

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
SEDE “CARLOS RAFAEL RODRIGUEZ”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO

Título: “Fabricación de briquetas de carbón vegetal utilizando como aglutinantes jugo de henequén y miel final.”

Autora:

Liany de la Caridad Cabrera Cosme

Tutor:

Ing. Iván Orlando Almanza Stable

Cienfuegos, 2018

DECLARATORIA DE AUTORIDAD

Por la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma titulado: *“Fabricación de briquetas de carbón vegetal utilizando como aglutinantes jugo de henequén y miel final”* y por este medio reconozco al Departamento de Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cienfuegos con todos los derechos patrimoniales del mismo. Para que así conste firmamos la presente a los _____ días del mes de _____ del _____.

Autor: Liany de la Caridad Cabrera Cosme

Tutor: Ing. Iván Orlando Almanza Stable

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referente a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Vicedecano

PENSAMIENTO

“La ciencia son hechos; de la misma manera que las casas están hechas de piedras, la ciencia está hecha de hechos; pero un montón de piedras no es una casa y una colección de hechos no es necesariamente ciencia.”

(Henri Poincaré)



DEDICATORIA

A mis padres Izaida y Daniel, por su apoyo incondicional en la realización de todos mis proyectos, a mis abuelos, a mis tíos, a todos los que de una forma u otra presenciaron mi esfuerzo, y confiaron en mí siempre. A mis amigos, de cerca o de lejos, que estuvieron pendientes de mí y apoyándome en mi trayecto. A todos los profesores que de alguna manera influyeron en mí, en toda mi vida estudiantil. A mi tutor, que me ayudó hasta el final, a sangre y fuego.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo proponer una formulación para la fabricación de briquetas de carbón vegetal empleando como aglutinantes los residuales de la Empresa Henequenera Juraguá y la UEB “Elpidio Gómez”, para la realización de la misma se fabricaron briquetas a partir de la carbonilla con diferentes composiciones de aglomerante, con el fin de evaluar las propiedades físico químicas de las briquetas conformadas se aplicaron técnicas sensoriales y estadística, y mediante un diseño de experimento de mezcla se analizaron los valores de los indicadores como son: densidad, tiempo de secado, resistencia al impacto, valor calórico, generación de cenizas, porcentaje de humedad y tiempo de combustión, determinándose los siguientes resultados, las briquetas con composición 60 % de carbonilla, 30 % de jugo de henequén y 10 % de miel final poseen las mejores propiedades, en la análisis costo beneficio realizado al proceso de fabricación demostró que posee un beneficio de 691 000 CUC por cada 1 000 t de briquetas.

Abstract

The objective of this research was to propose a formulation for the manufacture of charcoal briquettes using as binders the residuals of the Henequenera Juraguá Company and the UEB "Elpidio Gómez", for the realization of the same briquettes were made from the char with different binder compositions, in order to evaluate the physical and chemical properties of the shaped briquettes, sensory and statistical techniques were applied, and by means of a mixing experiment design, the values of the indicators were analyzed, such as: density, drying time, resistance to the impact, caloric value, generation of ash, percentage of humidity and time of combustion, determining the following results, the briquettes with composition 60% of char, 30% of henequen juice and 10% of final honey possess the best properties, in The cost-benefit analysis carried out on the manufacturing process showed that a profit of 691,000 CUC for every 1 000 t of briquettes.

Índice

Resumen.....	5
Abstract.....	6
Introducción.....	9
Marco Teórico.....	12
1.1 Carbón vegetal. Generalidades.....	12
1.1.1. Otras materias para producir carbón vegetal.....	14
1.1.2. Características y usos del carbón vegetal.....	15
1.1.3. Producción de carbón vegetal en Cuba.....	15
1.1.4. Calidad del carbón vegetal.....	16
1.2. Briquetas. Generalidades.....	19
1.2.1. Características de las briquetas.....	20
1.2.2. Materia Prima para la fabricación de briquetas.....	21
1.2.3. Aglutinantes.....	22
1.2.4. Métodos de aglomeración utilizando carbonilla como residuo del carbón vegetal.....	29
1.2.5. Aspecto económico de las briquetas.....	30
1.3. Diseño de experimento para la fabricación de briquetas.....	31
Capítulo 2. Procedimiento para la evaluación de briquetas a partir de la carbonilla.....	33
2.1. Fabricación de briquetas de carbón vegetal utilizando jugo de henequén y miel final.....	33
2.1.1. Variables del Proceso.....	33
2.3 Delimitación de campo de Estudio.....	35
2.4. Recursos y materiales utilizados.....	35
2.4.1. Caracterización del carbón vegetal en polvo (carbonilla).....	36
2.5. Técnica sensorial y cuantitativa.....	36
2.6 Recolección y ordenamiento de la información:.....	37
2.6.1 Método de formulación.....	37
2.6.2 Método de obtención de Briquetas.....	38
2.7. Diseño de experimento.....	38
2.7.1. Procedimientos de análisis sensorial y cuantitativos de evaluación.....	40

2.7.2. Técnicas sensoriales	40
2.7.3 Técnicas cuantitativas	41
2.8 Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	42
2.8.1. Tabulación de información	42
2.9. Análisis estadístico.....	42
Capítulo 3. Análisis de los resultados	45
3.1 Caracterización de las Materias Primas.....	45
3.1.1. Preparación de la carbonilla	45
3.1.2 Prueba de tamizado.	46
3.1.3 Determinación de las mezclas empleadas.	48
3.1.4 Molde para la fabricación de la briqueta a escala de laboratorio	49
3.2. Análisis de los resultados de las técnicas sensoriales y cuantitativas en la fabricación de briquetas	50
3.2.1 Análisis sensorial.....	50
3.2.2 Análisis cuantitativo de las variables independientes y dependientes.	51
3.2.3. Análisis estadístico de las variables independientes y dependientes	63
3.3. Consideraciones ambientales, sociales y económicas	68
Conclusiones	71
Bibliografía.....	73
Anexos	76

Introducción

Los residuos sólidos son actualmente un problema ambiental, pues a medida que aumenta la población la generación de residuos sólidos se incrementa debido al consumo de productos y de energía. En nuestro caso de estudio los residuos sólidos se incrementan debido a la exportación de carbón vegetal hacia los países europeos generando divisas al país.

El transporte y la manipulación del carbón vegetal producen carbonilla fina que puede alcanzar el 10 %, en peso, en la mejor de las circunstancias, y el 20 % o más, en el peor de los casos. Cuanto más el carbón vegetal se elabora y cuantas más son las etapas de transporte, tanta más carbonilla será producida. En la actualidad la utilización de los residuos de este proceso tiene cierto grado de desaprovechamiento, la carbonilla o virutas de carbón se almacenan en grandes espacios físicos sin ser utilizada. Una de las vías para utilizar estos residuos es convirtiéndolos en pellets o briquetas, conocidos también como biocombustibles sólidos densificados (FAO, 1983).

La exportación de carbón vegetal requiere productos de alta calidad para insertarse en el mercado mundial provocando que el carbón vegetal que no cumple con los parámetros de calidad se convierta en residuo.

Uno de los principales usos del residuo del carbón vegetal (carbonilla) es la producción de briquetas o pellets para producir energía en forma de calor. Actualmente, cada vez son más las naciones que implementan nuevas técnicas y tecnologías para el aprovechamiento de sus recursos energéticos.(Becerra & Balseca, 2017)

El término "briqueta" es un término confuso porque puede estar fabricada con diversos materiales compactados. La materia prima de la briqueta puede ser biomasa forestal, biomasa residual industrial, biomasa residual urbana, carbón vegetal o simplemente una mezcla de todas ellas, generalmente están hechas con materia residual, como madera, cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar, residuos de pulpa de papel, papel, cascara de coco, residuos de algodón, cartón y carbón; se aglomeran con agua, aunque en algunos casos con otros residuos orgánicos (Da Silva, 2013).

Para la obtención de briquetas, es necesaria la presencia de un aglutinante, el cual se encarga de brindar la humedad precisa para lograr la compactación del carbón

convertido en polvo. La variedad del aglomerante se puede obtener de residuos de industrias como la azucarera, la de almidón, de resinas sintéticas lo cual contribuye una vez más a disminuir la contaminación. Los aglutinantes usados en las briquetas de carbón vegetal pueden clasificarse como emisores y no emisores de hollín, además deben elegirse objetivamente ya que representan una porción significativa de la composición de la briqueta, además de que el humo y el olor que algunos despiden durante su quemado es indeseable (Becerra & Balseca, 2017)

En Cienfuegos la producción de carbón vegetal ha crecido los dos últimos años, convirtiendo a esa provincia en la segunda del país que más aporta a los mercados foráneos, con varias zonas destinadas a su fabricación en la Empresa Forestal, la Empresa Henequenera Juraguá, el polo del Circuito Sur y Horquita, entre otras (Molina, 2017).

En el 2016 comenzaron a realizarse las primeras ideas conceptuales sobre la producción de carbón vegetal y briquetas envasado en formatos pequeños para la UEB Acopio Abreus. Esta idea hoy es una propuesta en la carpeta de negocios del MINVEX (González, & Ramos, 2016)

Atendiendo a todo lo anterior se tiene como objeto de estudio de la investigación: proponer una formulación para la fabricación de briquetas utilizando la carbonilla, jugo de henequén y miel final, los cuales tienen entre su composición productos que pueden emplearse como aglutinantes y dentro de este contexto el problema de investigación, hipótesis y objetivos que se plantean son los siguientes:

Problema científico:

En la literatura consultada y los sitios web revisados en internet, no se presenta visible al menos, una formulación para la producción de briquetas de carbón vegetal a partir de jugo de henequén y miel final como aglutinantes.

Objetivo general:

Proponer una formulación para la fabricación de briquetas de carbón vegetal utilizando como aglutinantes jugo de henequén y miel final.

Objetivos específicos:

1. Establecer los fundamentos teóricos que permitan un estudio del empleo de aglutinantes en la fabricación de briquetas utilizando carbonilla como residuo del carbón vegetal.
2. Determinar mediante un diseño de experimento las variables que influyen en la calidad de las briquetas.
3. Proponer una formulación de las briquetas con el aglutinante según la mezcla utilizada.
4. Realizar un análisis costo-beneficio de la formulación propuesta.

Hipótesis

Si se evalúan las propiedades fisicoquímicas de briquetas elaboradas aprovechando la carbonilla, se logra identificar el mejor aglutinante a partir de jugo de henequén y miel final.

Con vistas a alcanzar los objetivos planteados en la investigación el trabajo se estructura en tres capítulos, conclusiones y recomendaciones.

En el Capítulo I, se establecen las bases teóricas acerca de la composición, tipos de briquetas, sus usos, así como los diferentes aglutinantes que se utilizan en su fabricación.

En el Capítulo II se detallan las características del diseño de experimento y se describen las técnicas utilizadas en la investigación para la evaluación de las propiedades fisicoquímicas siguientes: humedad eliminada, densidad, resistencia al impacto, tiempo de combustión, generación de cenizas y valor calórico.

En el Capítulo III se exponen los resultados de los ensayos realizados a las briquetas obteniendo la formulación ideal entre el biocombustible y el aglutinante y además se realiza un análisis costo-beneficio del proceso.

Marco Teórico.

1.1 Carbón vegetal. Generalidades.

El carbón vegetal como combustible sólido presenta la ventaja frente a la biomasa que le dió origen, de tener un valor calórico mayor o, lo que es lo mismo, un peso menor para igual cantidad de energía, lo que permite un transporte más fácil según la (Secretaria de Energía de Argentina, 2005). El carbón vegetal es el residuo sólido que queda cuando se carboniza la madera en condiciones controladas, en un espacio cerrado, como es el horno de carbón. El control se hace sobre la entrada del aire durante el proceso de pirólisis o de carbonización, para que la madera no se quemara simplemente en cenizas, como sucede en un fuego convencional, sino que se descomponga químicamente para formar el carbón vegetal. En realidad, no se requiere aire en el proceso; en efecto, los métodos modernos tecnológicos de producción de carbón de leña, no permiten ninguna entrada de aire; la consecuencia es un mayor rendimiento, ya que no se quema con el aire un exceso de madera y se facilita el control de la calidad (FAO, 1983).



Figura 1.1. Trozos de carbón vegetal

Fuente: (FAO, 2014)

El proceso, una vez iniciado, continúa por su cuenta y descarga notable cantidad de calor, sin embargo, esta descomposición por pirólisis o termal de la celulosa y de la

lignina, que constituyen la madera, no se inicia antes que la madera llegue a una temperatura de alrededor de 300 °C según (Hernandes, 2011). En la carbonera o fosa tradicional, se parte de la madera puesta en el horno que se quema para secar y aumentar la temperatura de la carga total de madera, para que la pirólisis se inicie y continúe hasta el final por su cuenta. La madera quemada de esta manera se pierde; en contraste, el éxito de las sofisticadas retortas continuas produciendo altos rendimientos de carbón vegetal de calidad, se debe a la forma ingeniosa por la cual emplean el calor de la pirólisis, normalmente desperdiciado, para elevar la temperatura de la madera que va llegando, de manera que se completa la carbonización sin quemar cantidades adicionales de madera, si bien se requiere una cierta cantidad de calor de impacto para compensar las pérdidas de calor a través de las paredes y otras partes del equipo. Para proporcionar este calor y para secar la madera puede quemarse el gas combustible de la madera soltado durante la carbonización de la misma. Todos los sistemas de carbonización ofrecen mayores eficiencias cuando son alimentados con madera seca, puesto que la eliminación del agua de la madera requiere grandes insumos de energía calorífica (FAO, 1983).

- Producción tradicional de carbón vegetal

Hasta principios del siglo XX la práctica totalidad del carbón vegetal se producía con métodos tradicionales. Se colocaba la leña en pozos excavados en la tierra, se le prendía fuego y se cubría con tierra. La combustión de parte de la madera producía bastante calor para carbonizar el resto. Otro método era cubrir con tierra y hierba montones de leña y prenderle fuego a través de aperturas en la cubierta de tierra (hornos de tierra). Las aperturas podían cerrarse y abrirse convenientemente, y podían practicarse otras para controlar la entrada de aire. Este método permitía controlar la combustión y la carbonización algo mejor que el del pozo. Ambas técnicas se siguen practicando en muchos países en desarrollo, sobre todo porque son baratas. No obstante, sus rendimientos son muy bajos (normalmente 1 kg de carbón vegetal a partir de 8 a 12 kg por lo menos de leña), la calidad no es uniforme (porque es difícil mantener una carbonización uniforme) y contaminan el medio ambiente al emitir alquitranes y gases venenosos.(Wolf ; Vogel, 1985)

- Métodos tradicionales mejorados

En los años setenta y ochenta del pasado siglo se consiguió mejorar la producción tradicional de carbón vegetal equipando los hornos de tierra con chimeneas hechas con bidones de petróleo (hornos Casamance) y construyendo pequeños hornos de acero o ladrillo. Con una buena práctica, son posibles rendimientos de 1 kg de carbón a partir de 4 a 5 kg de leña secada al aire. Más corrientes son rendimientos de 1 kg de carbón por 6 a 8 kg de leña. La ventaja de procedimientos que utilizan una cobertura sólida (metal, ladrillo u hormigón) es su cierre hermético, que minimiza el efecto de una mala supervisión y da resultados más uniformes. (Wolf ; Vogel, 1985)

- Tecnologías de producción industrial

La demanda industrial de carbón vegetal en el siglo XX suscitó nuevas tecnologías en mayor escala para mejorar el rendimiento y la calidad. Se concibieron diferentes tipos de hornos de ladrillo o metal de funcionamiento intermitente o retortas de funcionamiento continuo, que elevaron considerablemente el rendimiento (1 kg de carbón por 5 a 7 kg de leña) y produjeron un carbón mucho más uniforme con un mayor contenido de carbono fijo. (Wolf ;Vogel, 1985)

Muchas fábricas de este tipo funcionan todavía hoy en Europa y las Américas, pero la contaminación plantea un problema persistente. Las fábricas de carbón vegetal emiten grandes cantidades de humo, hollín y partículas de alquitrán, así como mal olor, y se consideran una amenaza para la salud.(Stassen, 2002)

1.1.1. Otras materias para producir carbón vegetal

Se emplean a veces para producir carbón vegetal otros materiales leñosos, como cáscaras de nueces y cortezas. Muchos residuos agrícolas pueden también producir carbón vegetal por pirólisis, pero el carbón que resulta es un polvo fino que debe generalmente ser aglomerado en briquetas, a un costo adicional, para la mayoría de los usos del carbón. De todos modos, estimular un uso más amplio de los residuos de las cosechas para la producción de carbón vegetal o aún para combustible, no es generalmente una práctica agrícola, si bien se ha realizado, como parte de una política agrícola racional, la quema de bagazo de caña de azúcar para proporcionar calor en la producción de azúcar, así como la quema en algunas regiones de los tallos de maíz y de pastos bastos para combustible casero, para suplir un beneficio general.(FAO, 1983)

1.1.2. Características y usos del carbón vegetal

El carbón vegetal es un producto sólido y poroso que contiene entre 85 y 98 % de carbón; se produce por calentamiento a temperaturas de 500 a 600 °C, en ausencia de aire, de materiales carbonosos como celulosa, madera, turba y carbones bituminosos o de menor nivel, el valor calorífico oscila entre 29.000 y 35.000 kJ/kg, y es muy superior al de la madera, que oscila entre 12.000 y 21.000 kJ/kg.(Ecured, 2017)

El carbón vegetal se usa mayoritariamente como combustible, no solo de uso doméstico sino también industrial, especialmente en los países en vías de desarrollo, también se emplea en la metalurgia y para la fabricación de pólvora. La pólvora negra se compone de un 75 % de salitre (nitrato de potasio), un 12 % de azufre y un 13 % de carbón vegetal.(Ecured, 2017)

Los carbones vegetales de celulosa o madera son suaves y desmenuzables. Se utilizan principalmente para decolorar soluciones de azúcar y otros alimentos, y para quitar sabores y olores desagradables del agua. Los carbones duros y densos se obtienen de la cascara de nuez y de la turba. Se utilizan en máscaras antigás, en la separación de mezclas en la industria química y, también, en el tratamiento terciario de aguas residuales, dado que adsorben en forma eficaz la materia orgánica y mejoran la calidad del agua (Ecured, 2017).

