0,041
	Aserrín	0,165	0,045	0,053
	DSO	0,156	0,048	0,115
	Tetrabrik	0,150	0,044	0,065
Cal	Vacasa	0,169	0,040	0,053
	Aserrín	0,166	0,045	0,062
	DSO	0,200	0,055	0,129
	Tetrabrik	0,169	0,046	0,120
Sin Aglutinante	Vacasa	0,164	0,046	0,062
	Aserrín	0,108	0,047	0,114
	DSO	0,045	0,052	0,050
	Tetrabrik	0,196	0,047	0,135

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Propiedades fisicoquímicas y mecánicas de las briquetas**

Aglutinante	Material	Poder calorífico bruto	Densidad aparente	Humedad eliminada	Esfuerzo
		J/kg	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/cm <sup>2</sup>
Almidón	Vacasa	8 101	2 875,89	2,810	----
	Aserrín	17 215	1 952,35	3,840	----
	DSO	10 103	750,266	7,540	----
	Tetrabrik	26 011	1 515,96	17,31	23,175
Cal	Vacasa	10 499	2 541,96	8,710	19,298
	Aserrín	15 249	1 684,77	2,650	14,428
	DSO	11 691	652,402	2,030	----
	Tetrabrik	16 278	847,571	14,15	26,555
Sin Aglutinante	Vacasa	12 405	1 588,34	7,150	----
	Aserrín	17 358	544,937	24,76	----
	DSO	8 356	421,147	3,950	----
	Tetrabrik	15 960	837,980	3,920	26,797

Fuente: elaboración propia, con base en los anexos.

Apéndice 4. **Tabulación de promedio de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los aglutinantes en las briquetas**

Aglutinante	Poder calorífico bruto	Densidad aparente	Humedad eliminada	Esfuerzo
	J/g	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/cm <sup>2</sup>
Almidón	15 357,5	1 773,62	7,875	23,175
Cal	13 429,3	1 431,68	6,885	20,094
Sin Aglutinante	13 519,8	848,101	9,945	26,797

Fuente: elaboración propia, a partir de los valores del apéndice 3.

Apéndice 5. **Análisis Anova de cada propiedad fisicoquímica**

Propiedad\ Análisis Anova	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Valor teórico de F
<b>Poder calorífico</b>	Tratamientos	9 471 551, 17	2	4 735 775,58	0,158538765	8,02151731
	Error	268 842 641	9	29 871 404,5	-	-
	Total	278 314 192	11	-	-	-
<b>Densidad</b>	Tratamientos	1 752 082,54	2	876 041,27	1,452517377	8,02151731
	Error	5 428 073,74	9	603 119, 3	-	-
	Total	7 180 156,28	11	-	-	-
<b>Humedad eliminada</b>	Tratamientos	19,5048	2	9,7524	0,166164572	8,02151731
	Error	528,221	9	58,691	-	-
	Total	547,726	11	-	-	-

Fuente: elaboración propia, a partir de apéndice 3.

Apéndice 6. **Costo del proyecto de graduación**

Detalle	#	Unidad	Subtotal
<b>Materia prima</b>			
Vacasa	-	-	-
Aserrín	-	-	-
DSO	-	-	-
Tetrabrik	-	-	-
Almidón	5	1 lb / Q 3,00	Q 15,00
Cal	5	1 lb / Q 4,50	Q 22,50
<b>Procesamiento de materia prima</b>			
Prensa hidráulica	1	Q 1 400,00	Q 1 400,00
Horno	1	Q 1 200,00	Q 1 200,00
Molde	1	Q 100,00	Q 100,00
<b>Análisis fisicoquímicos</b>			
Poder calorífico	12	Q 70,00	Q 840,00
esfuerzo	5	Q 212,00	Q 1 060,00
Densidad relativa	-	-	-
<b>TOTAL</b>			<b>Q 4 637,50</b>

Fuente: elaboración propia.

Costo briquetas con cal: Q 1,35

Costo briquetas con almidón: Q 1,25

Apéndice 7. **Fotografías de la realización de densificados aserrín aglutinante**



Fuente: Laboratorio de Sección de Tecnología de la madera, Fiusac.

Apéndice 8. **Fotografías de realización de ensayos de resistencia a la compresión**



Fuente: Laboratorio de Sección de Tecnología de la madera, Fiusac.