1.1.3. Producción de carbón vegetal en Cuba.

Plantas exóticas invasoras como el marabú y cítricos con plagas son la nueva materia prima en Cuba para hacer carbón vegetal, un producto artesanal muy demandado en Europa por su llama azul con poco humo y ceniza. En 2013, el país exportó 70 200 toneladas de biocarbón a Alemania, Bélgica, Canadá, España, Francia, Grecia, Italia, Israel, Portugal y Turquía, a unos 300 dólares por tonelada. Representó un gran salto con respecto a las más de 40 000 toneladas producidas en 2012 para el mercado interno y externo. Este combustible renovable, muy usado en las barbacoas familiares y en la restauración, es después del tabaco el rubro que más ganancias reporta al Ministerio de la Agricultura (Chicago, 2007).

Se estima que los impenetrables marabusales, de hasta cinco metros de altura y ramas espinosas, infecta el millón 46 100 hectáreas de tierras ociosas cubanas, lo que dificulta

recuperarlas para mejorar la deprimida agricultura local. El área infectada representa 10 % del territorio cubano y 18 % de las tierras agropecuarias. Por ello, en la última década en Cuba, la obtención del carbón se debe al aprovechamiento de este arbusto (*Dichrostachys cinerea*), originaria de África que es la más extendida de las 323 plantas exóticas invasoras identificadas por los científicos en el país. En el caso de la Empresa estatal Agroindustrial Cítricos Ceballos, en la ciudad de Ciego de Ávila, a 434 kilómetros al este de La Habana, líder de la exportación carbonera, aprovecha los árboles de cítricos que tala por envejecimiento o el azote de plagas (Chicago, 2007).

En Cuba se obtiene biocarbón mayormente en hornos de tierra, que se estructuran con grandes pilas de madera cubiertas de hierbas, tierra y troncos secos con aberturas para prenderle fuego. Si bien este método resulta barato, rinde solo un kilogramo de carbón vegetal por entre ocho y 12 kilogramos de leña, según el artículo “Nuevas tecnologías de producción de carbón vegetal”, del investigador holandés Hubert E. Stassen. La mayoría de los carboneros y leñadores en Cuba son independientes, algunos laboran por temporada y otros integran cooperativas agropecuarias o empresas agrícolas estatales. Entre las provincias con más auge de la actividad figuran las centrales Cienfuegos, Sancti Spíritus, Ciego de Ávila y Camagüey, y la oriental Holguín. Otros retos inmediatos son modernizar el sector del biocarbón, mejorar los centros de beneficio (mejora) del producto primario, garantizar más insumos y medios de protección a los productores, evitar atrasos en los pagos y atraer la fuerza joven (Chicago, 2007).

1.1.4. Calidad del carbón vegetal.

El mercado para el carbón vegetal, menos exigente desde el punto de vista de la calidad, es el doméstico. Las razones son que no puede medirse fácilmente su performance, es mínimo el poder del consumidor como individuo, de especificar y de obtener carbón vegetal de buena calidad, y hay una cierta compensación posible entre el precio y la calidad que el consumidor familiar usa para tener resultados satisfactorios. Sin embargo, esto no significa que no hay motivos para el control de calidad. Siempre que no se transforme en un obstáculo o burocráticamente contra productivo, un sistema sobre calidad del carbón vegetal para el uso casero, es una práctica justificada para asegurar el máximo rendimiento del recurso maderero, sin dejar de ofrecer una adecuada performance en el uso familiar. Por otra parte, los grandes usuarios, como es el caso de la industria siderúrgica por su propia experiencia e investigación, las propiedades que

buscan en el carbón vegetal deben asegurar que este se ajusta a sus especificaciones y produzca el hierro fundido con costos globales mínimos (FAO, 1983)

La mayoría de las especificaciones usadas para controlar la calidad del carbón vegetal se han originado en la industria del acero o química. Cuando el carbón se exporta, los compradores tienden a usar estas mismas especificaciones de calidad industrial aun si el principal destino del carbón vegetal importado pueda más bien ser para la cocina doméstica o asados. Debe tenerse en cuenta esta situación puesto que los requisitos industriales y domésticos no son siempre los mismos y una inteligente evaluación de los reales requisitos de calidad del mercado, pueden permitir surtir carbón vegetal más barato o en mayores cantidades, beneficiando sea al comprador como al vendedor (FAO, 1983).

En Cuba, las especificaciones de calidad para el carbón están estipuladas en la Norma Cubana (NC 580, 2008), la cual es aplicable a todas las entidades estatales, privadas y en cualquier modo de organización que realice esta producción, a continuación, se describen dichas especificaciones:

Tabla 1.1. Especificaciones de calidad del carbón vegetal.

Especificaciones	Selecta	Calidad	II
Diámetro (cm)	3-10	3-10	3-10
Largo (cm)	4-25	4-25	4-25
Carbonilla (%)	Máximo 5	Máximo 5	Máximo 6-10
Densidad aparente (g/cm ³)	0,25-0,35	0,25-0,30	0,20-0,30
Contenido de carbono (%)	>82	76-82	68-75

Humedad (% en masa)	Máximo 6	Máximo 6	Máximo 10
Cenizas (% en masa)	Máximo 3	Máximo 3	Máximo 5
Materia volátil (% en masa)	Máximo 10-15	Máximo 10-15	Máximo 20-25
Color	Negro brillante	Negro brillante	Negro brillante
Sonido	Metálico	Metálico	Metálico
Impurezas	No se admiten	No se admiten	No se admiten

Fuente: (NC 580, 2008).

Aun con un carbón vegetal de buena calidad su quema deberá ser eficiente para obtener sus mejores resultados. Este es especialmente válido en el uso doméstico, donde se quema la mayor cantidad de carbón vegetal. Los hornos industriales para quemar el carbón vegetal, tales como los altos hornos, cúpulas, hornos de precipitación etc., son por lo general diseñados y hechos funcionar con eficiencia. El empleo principal del carbón vegetal, en los hogares del mundo en vía de desarrollo, es para calentar agua, sea para cocinar la comida, sea para tener agua caliente para lavado, etc. (FAO, 1983).

Algunas comidas se cocinan directamente sobre el fuego sin sumergir en el agua, como para tostar el maíz o asar la carne. Un método de cocido sería 100 % eficiente si todo el calor, liberado al quemar el combustible, fuese tomado por el alimento que se cocina, lo que está lejos de suceder en la práctica. Un resultado típico, para equipos bien diseñados y hechos funcionar bien, es el de una eficiencia de alrededor del 30 %, significando que el 70 % del calor se pierde inútilmente. En un clima frío, puede capturarse parte de este calor desperdiciado y usarse para calentar el ambiente del cuarto, cumpliendo por lo tanto una función útil que hace aumentar la eficiencia global.

Teóricamente, es posible aumentar la eficiencia de la transferencia de calor, desde el carbón que arde al alimento, aumentando el costo y las complicaciones de la cocina, pero raramente resulta práctico. Quienes pudieran haberse permitido esta complicación no estarían generalmente quemando carbón vegetal sino algún otro combustible de mayor prestigio social o conveniencia. Es necesario llegar a un compromiso para obtener la mejor eficiencia posible, en concordancia con instalaciones de cocina sencillas y de bajo costo que puedan ser usadas por la mayor parte de los usuarios de carbón vegetal (FAO, 1983).

El carbón vegetal, contrariamente a la leña, transfiere una buena cantidad de su calor a las vasijas de cocina, por radiación desde la cama combustible ardiente. Con la leña ardiente, donde gases calientes son producidos por altas llamas perezosas, la transferencia de una buena cantidad de calor a las vasijas de cocina deberá ser por convección. Para la transferencia del calor por convección, los gases calientes deben tocar materialmente el recipiente, mientras que el calor radiante se transfiere por radiación infrarroja, emitida directamente por la cama ardiente y absorbida por la superficie de la vasija u otro objeto. Por lo tanto, la vasija debe estar en condiciones de ver el lecho ardiente para poder recoger y absorber la energía calorífica radiante (FAO, 1983).

1.2. Briquetas. Generalidades

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.(Maldonado, 2015)

Entre la materia prima para una briqueta combustible generalmente se encuentran residuos de industrias forestales (procedente de aserraderos, fábricas de puertas, muebles, tableros, etc.), agrícolas o ganaderos (cáscaras de café, coco, cascarilla de

arroz, etc.), residuos sólidos urbanos, carbón vegetal, o una mezcla de todos ellos.(Martin, 2015)

Los motivos por los cuales han sido desarrolladas son: para revalorizar un conjunto de residuos sólidos orgánicos que producían 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.(Cuenca, 2011)

La producción de briquetas es un proceso industrial que utiliza como materia prima una mezcla de “finos”, es decir polvo de carbón vegetal, ligados con aglutinantes orgánicos derivados de los cereales. Esta mezcla pasa a una prensa industrial donde se conforman las briquetas; se las seca, y posteriormente pasan a tolvas pesadoras para su envasado. Los procesos de prensado pueden ser por extrusión, que es el que se utiliza en los EE.UU. Las briquetas de carbón se caracterizan por su combustión uniforme, alto valor calorífico, y menor contenido de humedad (Chicago, 2007).

1.2.1. Características de las briquetas

La característica común de todas las briquetas es su alta densidad. La forma es muy variada, sin embargo, abundan las cilíndrica con diámetros entre los 2 y 20 cm y longitudes entre los 15 y 50 cm. Otras formas usuales son las de prisma cuadrado o prisma hexagonal hueco y en otros casos tienen forma de ladrillo. Por ejemplo, las briquetas de carbón vegetal que se obtienen compactando polvo o carbón granulado tienen forma de huevo o de avellana de unos 12 - 20 cm de largo. Cada proceso y fabricante produce una briqueta de forma y dimensiones distintas (Martin, 2015).

Es un producto 100 % ecológico y renovable, catalogado como bioenergía sólida, es un sustituto del carbón y la leña y es comercializada 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 (Maldonado, 2015).

Entre las ventajas que presentan las briquetas tenemos:

- ❖ Ventajas de las briquetas:
 - Mayor valor calorífico
 - Homogéneas
 - Fácil manipulación
 - Sin olores, humos, ni chispas
 - Menor porcentaje de cenizas
 - 100 % ecológicas y naturales
 - Fácil y rápido encendido
 - Baja humedad
 - Alta densidad
 - Ocupa menos espacio
- ❖ Ventajas ambientales:
 - Energía menos contaminante.
 - Fuente renovable.
 - Fabricados con residuos forestales contribuye a la limpieza del medio ambiente.
 - 100 % reciclado evitando la tala de árboles.
 - Natural, no tóxico.
 - Sin conservantes, químicos ni aditivos.
 - No emite humo ni olores.
 - Menos ceniza.

1.2.2. Materia Prima para la fabricación de briquetas.

La carbonilla fina tiene una pureza muy inferior a la del carbón vegetal en pedazos, esta contiene, aparte del carbón vegetal, fragmentos, arena mineral y arcilla, recogidos del suelo, y de la superficie de la madera y corteza. La carbonilla pulverizada fina producida de la corteza, ramitas y hojas tiene un contenido de ceniza mayor que el carbón vegetal normal de la madera. La mayor parte de este material indeseado con alto contenido de cenizas, puede ser separado tamizando la carbonilla y descartando el material de menor tamaño, que pasa por malla de dos a cuatro mm. Este material fino puede aún contener más del 50% de carbón vegetal según su grado de contaminación, pero, es difícil hallarle utilidades. El material retenido sobre el tamiz consistirá mayormente en pedazos de buen carbón vegetal y, una vez machacado, puede ser aglomerado (FAO, 1983).

La carbonilla no puede ser quemada con los sencillos métodos corrientes de quemar el carbón, por lo que son más o menos invendibles. Pero si las carbonillas pudieran ser totalmente usadas, la producción global del carbón vegetal aumentaría de un 10 a 20 %. El aglomerado en briqueta, o sea, convertir la carbonilla fina en trozos de carbón parece ser la contestación obvia. Desafortunadamente, la experiencia ha demostrado hasta ahora que, si bien es técnicamente posible hacer briquetas con carbonilla, los aspectos económicos generalmente no favorecen, a menos que el precio del carbón en trozos sea muy alto y se obtenga carbonilla a un costo muy bajo o regalado (FAO, 1983).

1.2.3. Aglutinantes

Es necesario un adhesivo que se mezcle con la carbonilla en una prensa para formar un bloque o briqueta, que luego será pasado por un horno de secado, para curarlo o asentarlo, evaporando el agua para que dicho bloque resulte suficientemente resistente para ser usado en los mismos equipos de combustión del pedazo normal de carbón vegetal (Colectivo de Autores, 2007).

El carbón vegetal es un material que carece totalmente de plasticidad y necesita por lo tanto del agregado de una sustancia pegajosa o aglomerante para que se pueda formar el bloque. El adhesivo deberá preferentemente ser combustible, si bien puede adaptarse un adhesivo incombustible, efectivo a bajas concentraciones.

La prensa para hacer las briquetas debe ser bien proyectada, de construcción sólida y capaz de aglomerar la mezcla de carbón y adhesivo en forma adecuada para su manipuleo durante el proceso del curado o secado. La producción de briquetas debe justificar el costo de la inversión y del funcionamiento de la máquina. Las máquinas para fabricar briquetas de carbón vegetal son, por lo general, máquinas de precisiones costosas, capaces de una gran producción. Se han empleado prensas para hacer ladrillos, pero parece que para este objeto no hay máquinas comercialmente efectivas a un precio realmente bajo. El carbón vegetal es bastante abrasivo, por lo que los equipos para separar la carbonilla, moler, mezclarla con adhesivo, aglomerar, etc., deben ser resistentes al desgaste y bien diseñados (FAO, 2014).

Muchos son los adhesivos que se han ensayado, pero el almidón es el más común y efectivo, siendo adecuado en alrededor del 4 al 8 %, amasando una pasta con agua caliente. Primero, la carbonilla se seca y se tamiza, la muy fina se rechaza y la grande se

muele. Este polvo se mezcla con la pasta de almidón pasándola a la prensa para el aglomerado. Las briquetas se secan en un horno continuo a alrededor de 80 °C. El almidón se asienta con la pérdida del agua, ligando el carbón en trozos que pueden ser manipulados y quemados igual que el común pedazo de carbón vegetal en hornillos o parrillas caseras. Por lo general las briquetas no son aptas para el uso como carbón vegetal industrial en los altos hornos y cúpulas de fundición, puesto que la adhesión se desintegra al mínimo calentamiento. Por este motivo, para producir briquetas metalúrgicas de carbón vegetal, con suficiente resistencia al desmenuzamiento, se necesitarán bloques ligados con alquitrán o betún que serán luego carbonizados en carboneras. El costo es demasiado elevado en la mayoría de los países, como para que el proceso encuentre aplicación industrial (Contreras, 2015).

Durante su fabricación, para tener un producto más aceptable, pueden agregarse sustancias que ayuden la combustión de las briquetas, como ceras, nitrato de sodio y otros. También, para reducir el costo de la briqueta, pueden mezclarse con la carbonilla, arcilla como adhesivo, sílice y otros. Esto por supuesto baja el valor calorífico y constituye una forma de adulteración por la que el consumidor paga, si bien podría afirmarse que la combustión mejora. Pero las briquetas bien hechas constituyen un producto aceptable y conveniente. La virtual ausencia de material fino y polvo, y su uniformidad las hacen atractivas para parrilladas. Cuando el mercado tiene altos precios se venden generalmente a casi el mismo costo por kilogramos que el carbón vegetal en trozos, y tienen más o menos el mismo calor calorífico de un carbón vegetal comercial con el 10 - 15 % (de contenido de humedad) (Contreras, 2015).

La misión del aglutinante, como ya se ha indicado, consiste en favorecer la unión de las partículas sólidas que van a formar el aglomerado proporcionando a éste una resistencia adecuada. Esta característica fundamental e imprescindible debe cumplirla sea cual sea su estado físico, su naturaleza química y su tipo de función. Lógicamente su actuación en la aglomeración estará influenciada por éstas y otras propiedades físicas pero el mayor efecto de una actuación eficaz del aglutinante está basado en el tipo de función que desarrolla en cada caso y por el máximo aprovechamiento de esta cualidad mediante el uso de aditivos y los tratamientos de curado. Los mecanismos enlazantes generales que producen aglomeración han sido ya mencionados anteriormente y en ellos se apreciaba el papel que juegan los aglutinantes en la creación de puentes materiales o películas adherentes entre las partículas sólidas (Chicago, 2007).

Los aglutinantes tipo película actúan como pegamentos y dependen, normalmente, de la evaporación del agua o algún disolvente para desarrollar su capacidad de mantener las partículas sólidas unidas. Un caso especial de aglutinante de este tipo lo constituye la mezcla del material a briquetear con un líquido en el cual es soluble. El agua es uno de los mejores y más conocidos aglutinantes de este tipo, también pueden incluirse en este grupo almidones y lignosulfonatos. La actuación de los aglutinantes tipo matriz está basada en el recubrimiento de las partículas sólidas por una fase continua de aglutinante. En algunos casos el aglutinante puede ocupar alrededor del 10 % del volumen total de la briqueta y rellena los huecos existentes entre las partículas, creando puentes sólidos, e incluso penetrando en los poros del material reduciendo la porosidad y el área superficial accesible (Contreras, 2015).

Los aglutinantes de tipo químico actúan mediante reacciones químicas de condensación y entrecruzamiento producidas entre los diferentes componentes de la mezcla de aglutinantes o con los materiales a procesar. Estas reacciones suelen producir aglomerados con una existencia elevada e incluso crean uniones resistentes al agua. Entre los aglutinantes de este grupo pueden citarse: los ácidos minerales solos o en presencia de otros aglutinantes y las melazas mezcladas con hidróxido de calcio.

1.2.3.1 Tipos de aglutinantes.

Miel final

La miel final o 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. Nutricionalmente presenta un altísimo contenido en 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 (Colectivo de Autores, 1986).

Tabla 1.2. Composición media de las mieles de caña.

Composición	Rango (%)
Agua	16
Sacarosa	35
Glucosa	10

Fructuosa	10
Reductores infermentables	4
Cenizas	9.5
Sustancias gomosas y coloidales	8
Cloruros	2
Otros	5

Fuente: (Colectivo de Autores, 1986).

Para obtener la miel final melaza de caña, básicamente la técnica consiste en la concentración del jugo obtenido directamente de la molturación de la caña de azúcar, sometido luego a un proceso de inversión ácida y evaporación al vacío, es decir, mediante la molienda de la gramínea utilizando unos rodillos o mazas que la comprimen fuertemente, obteniendo un jugo que después se cocina a fuego directo para evaporar el agua y obtener su concentración.

Durante la evaporación del agua salen hasta la superficie las impurezas que contienen este jugo. Hay que sacar toda esa impureza, llamada cachaza, para que resulte una melaza clara, transparente y homogénea, El desecho sobrante puede servir de materia prima para fermentaciones. El producto final tiene una textura parecida a la miel de abeja y de sabor muy agradable. Según los expertos, cuanto más oscura sea, más sabor y nutrientes tendrá. La fuente más difundida de empleo de carbohidratos solubles en la alimentación animal es el uso de la miel final. Generalmente, la melaza es relacionada como un suplemento energético para la alimentación de ganado por su alto contenido de azúcares y su bajo costo (W. Casas, 2010).

La melaza también puede utilizarse en la alimentación humana, empleándola como ingrediente culinario. Contiene proteínas, vitaminas del grupo B y minerales: hierro, calcio, magnesio, sodio, potasio, manganeso, fósforo, zinc, boro, molibdeno, yodo, silicio, y vanadio. Es ideal para deportistas, niños, el combate de anemias, tratamiento de la fatiga o como suplemento dietético en pospartos. Son oligoelementos que activan y contribuyen a desarrollar el sistema glandular y enzimático, básico para alcanzar el metabolismo completo del cuerpo. Según diversos estudios, ayuda en la formación de los huesos y el crecimiento en la etapa infantil. La melaza constituye también la materia prima fundamental para producción de alcoholes y muchos otros derivados. La miel

final o melaza es considerada uno de los mejores aglutinantes en la elaboración de briquetas de carbón vegetal, adicionándose de un 10 a un 20 % en la composición de las mismas con el propósito de minimizar el consumo de esta.(Cancio-Bello, 2007)

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, etc. (Maldonado, 2015).

El aglomerante para la elaboración de briquetas orgánicas debe cumplir los siguientes aspectos según (Maldonado, 2015).

- 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.

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. (Marticorena, 2014).

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, etc. Entre los no combustibles se tiene: limo, arcilla, barro, cemento, cal, etc. (Maldonado, 2015).

También se los puede clasificar en orgánicos e inorgánicos. Son orgánicos: albuminatos, alcoholes, almidones, alquitranes, azúcares, breas, caseína, cola, dextrina, gelatinas, 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 (Marticorena, 2014).

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 según (Maldonado, 2015).

- Almidones de yuca, maíz, arroz.
- Resinas (cola blanca).
- Melaza.
- Parafina.
- Arcillas.
- Alquitrán.

Almidón

Los almidones provienen de la familia de los carbohidratos, constituidos de cadenas lineales (amilasa) y cadenas ramificadas (amilo pectina). Los almidones son extremadamente versátiles, alcanzando una eficiencia incomparable en todas sus aplicaciones (Maldonado, 2015).

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, etc. (Maldonado, 2015).

El almidón es utilizado como aglutinante en briquetas de materiales orgánicos, principalmente para carbón vegetal o cascarilla de arroz, por presentar muy buenas propiedades de cohesión para este tipo de material, y además de bajo costo respecto a otros aglutinantes. (Marticorena, 2014).

Resinas

La 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. (Marticorena, 2014).

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 y algunos almidones (Marticorena, 2014).

Jugo de Henequén

La planta de henequén (*Agave fourcroydes Lemaire*) desde su introducción en Cuba encontró aceptación en la obtención de fibras para la confección de sogas y cordeles. Presenta elevadas potencialidades como fuente de materia prima para la agricultura y de su jugo, para ser utilizado como fitoplaguicida para el control de plagas en los cultivos. El henequén tiene varios usos, las fibras para la confección de cordeles, sacos, alfombras y objetos de adorno, en la conservación del suelo. Se informa efecto molusquicida por contener saponinas esteroideas como la hecogenina. No se informan estudios fitoquímicos detallados, pero por la presencia confirmada de saponinas en sus tejidos pudiera tener otros usos fitosanitarios, entre ellos como insecticida.

En este caso el jugo de henequén por su contenido viscoso, al ser expulsado en la molienda de la fibra, se ha considerado un aglutinante útil en la producción de briquetas de carbón vegetal (Rendón, 2007).

Se presenta evidencia de la obtención de jarabe a partir de henequén (*Agave fourcroydes Lem.*) y de algunas de sus características de composición. Se utilizaron piñas de henequén de 15 a 18 años de edad que se cocieron durante 4 h a una presión de 1.0 kg cm⁻², las que posteriormente se molieron para extraer los jugos que luego se concentraron para obtener el jarabe. Los resultados señalaron que este jarabe contiene 85.7 % de fructosa y 13.7 % de glucosa, 3623 µg g⁻¹ de calcio (Ca), 470 µg g⁻¹ de magnesio (Mg), 665 µg g⁻¹ de potasio (K), 99 µg g⁻¹ de zinc (Zn), 36 µg g⁻¹ de hierro (Fe), 24 µg g⁻¹ de aluminio (Al), 8 µg g⁻¹ de cobre (Cu), 2 µg g⁻¹ de manganeso (Mn) y 1 µg g⁻¹ de cromo (Cr). No se detectó arsénico (As), plomo (Pb) ni cadmio (Cd). Por su riqueza en fructosa, Ca, K y Mg, el jarabe de henequén puede incorporarse en la dieta humana. Este nuevo producto puede dar valor agregado a esta planta y favorecer su preservación (Rendón, 2007).

1.2.4. Métodos de aglomeración utilizando carbonilla como residuo del carbón vegetal

Se prefiere el almidón por ser combustible, si bien es comúnmente caro. Son aptas las arcillas muy plásticas, siempre que no se las emplee con más del 15 %. Han sido empleados, también, el alquitrán y el betún de la destilación de carbón o de las retortas de carbón vegetal para briquetas de uso especial, pero tienen que ser carbonizados de nuevo, antes del empleo, para poder aglomerar correctamente; resultan de buena calidad, pero de producción cara. (FAO, 1983)

Mayormente en los países desarrollados se encuentran exitosas fabricaciones de briquetas. Un ejemplo es la industria que se basa sobre la carbonización del aserrín y corteza, en el sur de los EE.UU. de N.A. empleando hornos de fundición, rotativos - múltiples, que producen quizás entre 20 y 50 toneladas de carbonilla fina por día. Este carbón vegetal, una vez aglomerado, destinado a las parrilladas, puede venderse en los despachos al por menor. Los gases del horno se queman para producir vapor para fuerza eléctrica, transformando por lo tanto el desperdicio de aserrín y corteza en dos productos útiles, energía eléctrica y briquetas de carbón vegetal. Al mismo tiempo se reducen al mínimo los problemas de la contaminación del aire y de la eliminación de desperdicios.(FAO, 1983)

1.2.5. Aspecto económico de las briquetas

El costo de la fabricación de briquetas depende fundamentalmente de tres factores: el costo de la carbonilla fina entregada sobre la planta lista para ser procesada, el costo del adhesivo y los costos de capital. Las carbonillas que normalmente tienen poco valor, para justificar la inversión en una planta de briquetas son tratadas con un valor cero. Ello sin embargo no es cierto porque para abastecer la plancha con carbonilla desde su fuente, alta cercana, se gasta dinero. Si no toda la carbonilla deriva de recuperaciones manejadas por la industria de briquetas, se hallará que el precio de la carbonilla aumenta regularmente apenas las briquetas aparecen en el mercado. El adhesivo preferido es el almidón, que es un alimento que cuesta alrededor de diez o más veces el costo del carbón vegetal bruto en trozos al costado del horno. Por lo tanto, ya que se necesita agregar del 4 al 8 % a la carbonilla, para hacer las briquetas de almidón resulta ser un rubro muy importante de costo. Las fabricaciones exitosas de briquetas, como las que funcionan en los Estados Unidos y en otros países desarrollados, dependen de la coincidencia favorable de factores que generalmente no se presentan en los países en vía de desarrollo, y que son:(FAO, 1983)

- Un mercado establecido para combustible casero tipo parrillada de alto precio.
- Capacidad de producir carbonilla fina para briquetas a un costo muy bajo, cerca de los principales mercados y en volúmenes estables durante todo el año.
- Un volumen elevado de ventas apropiado para absorber la producción potencial de la planta.
- Suficiente capital para buen equipo y mano de obra hábil para el funcionamiento y la manutención.
- Un método adecuado de mercadeo, empaque y de distribución que permita al producto alcanzar adecuada penetración en el mercado a precios satisfactorios.

Se puede decir en general, y esto está respaldado por la falta de fabricación exitosa en el mundo en desarrollo que, es mejor concentrar la atención en la producción eficiente de carbón vegetal a partir de la leña esforzándose en obtener el máximo rendimiento de la conversión y una mínima generación de carbonilla, manipulando correctamente el producto. Además, la producción que usa sencillas carboneras de ladrillo, pide pocas componentes de importación, mientras que las maquinarias para hacer briquetas son normalmente rubros importados costosos. Los costos de capital se transforman en un

drenaje de la rentabilidad, a menos que se pueda mantener la planta de briquetas funcionando todo el año y en plena capacidad de producción.(FAO, 1983)

1.3. Diseño de experimento para la fabricación de briquetas

En la industria, la experimentación suele utilizarse básicamente en dos áreas: el diseño y la mejora de procesos y productos. La experimentación proporciona en estos casos la descripción aproximada de cómo se comportan los procesos y/o productos, restringida a una región de interés. La mejora de los procesos es generalmente el objetivo hasta que este alcanza el nivel deseado.(Tanco, 2009)

Se entiende por diseño de experimento como una metodología para aplicar sistemáticamente la estadística al proceso de experimentación. Más técnicamente, consiste en realizar una serie de pruebas en las que se incluyen cambios deliberados en las variables de un proceso de manera que es posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida elegida.(Tanco, 2009)

Se llaman experimentos factoriales a aquellos experimentos en los que se estudia dos o más factores, donde los tratamientos se forman en la combinación de los diferentes niveles de cada uno. Los experimentos factoriales en si no constituyen un diseño experimental sino un diseño de tratamiento.(Tanco, 2009)

Los experimentos factoriales se emplean en todos los campos de la investigación, son muy útiles en investigaciones exploratorias en las que poco se sabe acerca de muchos factores. Muy frecuentemente es usado en investigaciones comparativas.(URU, 2005)

A continuación, se enumeran las etapas que deben seguirse para una correcta planificación de un diseño experimental, y deben ser ejecutadas de forma secuencial.(URU, 2005)

1. Definir los objetivos del experimento.
2. Identificar todas las posibles fuentes de variación, incluyendo:
 - factores tratamiento y sus niveles,
 - unidades experimentales,
 - factores (nuisance): factores bloque, factores ruido y covariables.

3. Elegir una regla de asignación de las unidades experimentales a las condiciones de estudio (tratamientos).
4. Especificar las medidas con que se trabajará (la respuesta), el procedimiento experimental y anticiparse a las posibles dificultades.
5. Determinar el tamaño muestral.
6. Ejecutar un experimento piloto.
7. Especificar el modelo.
8. Esquematizar los pasos del análisis.
9. Revisar las decisiones anteriores. Modificarlas si se considera necesario.