Apéndice 9. **Tabla para datos: caracterización de materia prima**

<b>Materia prima</b>	<b>Tamaño de partícula # de tamiz</b>
<b>Vacasa</b>	
<b>Aserrín</b>	
<b>DSO</b>	
<b>Tetrabrik</b>	
<b>Almidón</b>	
<b>Cal</b>	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Tabla para datos: tabulación de propiedades físicas de las briquetas**

<b>Aglutinante</b>	<b>Material</b>	<b>Masa</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Altura</b>
		<b>kg</b>	<b>m</b>	<b>m</b>
<b>Almidón</b>	<b>Vacasa</b>			
	<b>Aserrín</b>			
	<b>DSO</b>			
	<b>Tetrabrik</b>			
<b>Cal</b>	<b>Vacasa</b>			
	<b>Aserrín</b>			
	<b>DSO</b>			
	<b>Tetrabrik</b>			
<b>Sin Aglutinante</b>	<b>Vacasa</b>			
	<b>Aserrín</b>			
	<b>DSO</b>			
	<b>Tetrabrik</b>			

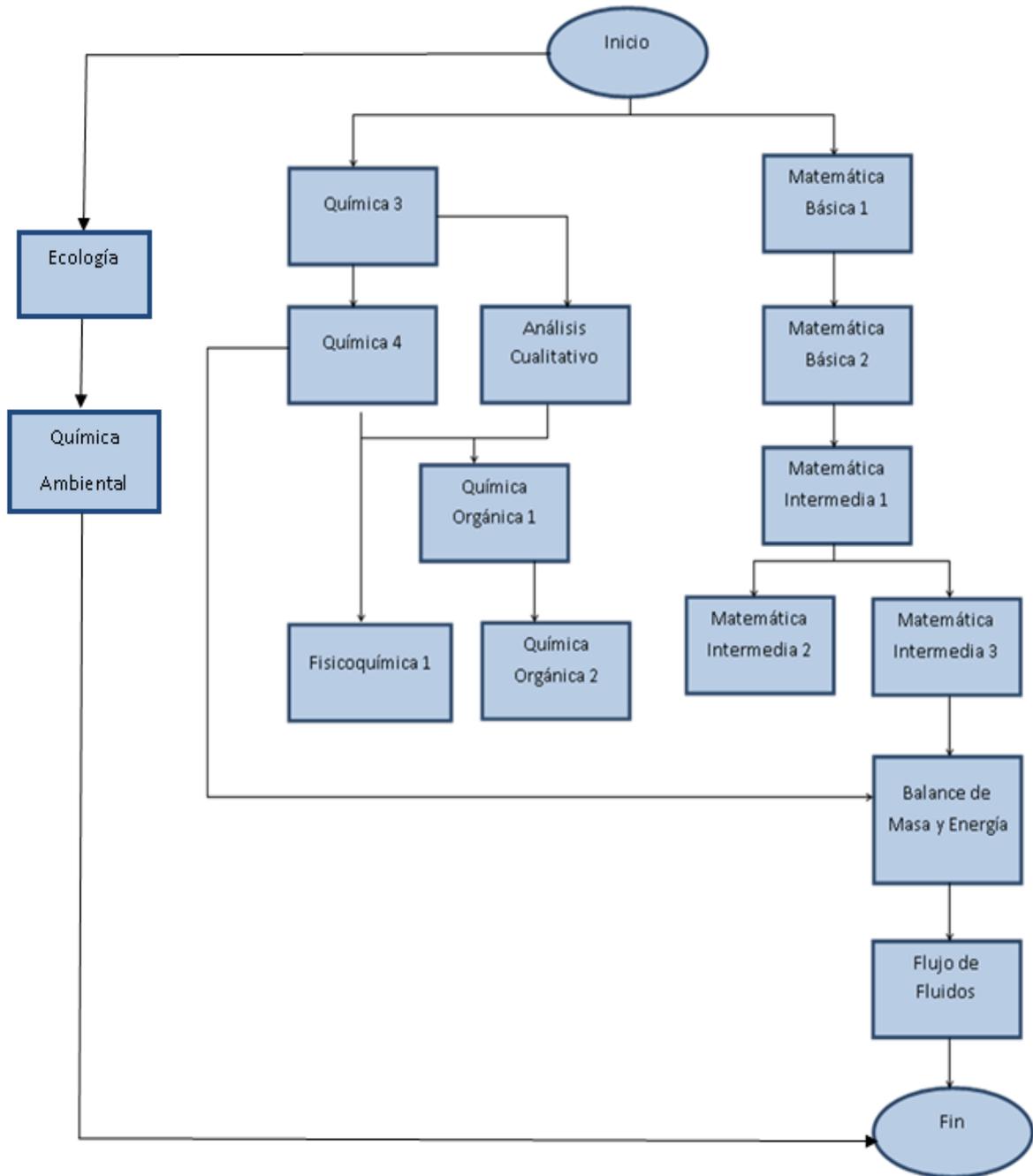
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Tabla para datos: promedio de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los aglutinantes en las briquetas**