Para la realización de este trabajo se efectuará un diseño de experimento tipo mezcla, ya que el mismo permite relacionar los factores y sus niveles con los indicadores a evaluar.

Capítulo 2. Procedimiento para la evaluación de briquetas a partir de la carbonilla.

Se realizó un experimento preliminar para determinar el rango de las composiciones de la investigación, para ello se tuvo en cuenta las experiencias en las briquetas elaboradas por (Mallón, 2017) y (Almanza, 2017) donde de la composición de la carbonilla se estableció fija para un 60 % mientras que las composiciones del resto los aglutinantes se mantuvo al 40 %.

Para el experimento la composición de la miel final se decidió tomar hasta un 20 % por decisiones económicas, pues dicho componente es el único que posee valores agregados y se desea disminuir su utilización.

2.1. Fabricación de briquetas de carbón vegetal utilizando jugo de henequén y miel final.

2.1.1. Variables del Proceso

2.1.1.1. Variables Independientes.

En tabla 2.1 se describen las variables independientes asociadas al proceso de densificación.

Tabla 2.1. Descripción de variables independientes.

			Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
Número del factor	Variable	Unidad	Constante	Variable	Monitoriable	No Monitoriable
1	Porcentaje de composición	%		X	X	
2	Presión de compactación	MPa		X	X	
3	Tipo de Aglutinante			X	X	

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.2 Variables Dependientes.

En tabla 2.2 se describen las variables dependientes asociadas al proceso de densificación.

Tabla 2.2. Descripción de variables dependientes.

			Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
Número del factor	Variable	Unidad	Constante	Variable	Monitoreable	No Monitoreable
1	Humedad eliminada	%		X	X	
2	Resistencia al impacto	m		X	X	
3	Valor calórico	Kcal/kg		X	X	
4	Cenizas	%		X	X	
5	Tiempo de combustión	min		X	X	
6	Densidad	kg/m ³		X	X	
7	Secado	Días		X	X	

Fuente: Elaboración Propia.

2.3 Delimitación de 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, en el cual se utilizarán métodos estadísticos para determinar si existe diferencia comparativa al utilizar los diferentes insumos para la elaboración de las mismas.

2.4. Recursos y materiales utilizados.

Insumo y equipos requeridos para la elaboración de las briquetas.

Materiales combustibles

- Carbón vegetal en polvo (carbonilla)

Aglutinantes

- Jugo de henequén de la Henequenera Juraguá.
- Miel final de la UEB Elpidio Gómez

Cristalería

- Pipetas, Beacker 500 mL , copas graduadas, agitadores.

Equipos

- Molino de masas.
- Balanzas analíticas
- Termómetro digital
- Termómetro de varilla relleno de mercurio (-10 a 100 °C)
- Molde cilíndrico (cilindro de acero, vástago de acero)
- Tamiz de laboratorio
- Recipientes de aluminio para la combustión de briquetas.

2.4.1. Caracterización del carbón vegetal en polvo (carbonilla).

El carbón vegetal se obtiene de la pirolisis de la planta *Dichrostachys cinerea* (L.) Wight & Arm (Marabú) es de estructura fina, grano recto, la albura es de color claro y duramen más oscuro y de alta densidad.(Baracoa, 2014)

Las características del carbón vegetal elaborado en Cienfuegos utilizando la planta *Dichrostachys cinerea* (L.) Wight & Arm (Marabú) son las siguientes (Baracoa, 2014)

- Humedad 2,6 %
- Cenizas 3,2 %
- Materia volátil 51,4 %
- Carbono fijo 45,2 %
- Densidad 239 kg/m³

2.5. Técnica sensorial y cuantitativa

Se realiza una evaluación a partir de diferentes criterios. Por medio de un análisis sensorial y a partir de un análisis cuantitativo, al comparar ambos 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.

2.6 Recolección y ordenamiento de la información:

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

2.6.1 Método de formulación.

Para la obtención de la formulación material aglutinante - aglutinado (carbonilla) óptima, se efectuaron algunas pruebas de variaciones en los porcentajes de las mezclas utilizadas como se observa en la tabla 2.3, posteriormente se realizó el proceso de densificación para la compactación. En todos los casos luego de aplicar una presión de compactación las briquetas elaboradas son extraídas completamente y sin deformación.

Tabla 2.3. Formulaciones de las briquetas con jugo de henequén como aglutinante.

No. Fórmula	Carbonilla (%)	Jugo de henequén (%)
1	60	40
2	40	60

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.4. Formulaciones de las briquetas con jugo de henequén y miel final como aglutinantes.

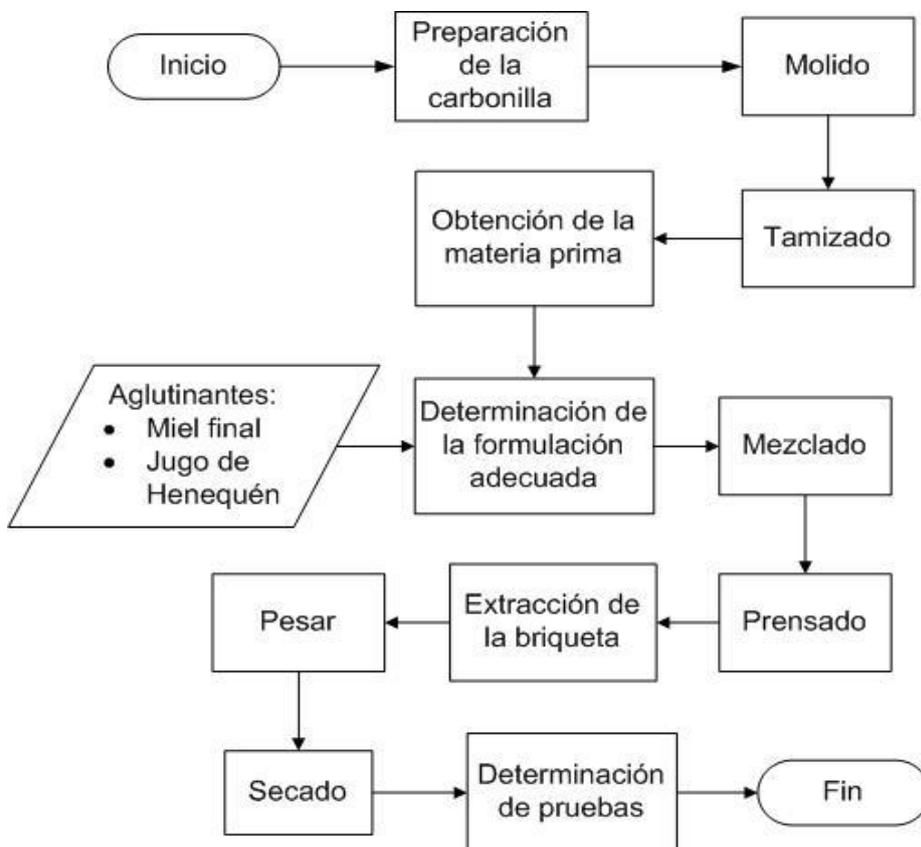
No. Fórmula	Carbonilla (%)	Jugo de henequén (%)	Miel (%)
1	60	30	10
2	60	20	20

Fuente: Elaboración propia

2.6.2 Método de obtención de Briquetas.

La obtención de las briquetas a partir de la carbonilla y los lodos residuales comprende varios pasos en los cuales intervienen operaciones unitarias como son molinación, tamizado, mezclado, prensado, secado y además se determinan algunos análisis cualitativos y cuantitativos empleando métodos estadísticos en la figura 2.1 se muestra el diagrama de proceso.

Figura 2.1. Diagrama del proceso de obtención de briquetas.



Fuente: Elaboración Propia.

2.7. Diseño de experimento.

Atributos del Diseño de Mezclas

Clase de diseño: Mezcla

Nombre del Diseño: Simplex-Látice

Diseño Base

Número de componentes: 2

Número de respuestas: 7

Número de corridas: 18

Tipo de modelo: Cuadrático

Aleatorizar: Sí

Tabla 2.5. Componentes de la mezcla.

<i>Componentes</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Unidades</i>
Miel	10,0	20,0	%
Jugo de Henequén	20,0	30,0	%
Total mezcla	40,0		%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.6. Propiedades de respuesta.

<i>Respuestas</i>	<i>Unidades</i>
Tiempo de secado	Días
Densidad	kg/cm ³
Humedad Liberada	%
Valor calórico	kcal/kg
Generación de Ceniza	%
IRI	%
Tiempo de Combustión	%

Fuente: Elaboración Propia.

Se creó un diseño Simplex-Látice el cual estudiará los efectos de 2 componentes en 18 corridas. El orden de los experimentos ha sido completamente aleatorizado. Esto aportará protección contra el efecto de variables ocultas.

2.7.1. Procedimientos de análisis sensorial y cuantitativo de evaluación.

A continuación, se presenta el desarrollo de la técnica sensoriales y cuantitativa del diseño experimental para el mismo se determinan las variables independientes y dependientes que intervienen en el proceso de estudio.

VARIABLES INDEPENDIENTES:

- Composición
- Presión de compactación

Nota: solo se analizará la cantidad de aglutinante añadido, o sea, variará solamente la masa de aglutinante en la mezcla pues se tomarán una masa fija para todas las composiciones de carbonilla.

VARIABLES DEPENDIENTES:

- Valor calorífico
- Humedad
- Resistencia al impacto
- Resistencia a la ruptura
- Porcentaje de cenizas
- Tiempo de combustión

2.7.2. Técnicas sensoriales

La técnica utilizada para evaluar este parámetro es a través de un análisis sensorial que comprende:

- Olor del producto antes y en la combustión: para el mismo se tiene en cuenta los olores desagradables al olfato.
- Color: cambio de coloración al mezclar los productos.
- Forma: cilíndricas, ovaladas, redondas, además se establece el diámetro y la altura de la briqueta.
- Emisiones de humo: se determina en el proceso de combustión.

2.7.3 Técnicas cuantitativas

Descripción de los parámetros medibles y cuantificables que se utilizarán en la validación:

- Humedad (H): medir la humedad porcentual eliminada de las briquetas, por medio de la diferencia del peso inicial y el peso final a densidad constante.

$$\%H = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100$$

- Densidad (ρ): medir la densidad de las briquetas secas, por medio de la relación cociente entre la masa de la briketa y el volumen de esta.

$$\rho = \frac{\text{Masa de la briketa}}{\text{Volumen de la briketa}}$$

El volumen de la briketa se determina por

$$Vb = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h_b$$

- Presión de prensado: medir la presión de prensado de la mezcla por medio de la prensa hidráulica. (se tomará la de la prensa)
- Valor calorífico: Sera estimado mediante el calor sensible y el calor latente del agua, determinando el valor calórico de la briketa a partir de la suma de estos, se realiza midiendo la temperatura del agua y determinando la masa del agua evaporada si la hay, y conociéndose las constantes de capacidad calorífica del agua y calor latente de vaporización de agua a presión atmosférica.

$$Q = m_1 cp \Delta T + \lambda m_2$$

$$\text{Valor calórico} = \frac{Q}{m_0}$$

Donde:

Q : Calor producido por las briquetas

m_1 : Masa inicial del agua

cp : Capacidad calorífica del agua a presión constante con la temperatura media.

ΔT : Diferencial entre la temperatura inicial del agua y la temperatura máxima del agua.

λ : Calor latente de vaporización de agua a presión atmosférica.

m_2 : Masa de agua evaporada.

m_0 : Masa de la briketa

- Resistencia al impacto: se dejará caer la briqueta desde varias alturas para registrar la altura máxima que resiste la briqueta en el impacto.
- Resistencia a la ruptura por compresión: medir la resistencia a la ruptura por la carga longitudinal mínima necesaria para deformar la briqueta.
- Generación de cenizas: después de la combustión de la briqueta se pesarán las cenizas resultantes en una balanza analítica y se determinará el porcentaje de cenizas por la siguiente ecuación.

$$\%C = \frac{\text{masa de las cenizas}}{\text{masa de la briqueta}} \cdot 100$$

- Tiempo de combustión: medir con un cronómetro cuanto tiempo demora la briqueta encendida.

2.8 Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

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

2.8.1. Tabulación de información

Todos los datos obtenidos en la experimentación serán tabulados y graficados y se colocarán en los anexos, en los mismo se presentan los resultados de humedad eliminada, resistencia al impacto, resistencia a la compresión, valor calorífico, porcentaje de cenizas, tiempo de combustión, densidad y tiempo de secado.

2.9. Análisis estadístico.

Se decidió utilizar para el procesamiento de datos el software Statgraphics debido a las características y ventajas que presenta:

- Series Temporales:
 - Visualización de los resultados.
 - Ajustes estacionales.
 - Herramientas nuevas para facilitar las predicciones.

- Análisis Multivariante de Datos:
 - Manejo y Gestión de forma sencilla de grandes conjuntos de datos.
 - Análisis factorial: análisis de problemas complejos.
 - Componentes principales.
 - Análisis Discriminante.
 - Correlación Canónica.
- Regresión Avanzada:
 - Análisis de Regresión Rápida.
 - Detección rápida de diferencias entre grupos.
 - Ajuste no lineal.
 - Modelización de datos binarios mediante Regresión Logística.
 - Tratamiento de datos confusos.
 - Calibración.

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

- Cálculo de análisis de varianza de varios factores
- Se utiliza un método discriminante para determinar cuál de los dos aglutinantes posee mejores características en los indicadores analizados mediante la Prueba LSD (diferencia mínima significativa) de Fisher.

Para determinar si los factores tienen o no un efecto significativo en la variable dependiente, se realiza un análisis de varianza. Los resultados son desplegados en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Análisis de varianza ANOVA.

Propiedad Análisis	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Promedio de Cuadrados	F	Valor teórico de
--------------------	---------------------------	-------------------	--------------------	-----------------------	---	------------------

ANOVA						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	kn - 1			

Fuente:(Walpole, 1999)

El procedimiento ANOVA Multifactorial en ("Statgraphics Centurion," 2007) está diseñado para construir un modelo estadístico describiendo el impacto de dos o más factores categóricos en una variable dependiente.

Se realizan pruebas para determinar si hay o no diferencias significativas entre las medias a diferentes niveles de los factores y si hay o no interacciones entre los factores. Los datos se desplegaron mediante una gráfica de medias (LSD de Fisher).

Capítulo 3. Análisis de los resultados

3.1 Caracterización de las Materias Primas

3.1.1. Preparación de la carbonilla

La carbonilla utilizada para la presente investigación procedente de la Empresa Acopio de Abreus, obtenida de la planta *Dichrostachys cinerea* (L.) Wight & Arm (Marabú), presenta un color negro, olor característico, y tiene una granulometría menor de 3 cm, según las normas para el beneficio del carbón vegetal comercializable donde el diámetro del mismo para la calidad II es entre 3 – 10 cm y un largo entre 4 – 25 cm obteniéndose un % de carbonilla entre un 5 - 10.

Para la utilización de este producto en la fabricación de briquetas se hace necesario su trituración a polvo fino para lograr un mayor grado de compactación entre las partículas cuando se mezcla con el aglutinante empleado, para esta operación unitaria se utilizó un molino rotatorio de masa diseñado en la Universidad de Cienfuegos, en la tabla y figura 3.1 se muestran sus características.

Tabla 3.1. Características del molino utilizado en la trituración de la carbonilla.

Tipo de Molino	Rotatorio de masa
Potencia	Monofásico 105 kW
Área	0,78 m ²

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1. Molino empleado en la trituración de la carbonilla.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Prueba de tamizado.

La carbonilla una vez triturada en polvo fino, se hace necesario una prueba de tamizado para determinar la granulometría de sus partículas, este análisis se realizó en el laboratorio de la UEB Glucosa de Cienfuegos, en un tamiz de laboratorio con las siguientes características como se muestran en la tabla y figura 3.2.