Aglutinante	Poder calorífico bruto	Densidad aparente	Humedad eliminada	Esfuerzo
	J/kg	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/cm <sup>2</sup>
Almidón				
Cal				
Sin Aglutinante				

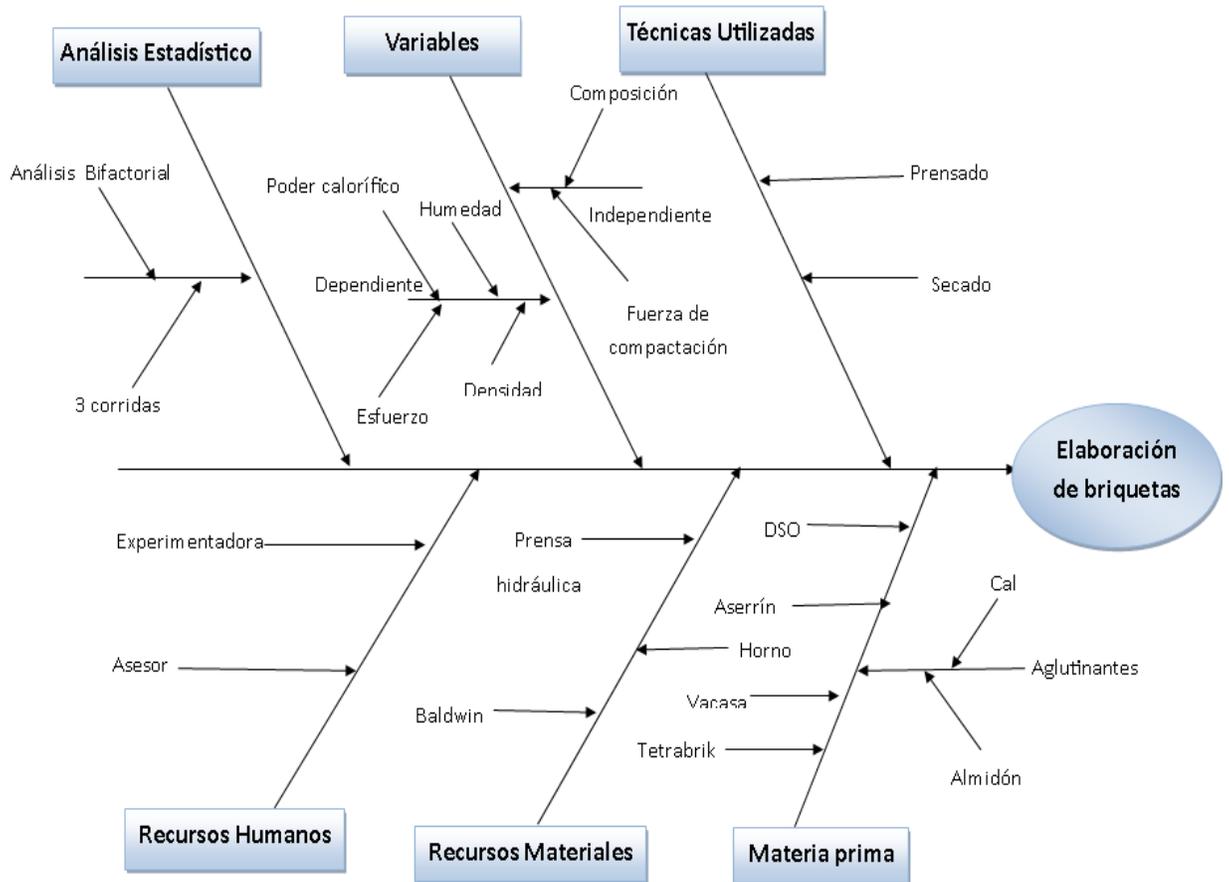
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. Diagrama de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 17. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.