Tabla 3.2: Características del tamiz utilizado en la prueba de tamizado.

Modelo	J. Engelsmann AKT-GES
Tipo de tamiz	Mesh Tayler
Potencia	5.5 kW
Cantidad de tamices	5

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2. Tamiz de laboratorio.



Fuente: elaboración propia.

Para la prueba de tamizado se utilizó un tamiz de laboratorio con 5 mallas de diferentes diámetros obteniéndose los siguientes valores como se observa en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Prueba de tamizado de la carbonilla

No. De clase	Mesh Tayler	mi	xi	Dp(sup)	Dpi	Xi	Yi	xi/Dpi
1	4/28	403,351	0,457533	4,699	2,644	1,00000	0,000000	0,17305
2	28/80	374,464	0,424766	0,589	0,377	0,54247	0,457533	1,12670
3	80/100	99,01	0,112310	0,165	0,156	0,11770	0,882299	0,71994
4	100/150	4,753	0,005391	0,147	0,1255	0,00539	0,994609	0,04296
5	-150	0	0,000000	0,104	0,052	0,00000	1,000000	0,00000
Suma		881,578	1					2,06264

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

No. de clase: cantidad de intervalo entre mallas.

Tipo de malla: especificaciones de la clase de malla.

mi: masa retenida en la malla.

xi: fracción masa de cada clase.

Dp: diámetro de abertura del tamiz superior.

Dpi: diámetro promedio.

Xi: fracción masa que paso por el tamiz superior acumulada.

Yi: fracción masa retenida en el tamiz superior acumulada.

xi/Dpi: diferencia entre la fracción masa de la clase y el diámetro promedio

Con los datos obtenidos se calcula el diámetro promedio de la carbonilla utilizada según la ecuación siguiente:

$$Dp = \frac{1}{\sum \frac{\Delta x_i}{Dp_i}}$$

$$Dp \approx 0,48 \text{ mm}$$

Según los cálculos realizados se determinó que el diámetro promedio de las partículas de carbonilla utilizada en la investigación es de 0,48 mm.

3.1.3 Determinación de las mezclas empleadas.

Triturada la carbonilla se procede a una operación de mezclado con las diferentes concentraciones de lodo como aglutinante, tomando como base una masa fija de carbón

y distintas proporciones del agente aglomerante, en la tabla 3.4 se muestran las composiciones en % de la mezcla, así como su masa total.

Tabla 3.4. Masa de los componentes en la Mezcla Carbonilla-Jugo de Henequén:

Mezcla (%)	Masa (g)	Masa total (g)
60-40	1 000 g de carbonilla y 700 g de aglutinante	1 700 g
50-50	1000 g de carbonilla y 1 000 g de aglutinante	2 000 g
40-60	1000 g de carbonilla y 1 000 de aglutinante	2 000 g

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5. Masa de los componentes en la Mezcla Carbonilla-Jugo de Henequén-Miel:

Mezcla (%)	Masa (g)	Masa total (g)
60-20-20	1 000 g de carbonilla, 200 g de jugo de henequén y 200 g de miel	1 400 g
60-30-10	1 000 g de carbonilla, 500 g de jugo de henequén y 200 g de miel	1 700 g
60-25-15	1 000 g de carbonilla, 700 g de jugo d henequén y 300 g de miel	2 000 g

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4 Molde para la fabricación de la briqueta a escala de laboratorio

Para la fabricación de la briqueta se seleccionó un cilindro de acero con un vástago, donde el diámetro del mismo es de 72 y 70 mm respectivamente, posteriormente esta mezcla es compactada.

3.2. Análisis de los resultados de las técnicas sensoriales y cuantitativas en la fabricación de briquetas

3.2.1 Análisis sensorial

Las técnicas sensoriales aplicadas a las briquetas elaboradas son olor, color, forma y emisiones de humo, obteniéndose como resultado de dicho análisis que las mismas no presentan características desagradables.

Las briquetas obtenidas presentan una forma cilíndrica de 70 mm diámetro, son de color negro característico de la carbonilla, no producen humo durante su combustión, ni olores desagradables y las cenizas residuales son de color gris claro.

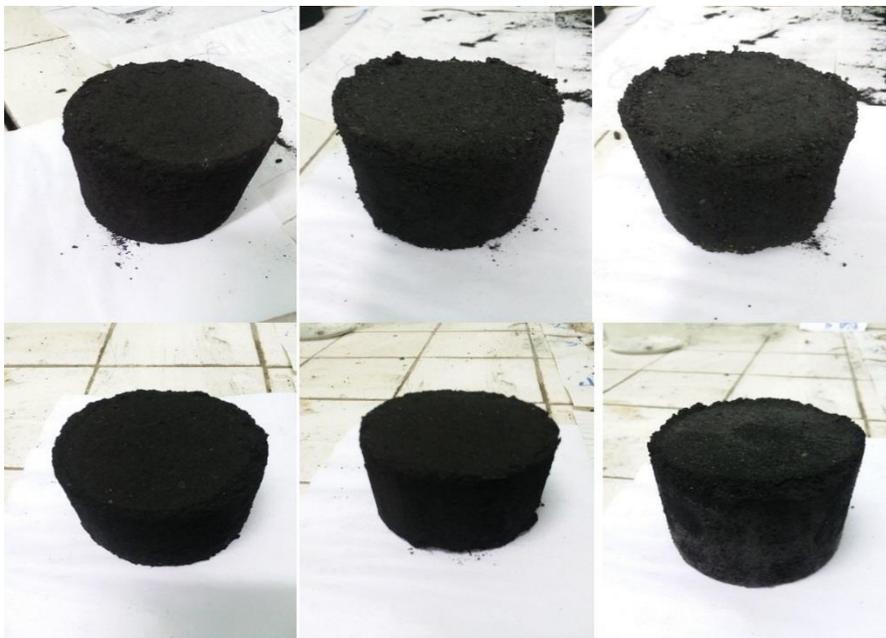


Figura 3.3. Briquetas fabricadas. Fuente: Elaboración Propia.

Exceptuando las briquetas obtenidas de la mezcla con la composición 60% de carbonilla, 25% de henequén y 15% de miel, las cuales han manifestado una especie de moho en su superficie exterior, como se muestra en la figura 3.4:



Figura 3.4. Briquetas fabricadas con presencia de moho. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Análisis cuantitativo de las variables independientes y dependientes.

3.2.2.1. Propiedades de las briquetas obtenidas de la mezcla compuesta por Carbonilla y Jugo de Henequén.

Tabla 3.6. Resumen del promedio de las propiedades de las briquetas obtenidas de la mezcla compuesta por Carbonilla y Jugo de Henequén.

Composición Carbonilla- Jugo de henequén (%)	Densidad (kg/m ³)	Tiempo de secado (días)	Humedad Liberada (%)	Resistencia de impacto (%)	Valor calórico (Kcal/Kg)	Cenizas (%)
60-40	610	16	39	8	181,13	31
50-50	614	15	46	5	155,22	32
40-60	609	15	47	12	136,11	31

Fuente: Elaboración propia.

Densidad

A las briquetas obtenidas en el laboratorio se le determinó la densidad, aplicando el método descrito en el capítulo dos, en la figura 3.5 se muestra los resultados de las densidades promedio obtenidas para las diferentes composiciones para las briquetas compuestas de carbonilla y jugo de henequén, en el (Anexo A) se relacionan los datos de las corridas.

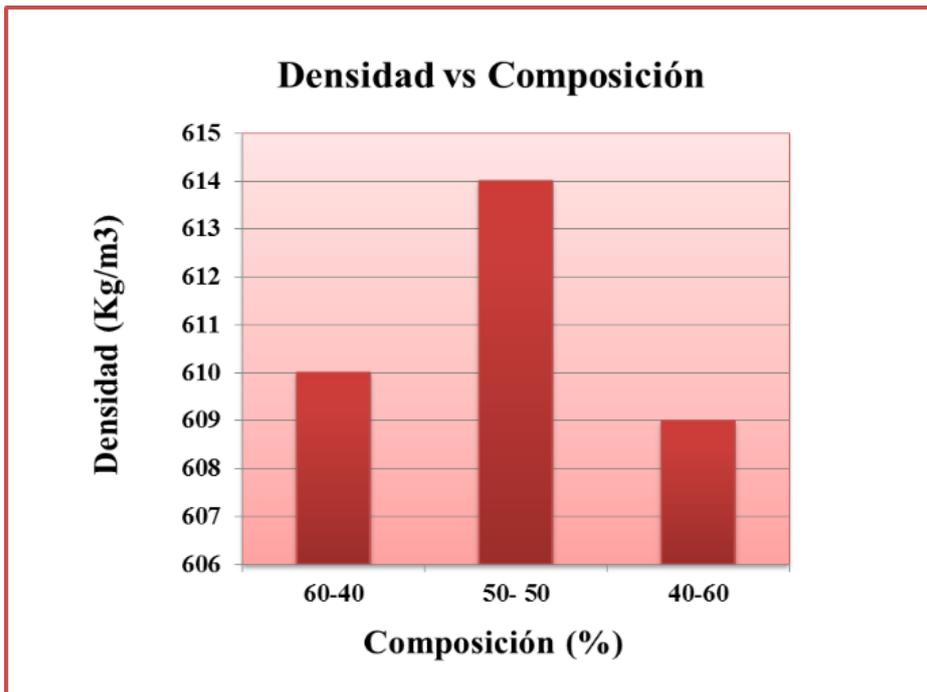


Figura 3.5. Densidades de las briquetas de Jugo de henequén. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.5 se muestran las densidades de las briquetas de jugo de henequén como aglutinante en composiciones distintas. Se observa que las mayores densidades son alcanzadas por la composición 50% de carbonilla y 50% de aglutinante.

Tiempo de secado

La briketa compactada es secada a una temperatura ambiente de 27,5 ° C, sobre una meseta de concreto en el laboratorio, en la figura 3.6 se muestran los resultados del tiempo de secado promedio obtenido para las briquetas compuestas de carbonilla y jugo de henequén, en el (Anexo B) se relacionan los datos de las corridas.

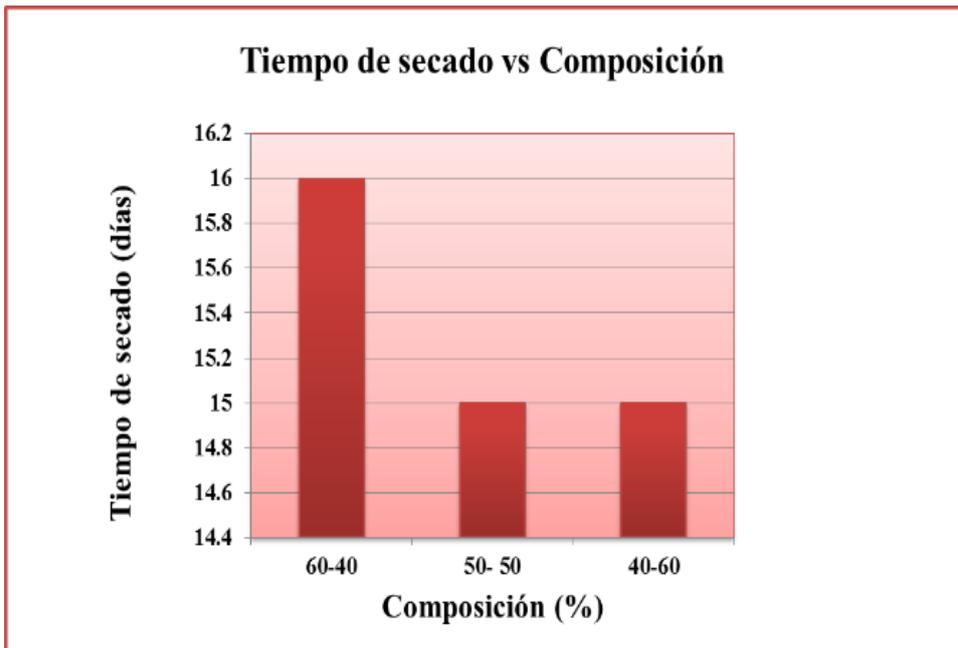


Figura 3.6. Tiempo de secado de las briquetas de Jugo de henequén. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura, el mayor tiempo de secado se obtienen para las briquetas con 60 % de carbonilla y 40 % de jugo de henequén con 16 días, mientras que los menores se obtienen para las briquetas 50 % de carbonilla y 50 % de jugo de henequén y 40 % de carbonilla y 60 % de jugo de henequén con 15 días.

Humedad Liberada

Para determinar la humedad liberada se siguió el procedimiento descrito en el capítulo dos, en la figura 3.7 se muestran los resultados del porciento de humedad liberada promedio obtenido en las briquetas compuestas de carbonilla y jugo de henequén, en el (Anexo C) se relacionan los datos de las corridas.



Figura 3.7. Humedad liberada de las briquetas de Jugo de henequén. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.7 se muestra el porcentaje de humedad liberada de las briquetas, donde se observa que las briquetas compuestas por 40 % de carbonilla y 60 % de jugo de henequén poseen un mayor porcentaje de humedad, pero cabe destacar que esto se debe a contienen mayor contenido de jugo de henequén.

Resistencia de impacto

Parara determinar la resistencia al impacto se deja caer la briqueta a una altura aproximada de 2 m, en la figura 3.8 se muestran los resultados promedios para los índices de resistencia de impacto (IRI) obtenidas, en el (Anexo D) se relacionan los datos de las corridas.

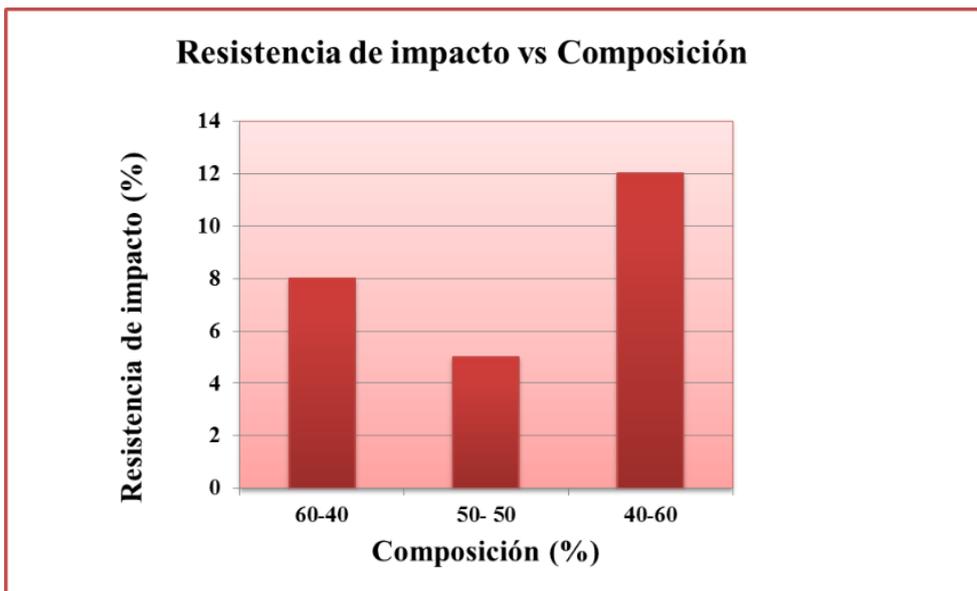


Figura 3.8. Resistencia de impacto de las briquetas de Jugo de henequén. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.8 se muestra el IRI de las briquetas en una caída libre de 2 m aproximadamente. Se observa que las briquetas de la composición 40 % de carbonilla y 60 % de jugo de henequén son más resistentes al impacto desde una caída libre con un IRI de 12 %.

Valor calórico

La briketa fabricada se sometió a la combustión en un recipiente de aluminio, para calentar 500 mL de agua, y los resultados obtenidos se determinaron mediante el procedimiento descrito en el capítulo dos, en la figura 3.9 se muestran los resultados del valor calórico promedio obtenido para las composiciones, en el (Anexo E) se relacionan los datos de las corridas.