# ANEXOS

## Anexos 1. Informe de resultados obtenidos en laboratorio de Recursos Alternativos, Proverde



Laboratorio de Recursos Alternativos (AFR)  
Tel (502) 7952 8000 ext. 7553  
Fax (502) 2338 9112 y 13

# REPORTE

---

<b>Solicitado:</b>	<b>Copias Internas</b>
Ana Lucia Martinez Maldonado	No. : AFR Lab-2015-01_Tesis_USAC
	Fecha: 21/enero/2015

---

**Asunto:** INFORME DE ANALISIS DE COMBUSTIBLES<sup>1</sup>

**Identificación de Muestra Externa:**

01 a 12

**Pruebas Solicitadas:**

Análisis de Poder calorífico

**Resultados de Análisis Solicitados:**

FECHA	ID MUESTRA	PODER CALORIFICO BRUTO J/G
08.01.2015	MUESTRA #1	10,499
08.01.2015	MUESTRA #2	15,249
08.01.2015	MUESTRA #3	26,011
08.01.2015	MUESTRA #4	8,101
08.01.2015	MUESTRA #5	17,215
08.01.2015	MUESTRA #6	17,358

FECHA	ID MUESTRA	PODER CALORIFICO BRUTO J/G
08.01.2015	MUESTRA #7	12,405
08.01.2015	MUESTRA #8	16,278
08.01.2015	MUESTRA #9	15,960
08.01.2015	MUESTRA #10	10,103
08.01.2015	MUESTRA #11	11,691
08.01.2015	MUESTRA #12	8,356

Metodologías Empleadas:  
1 ASTM D6468-02(2007)

  
**Revisado por: Sergio Eduardo Santos**  
 Químico, Colegiado 1911  
 Jefe de Laboratorio AFR

Fuente: Laboratorio de Recursos Alternativos, Proverde, Cementos Progreso.

Anexos 2. **Informe de resultados obtenidos en el Laboratorio de Sección de Metales y Productos Manufacturados, Fiusac**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No.276-M O.T. No.34912

INTERESADO: ANA LUCIA MARTINEZ, CARNE No. 200914927  
 PROYECTO: TESIS "EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE LA VACASA, ASERRIN, DESECHOS SOLIDOS Y TETRABRICK EN LA ELABORACION DE BRIQUETAS UTILIZANDO YUQUIA Y CAL COMO AGLUTINANTE".  
 FECHA: GUATEMALA, 17 DE JUNIO DE 2015.

---

**Antecedentes**

La estudiante **ANA LUCIA MARTINEZ MALDONADO** de la carrera de Ingeniería Química solicita a este Centro de Investigaciones de Ingeniería que se realizara, ensayo de compresión a 12 probetas. Los ensayos en cuestión son parte del trabajo de tesis, "EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE LA VACASA, ASERRIN, DESECHOS SOLIDOS Y TETRABRICK EN LA ELABORACION DE BRIQUETAS UTILIZANDO YUQUIA Y CAL COMO AGLUTINANTE".

**Resultados**

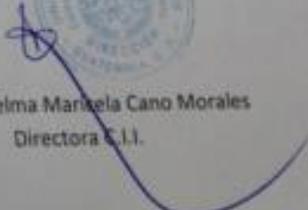
Datos calculados

No.	Identificación	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
1	Vacora con cal	4.449	4.380	300	19.298
2	Aserrin con cal	4.697	5.259	250	14.428
3	Tetrabrick con almidón	4.539	6.658	375	23.125
4	Tetrabrick con cal	4.645	104.82	450	26.555
5	Tetrabrick	4.624	7.623	450	28.797



M.Sc. Ing. Pablo Christian De León Rodríguez  
 Jefe Sección Metales y Productos Manufacturados  
 /cbr

Atentamente,



Vo.Bo. Ing. Telma Mariela Cano Morales  
 Directora C.I.I.

Fuente: Laboratorio de Sección de Metales y Productos Manufacturados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Fiusac.