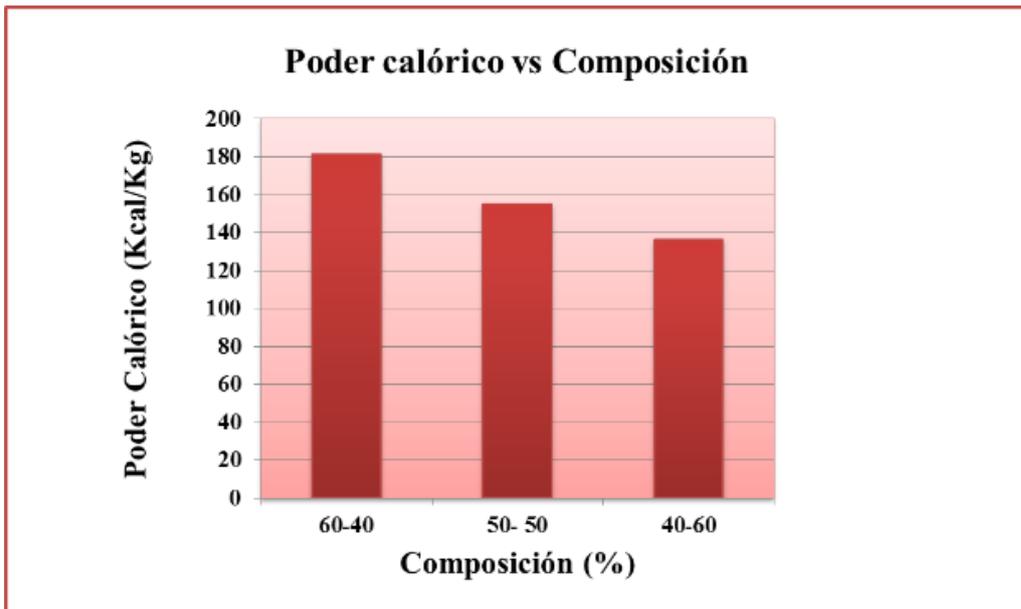


Figura 3.9. Valor calórico de las briquetas de Jugo de henequén. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.9 se muestra el valor calórico de las briquetas, se observa que los mayores valores se obtienen para las briquetas con composiciones 60 % - 40 % de jugo de henequén.

Generación de cenizas

El porcentaje de cenizas se determinó siguiendo la técnica descrita en el capítulo dos en la figura 3.10 se muestran los resultados del porcentaje de cenizas promedio obtenido en las briquetas compuestas por carbonilla y jugo de henequén, y en el (Anexo F) se relacionan los datos de las corridas.

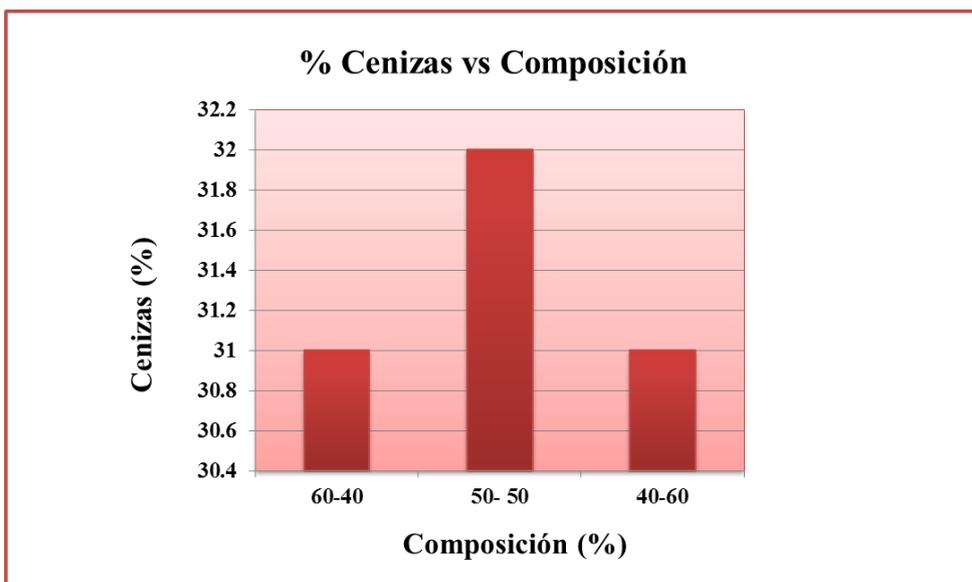


Figura 3.10. Generación de cenizas de las briquetas de Jugo de henequén. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.10 se muestra el porcentaje de cenizas de las briquetas, donde se observa que las briquetas de la composición 50 % de carbonilla y 50 % de jugo de henequén presenta el mayor porcentaje de cenizas.

3.2.2.2. Propiedades de las briquetas obtenidas de la mezcla compuesta por Carbonilla, Jugo de Henequén y Miel final.

Tabla 3.7. Resumen del promedio de las propiedades de las briquetas obtenidas de la mezcla compuesta por Carbonilla, Jugo de Henequén y Miel final.

Composición Carbonilla- Jugo de henequén- Miel (%)	Densidad (kg/m ³)	Tiempo de secado (días)	Humedad Liberada (%)	Resistencia de impacto (%)	Valor calórico (Kcal/Kg)	Cenizas (%)
60-20-20	707	20	32	100	198,32	23
60-30-10	663	19	31	100	184,05	23
60-25-15	768	21	30	100	189,26	20

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 3.7 el IRI presenta el mismo valor para todas las composiciones. Por tanto, no se tuvo en cuenta el análisis del mismo.

Densidad

A las briquetas obtenidas en el laboratorio se le determinó la densidad, aplicando el método descrito en el capítulo dos, en la figura 3.11 se muestra los resultados de las densidades promedio obtenidas para las diferentes composiciones para las briquetas compuestas de carbonilla, jugo de henequén y miel final, en el (Anexo G) se relacionan los datos de las corridas.

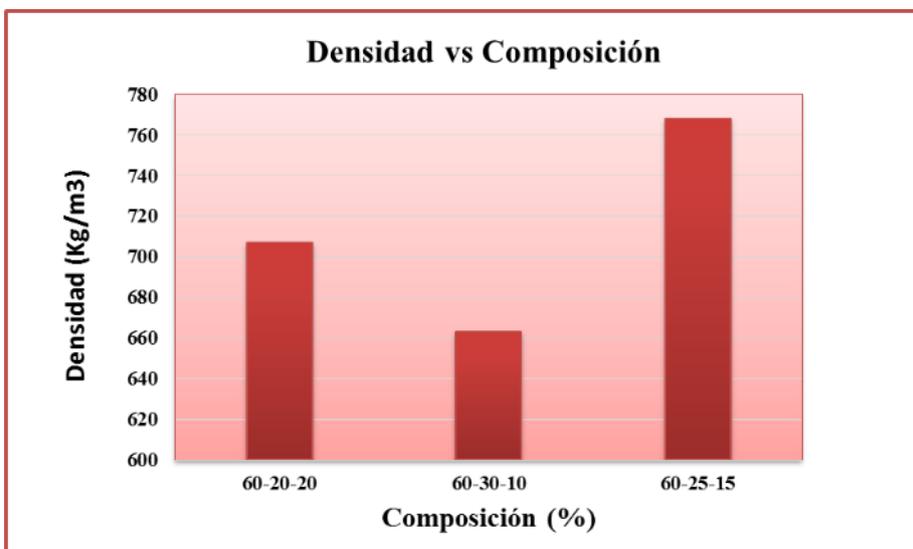


Figura 3.11. Densidades de las briquetas de Jugo de henequén y Miel final. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.11 se muestran las densidades de las briquetas de jugo de henequén y miel final como aglutinantes en composiciones distintas. Se observa que las mayores densidades son alcanzadas por la composición 60% de carbonilla y 25% de jugo de henequén y 15 % de miel final.

Tiempo de secado

La briqueta compactada es secada a una temperatura ambiente de 27,5 ° C, sobre una meseta de concreto en el laboratorio, en la figura 3.12 se muestran los resultados del tiempo de secado promedio obtenido para las briquetas compuestas de carbonilla, jugo de henequén y miel final, en el (Anexo H) se relacionan los datos de las corridas.

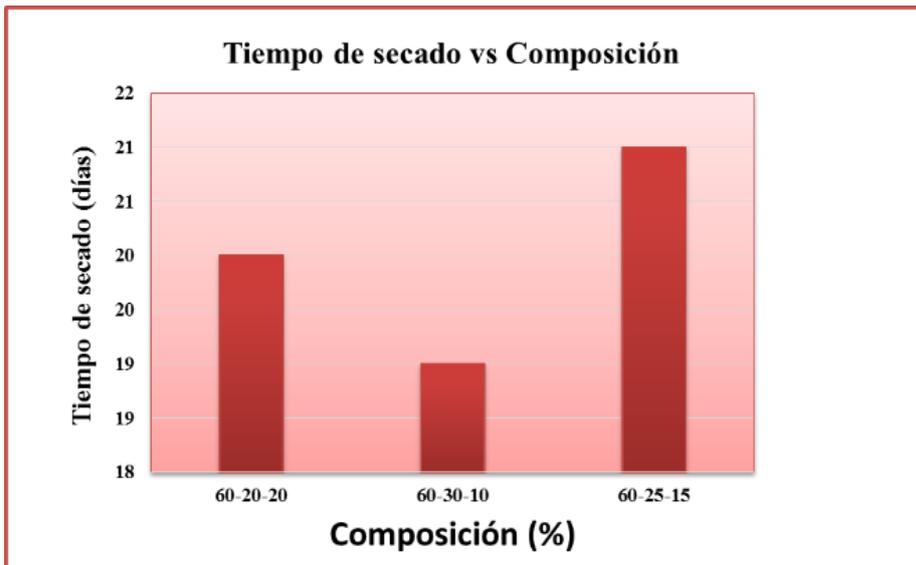


Figura 3.12. Tiempo de secado de las briquetas de Jugo de Henequén y Miel final.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 3.12, el mayor tiempo de secado se obtiene para las briquetas con 60 % de carbonilla, 25 % de jugo de henequén y 15 % de miel final con 21 días, y el menor tiempo de secado se obtiene para las briquetas con 60 % de carbonilla, 30 % de jugo de henequén y 10 % de miel final con 19 días.

Humedad liberada

Para determinar la humedad liberada se siguió el procedimiento descrito en el capítulo dos, en la figura 3.13 se muestran los resultados del porcentaje de humedad liberada promedio obtenido en las briquetas compuestas de carbonilla, jugo de henequén y miel, en el (Anexo I) se relacionan los datos de las corridas.

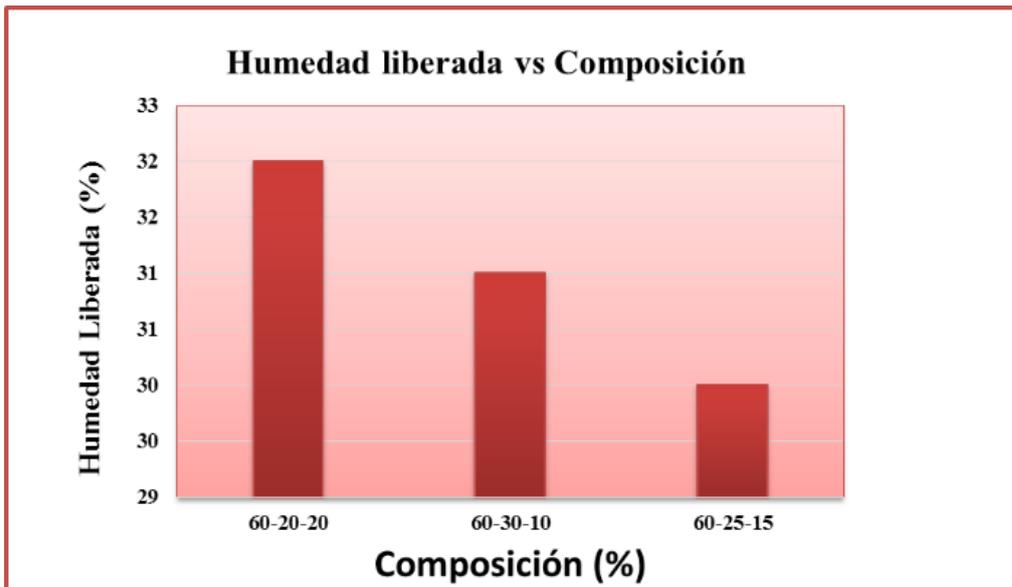


Figura 3.13. Humedad liberada de las briquetas de Jugo de Henequén y Miel final.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.13 se muestra el porcentaje de humedad liberada de las briquetas, donde se observa que las briquetas compuestas por 60 % de carbonilla y 20 % de jugo de henequén y 20 % de miel final poseen un mayor porcentaje de humedad liberada, mientras que las briquetas compuestas por 60 % de carbonilla, 25 % de jugo de henequén y 15 % de miel final presentan el menor porcentaje.

Tiempo de combustión

El tiempo de combustión se determinó siguiendo la técnica del capítulo 2 en la figura 3.14 se muestran los resultados del tiempo (min) de combustión promedio obtenido en las briquetas de carbonilla y lodo en el (Anexo J) se relacionan los datos de las corridas.

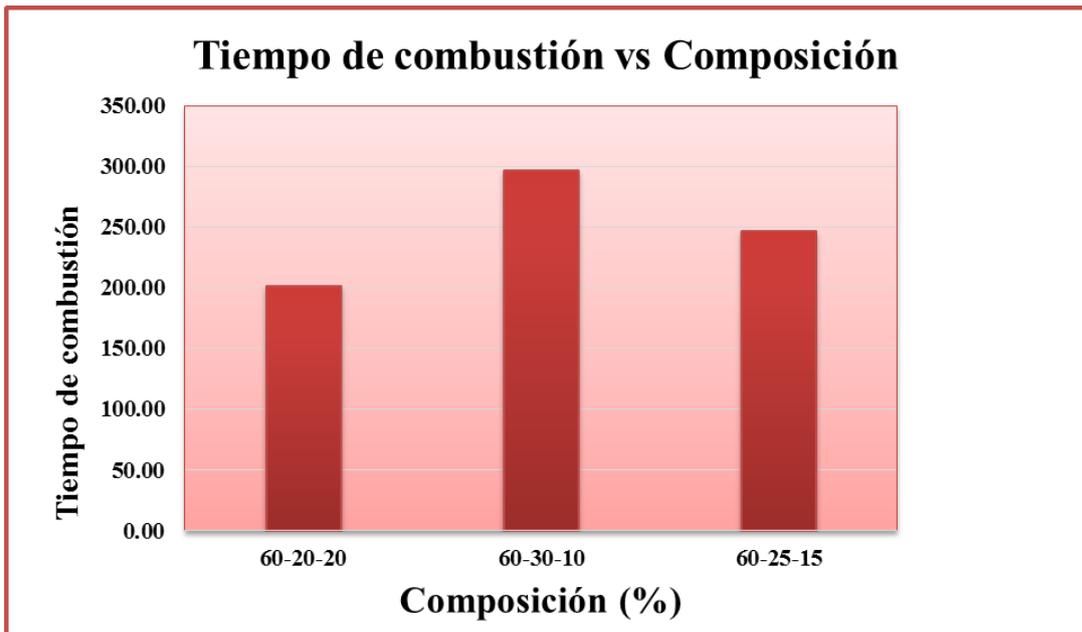


Figura 3.14. Tiempo de combustión de las briquetas de Jugo de Henequén y Miel final.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.14 se muestra el tiempo de combustión de las briquetas elaboradas, donde se observa que el tiempo de combustión es mayor para las briquetas de la composición 60 % de carbonilla, 30 % de jugo de henequén y 10 % de miel final .

Valor calórico

La briqueta fabricada se sometió a la combustión en un recipiente de aluminio, para calentar 500 mL de agua, y los resultados obtenidos se determinaron mediante el procedimiento descrito en el capítulo dos, en la figura 3.15 se muestran los resultados del valor calórico promedio obtenido para las composiciones de las briquetas de carbonilla, jugo de henequén y miel final, en el (Anexo K) se relacionan los datos de las corridas.

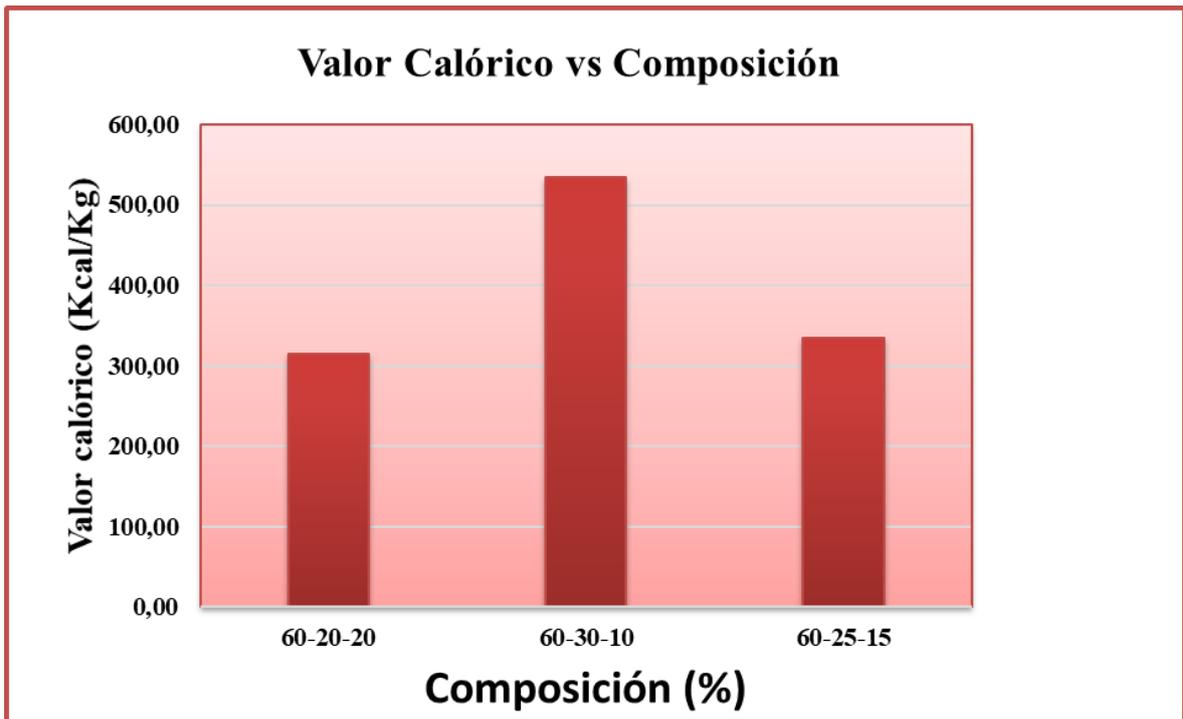


Figura 3.15. Valor calórico de las briquetas de Jugo de Henequén y Miel final. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.15 se muestra el valor calórico de las briquetas, se observa que los mayores valores se obtienen para las briquetas con composiciones 60 % de carbonilla – 30 % de jugo de henequén y 10 % de miel final.

Generación de cenizas

El porcentaje de cenizas se determinó siguiendo la técnica descrita en el capítulo dos en la figura 3.16 se muestran los resultados del porcentaje de cenizas promedio obtenido en las briquetas compuestas por carbonilla, jugo de henequén y miel final, en el (Anexo L) se relacionan los datos de las corridas.

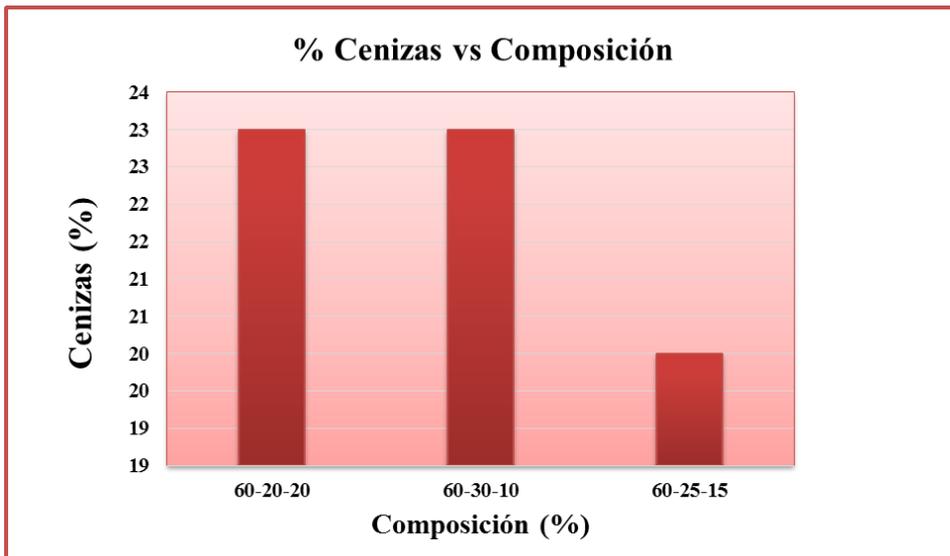


Figura 3.16. Generación de cenizas de las briquetas de Jugo de Henequén y Miel final.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.16 se muestra el porcentaje de cenizas de las briquetas, donde se observa que las briquetas de la composición 60 % de carbonilla y 25 % de jugo de henequén y 15 % de miel final presenta el menor porcentaje de cenizas.

3.2.3. Análisis estadístico de las variables independientes y dependientes

Antes de analizar estadísticamente los datos es necesario destacar el tipo de briqueta que se desea, para así tener un punto de partida en la selección de la briqueta óptima la cual posee como compromiso las siguientes características:

- Alta densidad
- Bajo tiempo de secado
- Alta resistencia al impacto
- Alto valor calórico
- Bajo porcentaje de cenizas
- Bajo porcentaje de humedad liberada
- Alto tiempo de combustión

A partir de estas características se analizarán los indicadores con el fin de determinar el mejor aglutinante en la formulación de briquetas, para posteriormente proponer la mejor formulación.

3.2.3.1 Densidad

En la figura 3.17 se muestra la prueba LSD de Fisher para un 95 % de confianza, en el (Anexo G) de la tabla 1 se calcula el análisis de la varianza.

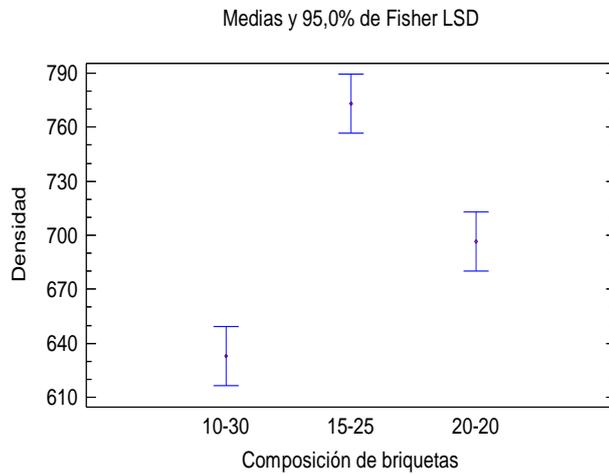


Figura 3. 17. Prueba LSD de Fisher para la densidad. Fuente:("Statgraphics Centurion," 2007)

En la figura 3.17 se muestran diferencias significativas entre las medias, esto demuestra las composiciones muestran diferente comportamiento entre las densidades de las briquetas.

3.2.3.2. Tiempo de secado

En la figura 3.18 se muestra la prueba LSD de Fisher para el tiempo de secado con un 95 % de confianza, en el (Anexo H) de la tabla 1 se calcula el análisis de la varianza.

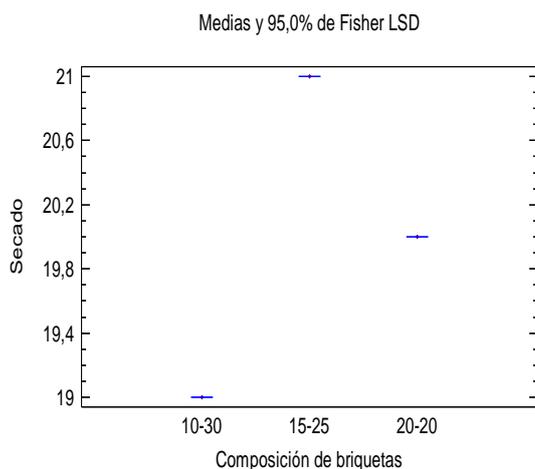


Figura 3. 18. Prueba LSD de Fisher para el tiempo de secado. Fuente: ("Statgraphics Centurion," 2007)

En la figura 3.18 se muestran diferencias significativas entre las medias, esto demuestra que de las composiciones evaluadas, la composición que presenta 60% de carbonilla, 30% de jugo de henequén y 10% de miel tiene el menor tiempo de secado.

3.2.3.3. Humedad liberada

En la figura 3.19 se muestra la prueba LSD de Fisher para el porcentaje de humedad liberada con un 95 % de confianza, en el (Anexo I) de la tabla 1 se calcula el análisis de la varianza.

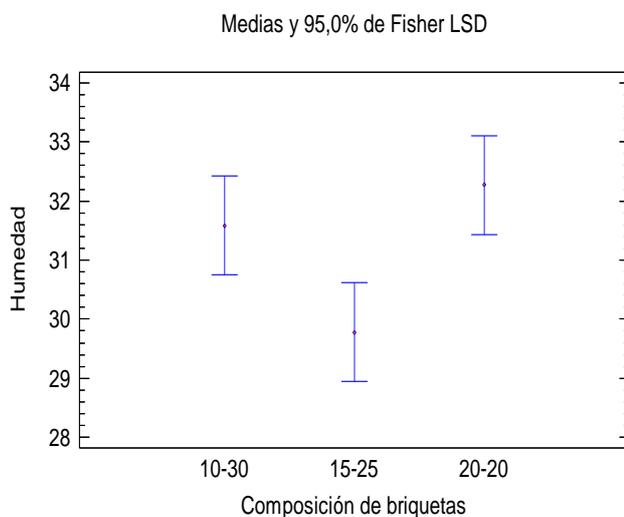


Figura 3. 19. Prueba LSD de Fisher para la Humedad liberada. Fuente:("Statgraphics Centurion," 2007)

En la figura 3.17 se muestran diferencias significativas entre las medias, esto demuestra que la composición de 60% carbonilla, 15% de jugo de henequén y 25% de miel, tiene menor porcentaje de humedad, lo cual es un indicador deseado en combustibles sólidos y sobre todo en productos como las briquetas.

3.2.3.4. Tiempo de combustión.

En la figura 3.20 se muestra la prueba LSD de Fisher para el porcentaje de humedad liberada con un 95 % de confianza, en el (Anexo J) de la tabla 1 se calcula el análisis de la varianza

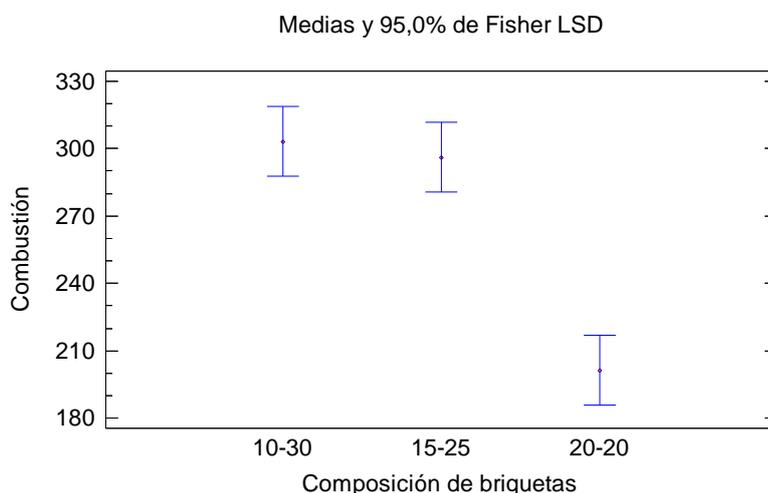


Figura 3. 20. Prueba LSD de Fisher para el tiempo de combustión. Fuente:("Statgraphics Centurion," 2007)

En la figura 3.20. se muestran diferencias significativas entre las medias de dos de las composiciones, esto demuestra que de las composiciones utilizadas la que presenta 60% de carbonilla, 30% de jugo de henequén y 10% de miel tiene mayor tiempo de combustión.

3.2.3.5 Valor calórico

En la figura 3.21 se muestra la prueba LSD de Fisher para el valor calórico con un 95 % de confianza, en el (Anexo K) de la tabla 1 se calcula el análisis de la varianza.

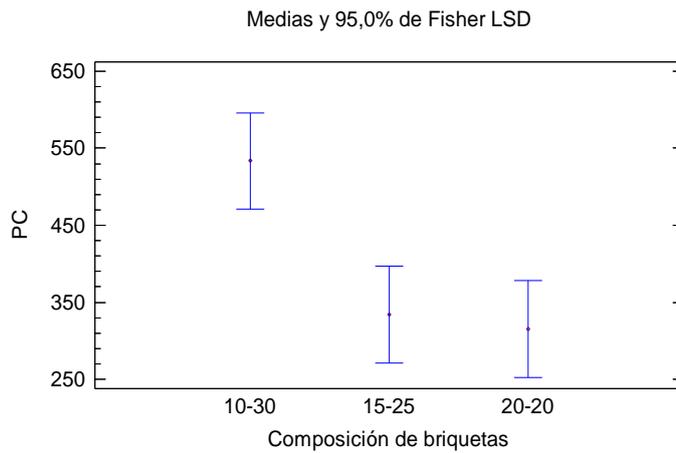


Figura 3. 21. Prueba LSD de Fisher para el valor calórico. Fuente:(*"Statgraphics Centurion," 2007*)

En la figura 3.21. se muestran diferencias significativas entre las medias en la composición 60% de carbonilla, 30% de jugo de henequén y 10% de miel, esto demuestra que dicha composición tiene mejor comportamiento en el valor calórico de las briquetas para las composiciones y presiones de compactación estudiadas, pues poseen ligeros valores superiores entre las medias de la prueba LSD de Fisher.

3.2.3.6 Porcentaje de cenizas

En la figura 3.22. se muestra la prueba LSD de Fisher para el porcentaje de cenizas con un 95 % de confianza, en el (Anexo L) de la tabla 1 se calcula el análisis de la varianza.

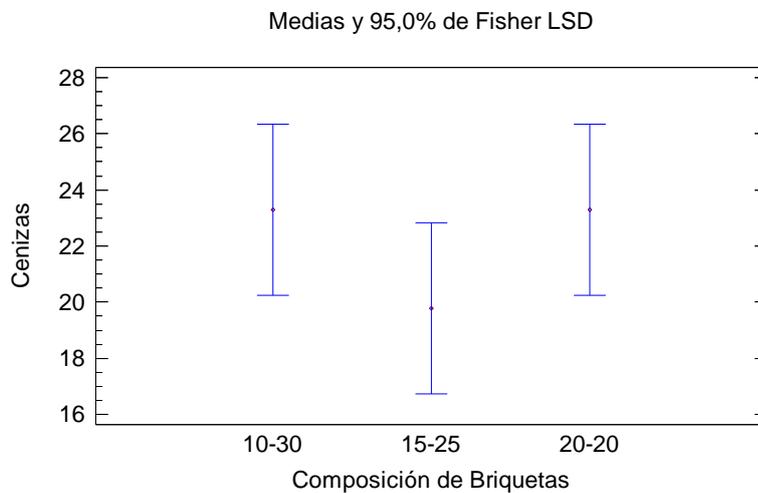


Figura 3. 22. Prueba LSD de Fisher para el porciento de cenizas. Fuente:("Statgraphics Centurion," 2007)

En la figura 3.22. no se muestran diferencias significativas entre las medias, esto demuestra que de las composiciones representadas el porciento de cenizas es similar.

3.2.3.7 Determinación de la mejor formulación de las composiciones realizadas en la fabricación de briquetas.

Como las briquetas elaboradas de carbonilla y jugo de henequén poseen un índice de resistencia al impacto menor al 10 % la selección de la mejor formulación para briquetas solamente se tuvo en cuenta las briquetas elaboradas de carbonilla, miel y jugo de henequén.

Posteriormente se analizó que las briquetas con las composiciones de carbonilla, jugo de henequén y de miel final 60-25-15 % y 60-30-10 % respectivamente de las siete propiedades evaluadas en cinco propiedades que presentan diferencias significativas presentan un resultado satisfactorio en las propiedades densidad y humedad para la composición 60-25-15 %, mientras que para la composición 60-30-10 % resultaron satisfactorias las propiedades valor calórico y tiempo de secado.

La formulación propuesta es la composición 60-30-10 % pues resultaron las briquetas con mayor valor calórico, menor tiempo de secado y con menor concentración de miel, que se expuso en el capítulo anterior el interés en su reducción.

3.3. Consideraciones ambientales, sociales y económicas

La fabricación de briquetas de carbón vegetal a partir de los aglutinantes miel final y jugo de henequén puede influir positiva o negativamente en el entorno en que se desarrolle el proceso de producción de las mismas.

Impacto ambiental.

En el proceso de producción del carbón, se generan altas cantidades de carbonilla como residuo, la cual, siendo reutilizada en la fabricación de briquetas de carbón vegetal, se convertirá en una materia prima. Disminuirá la acumulación de la misma en el medio ambiente. Teniendo en cuenta que las briquetas producidas presentan baja emisión de

humo, su combustión no constituye una amenaza en cuanto a la emisión de gases a la atmósfera.

Impacto social.

La inversión en la implementación de una Minindustria productora de briquetas de carbón vegetal generaría empleo. La fuerza de trabajo sólo necesitará una capacitación básica garantizada por la entidad inversionista que la gestionará con las unidades de más experiencias en la actividad y apoyada en la documentación técnica contratada con el equipamiento. La administración extranjera garantiza el complemento de los conocimientos tecnológicos para la completa capacitación del personal y su adiestramiento para que se opere con éxito todo el proceso productivo y comercial.

Impacto económico.

Las materias primas utilizadas para la producción de briquetas de carbón vegetal constituyen en su mayoría residuos de procesos industriales. A excepción de la miel final producida en la UEB Elpidio Gómez en el municipio de Palmira, Cienfuegos, la cual compete en sus variados usos y tiene un costo en el mercado. Sin embargo, su mínimo uso en la producción de briquetas no constituye un costo elevado, comparado con las posibles ganancias de la producción y venta de las briquetas en el mercado. La carbonilla es fácilmente adquirida como residuo de la producción de carbón, sin costo agregado, de la misma forma que el jugo de henequén. El jugo de henequén procedente de la Henequenera Juraguá constituye un desecho, por lo que su uso inminente lo convierte en un residuo, que a su vez será convertido en materia prima para la producción de briquetas de carbón vegetal.

A continuación, en la Tabla 3.8 se muestra un análisis costo-beneficio para caracterizar económicamente la formulación de briquetas de carbón vegetal propuesta, se estableció como base de cálculo 1 000 t de briquetas.

Tabla 3.8. Análisis costo-beneficio de formulación de briquetas propuesta.

	Almidón	Miel Final	Beneficio
Concentración (t de aglutinante / t de briquetas)	0,08	0,1	-
Costo del aglutinante (CUC / t de aglutinante)	550	90	460
Costo de briquetas (CUC / t de briquetas)	44 000	9 000	35 000

Fuente: Elaboración propia.

Las briquetas elaboradas reportan un beneficio de 35 000 CUC por cada mil toneladas de briquetas, el cual representaría preliminarmente el ahorro por gastos de materias primas.

Conclusiones

1. Mediante un estudio bibliográfico se demostró que es posible la fabricación de briquetas a partir de la carbonilla empleando miel final y jugo de henequén como aglutinantes.
2. El diseño de experimento realizado demostró que se pueden fabricar briquetas utilizando la mezcla constituida por carbonilla, jugo de henequén y miel final.
3. Las variables evaluadas que influyen en la calidad final de las briquetas son: densidad, humedad eliminada, resistencia al impacto, tiempo de secado, tiempo de combustión, valor calórico y generación de cenizas.
4. El análisis cuantitativo y estadístico aplicado a las briquetas con los dos aglomerantes empleados demostró que la mejor formulación es la que está compuesta por 60 % de carbonilla, 30 % de jugo de henequén y 10 % de miel final.
5. Las briquetas elaboradas reportan un beneficio de 35 000 CUC por cada 1000 t de briquetas elaboradas.

Recomendaciones:

- Desarrollar un sistema completo para la producción de briquetas que abarque la calidad de acuerdo al destino final.
- Proponer para próximas investigaciones perfeccionar el mecanismo utilizado para la estimación del valor calórico.
- Utilizar tres calidades de briquetas para la exportación, consumo interno y generación de energía en la propia empresa.
- Evaporación del jugo de henequén para eliminar el mayor porcentaje de agua posible, previa a su utilización como aglutinante, para obtener mejor calidad en la producción.

Bibliografía

- Almanza, I. (2017). *Formulación de briquetas de carbón vegetal utilizando como aglutinantes los residuales de la UEB glucosa Cienfuegos*. (Tesis de Grado), Universidad de Cienfuegos " Carlos Rafael Rodrigues", Cienfuegos.
- Baracoa, R. F. D. (2014). Características de *Dichrostachys cinerea* (L.) Wight & Arm (Marabú) para la producción de carbón. *Revista Forestal de Baracoa*.
- Becerra López, D., & Balseca Villacís, B. (2017). Análisis comparativo de módulo resiliente y ensayos de análisis comparativo de módulo resiliente y ensayos dedeformación permanente en mezclas asfálticas. México.
- Cancio-Bello, A. (2007). Evaluación de mezclas y aglutinantes en la elaboración de briquetas de biomasa. Retrieved from:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=15&ved=0ahUKEwic5bC1h_TbAhWKt1kKHSiSAm8QFghkMA4&url=http%3A%2F%2Fgo.galegroup.com%2Fps%2Fi.do%3Fid%3DGALE%257CA146742465%26sid%3DgoogleScholar%26v%3D2.1%26it%3Dr%26linkaccess%3Dabs%26issn%3D02535777%26p%3DAONE%26sw%3Dw&usg=AOvVaw2bUOxokKGoIJVS-Dr7Fyxq.
- Casas, W. (2010). *Optimización de producción de briquetas de carbón y biomasa*. (Tesis de Grado), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Colectivo de Autores. (1986). *La industria de los derivados de la caña de azúcar*. Cuba.
- Colectivo de Autores. (2007). Ciencias forestales y del ambiente. *Revista Chapingo*, México 7.
- Contreras, G. (2015). Qué aglutinante usar para briquetas. Retrieved from <http://infomadera.net/uploads/articulos>.
- Cuenca, E. G. F. (2011). *Desarrollo de un Proceso Tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera cascarilla de arroz, y pruebas de producción de Gas Pobre*. (Tesis de Grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

- Chicago. (2007). Estudio de mercado para las briquetas de carbón y carbón vegetal en el mercado de Los Estados Unidos. Argentina: Consulado de la República de Argentina.
- Dsiglide Da Silva Acre, D. (2013). *Proyecto de creacion de una fabrica de briquetas de aserrín en Santa Rosa del Aguaray*. (Tesis de Grado).Univesidad tecnologica Intercontinental, Parauay.
- E. Wolf ; E. Vogel Ilcación. (1985). Manual de Carbón Vegetal con Métodos Simples *Facultad de Silvicultura y Manejo de Recursos Renovables*. (Tesis de Grado). Universidad Autónoma de Nuevo León, Guadalupe.
- Ecured. (2017). Carbón vegetal .Retrieved from https://www.ecured.cu/Carb%C3%B3n_vegetal
- Hernandes, J. R. (2011). *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.* (Tesis de Grado), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Retrieved from <dspace.espech.edu.ec/bitstream/123456789/1740/1/85T00188.pdf>
- Maldonado, A. L. M. (2015). *Determinación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de briquetas elaboradas con aserrín, desechos sólidos, vacasa y tetrabrik, utilizando almidón y cal como aglutinantes*. (Tesis de Grado). Universidad de San Carlos Guatemala.
- Mallón, M. d. I. C. (2017). *Fabricación de briquetas de carbón vegetal utilizando como aglutinantes residuos de la industria azucarera*.(Tesis de Grado). Universidad de Cienfuegos " Carlos Rafael Rodrigues", Cienfuegos.
- Marticorena, V. E. R. (2014). *Aprovechamiento de la cachaza, la colofonia y la arcilla como aglutinantes en la formulación de briquetas energéticas utilizando residuos de aserrío*. (Tesis de Grado). Universidad San Carlos Guatemala.
- Martin, F. M. (2015). Ecologia. *FAO(2293_9990)*.
- Molina, J. M. (2017). Experimentan salto en la producción de carbón vegetal en Cienfuegos. *5 Septiembre*.
- Oficina Nacional de Normalización.(2008). *NC 580 Especificaciones de calidad del carbón vegetal en Cuba*. La Habana, Cuba.

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1983). Métodos simples para fabricar carbón vegetal. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO*. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/X5328S/X5328S02.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2014). Manual del Usuario. Módulo Opciones de Uso Final de la Energía. SubMódulo Productos Intermedios o Finales. Sección 1: Briquetas: FAO
- Rendón, L. (2007). El jarabe de henequén (agave fourcroydes Lem.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(4), 463-467.
- Stassen, H. E. (2002). Nuevas tecnologías de producción de carbón vegetal. *Revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, 53.
- Statgraphics Centurion (Version XV). (2007). Estados Unidos. Retrieved from www.statgraphic.com
- Tanco, M. (2009). *Aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) para la mejora de procesos I*. Universidad de Navarra, España. Retrieved from http://www.um.edu.uy/_upload/_descarga/web_descarga_178_DiferentesenfoquesDiseoexperimentosDOE.-Tanco_Viles_Pozueta.pdf
- Universidad Rafael Urdaneta.. (2005). Capitulo 5 Experimentos Factoriales. Venezuela: URU.
- Walpole, R. E. (1999). *Probabilidad y estadísticas para ingenieros*. (6 ed.). México: Pablo Eduardo Roig Vásquez.

Anexos

Anexo A. Datos de las densidades de las briquetas de jugo de henequén.

Tabla 1. Composición: 60% Carbonilla-40% Jugo de henequén

No. Briquetas	densidad(Kg/m3)
1	591.24
2	574.11
3	609.76
4	614.49
5	619.94
6	635.76

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Composición: 50% Carbonilla-50% Jugo de henequén

No. Briquetas	densidad(Kg/m3)
1	581.34
2	639.11
3	604.03
4	642.72
5	605.17
6	607.19

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Composición: 40% Carbonilla-60% Jugo de henequén

No. Briquetas	densidad(Kg/m3)
1	597.56
2	588.63
3	577.73
4	608.73
5	576.49
6	589.48

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B. Datos del tiempo de secado de las briquetas de jugo de henequén.

Tabla 1. Composición: 60% Carbonilla-40% Jugo de henequén

No. Briquetas	Tiempo de secado (días)
1	16
2	
3	
4	
5	
6	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Composición: 50% Carbonilla-50% Jugo de henequén

No. Briquetas	Tiempo de secado (días)
1	15
2	
3	
4	
5	
6	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Composición: 40% Carbonilla-60% Jugo de henequén

Fuente: Elaboración propia.

Anexo C. Datos de la Humedad liberada de las briquetas de jugo de henequén.

Tabla 1. Composición: 60% Carbonilla-40% Jugo de henequén

No. Briquetas	Humedad Liberada
1	39.19793014
2	39.49771689
3	38.57142857
4	39.02439024
5	38.61386139
6	39.41441441

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Composición: 50% Carbonilla-50% Jugo de henequén

No. Briquetas	Humedad Liberada
1	45.69428571
2	44.96268657
3	46.07584089
4	46.38554217
5	47.95031056
6	45.11749347

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Composición: 40% Carbonilla-60% Jugo de henequén

No. Briquetas	Humedad Liberada
1	45.67901235
2	47.01986755
3	49.13098771
4	48.08962264
5	47.08333333
6	47.2972973

Fuente: Elaboración propia.

Anexo D. Datos del IRI de las briquetas de jugo de henequén.

Tabla 1. Composición: 60% Carbonilla-40% Jugo de henequén

No. Briquetas	Resistencia de impacto (2m) trozos
1	0.001
2	0.003
3	0.001
4	0.001
5	0.001
6	0.001

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Composición: 50% Carbonilla-50% Jugo de henequén

No. Briquetas	Resistencia de impacto(2m) trozos
1	12.5
2	0.001
3	0.001
4	0.001
5	12.5
6	0.001

Fuente: Elaboración propia.

Tala 3. Composición: 40% Carbonilla-60% Jugo de henequén

No. Briquetas	Resistencia de impacto(2m) trozos
1	12.5
2	33.3333333
3	0.001
4	7.5
5	25
6	9.09090909

Fuente: Elaboración propia.

Anexo E. Datos de los valores calóricos de las briquetas de jugo de henequén.

Tabla 1. Composición: 60% Carbonilla-40% Jugo de henequén

No. Briquetas	Valor calórico (Kcal/Kg)
1	181.13
2	172.37
3	171.46
4	170.87
5	168.43
6	180.82

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Composición: 50% Carbonilla-50% Jugo de henequén

No. Briquetas	Valor calórico (Kcal/Kg)
1	155.22
2	194.36
3	187.21
4	189.11
5	157.33
6	168.11

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Composición: 40% Carbonilla-60% Jugo de henequén

No. Briquetas	Valor calórico (Kcal/Kg)
1	136.11
2	142.76
3	132.29
4	131.07
5	127.78
6	138.9

Fuente: Elaboración propia.

Anexo F. Datos de las densidades de las briquetas de jugo de henequén y miel final.

Tabla 1. Composición: 60% Carbonilla-20% Jugo de henequén-20% Miel

No. Briquetas	Densidad (kg/m³)
1	652.3941
2	733.7117
3	717.6437
4	693.2709
5	720.1352
6	662.6638

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Composición: 60% Carbonilla-30% Jugo de henequén-10% Miel

No. Briquetas	Densidad (kg/m³)
1	628.6707
2	642.5837
3	608.3452
4	620.6351
5	645.1271
6	652.3941
7	669.4398

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Composición: 60% Carbonilla-25% Jugo de henequén-15% Miel

No. Briquetas	Densidad (kg/m³)
1	777.0412
2	766.4977
3	783.7113
4	817.4820
5	756.2956
6	736.0281

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Pruebas de Múltiple Rangos para Densidad por Composición.

Método: 95,0 porcentaje LSD

Composición	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
10-30	6	632,959	10,8951	X
20-20	6	696,637	10,8951	X
15-25	6	772,843	10,8951	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
10-30 - 15-25	*	-139,883	32,8414
10-30 - 20-20	*	-63,6772	32,8414
15-25 - 20-20	*	76,2061	32,8414

* indica una diferencia significativa.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo G. Datos del tiempo de secado de las briquetas de jugo de henequén y miel final.

Tabla 1. Composición: 60% Carbonilla-20% Jugo de henequén-20% Miel

No. Briquetas	Tiempo de secado (días)
1	20
2	
3	
4	
5	
6	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Composición: 60% Carbonilla-30% Jugo de henequén-10% Miel

No. Briquetas	Tiempo de secado (días)
1	19
2	
3	
4	
5	
6	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Composición: 60% Carbonilla-25% Jugo de henequén-15% Miel

No. Briquetas	Tiempo de secado (días)
1	21
2	
3	
4	
5	
6	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Pruebas de Múltiple Rangos para Secado por Composición.

Método: 95,0 porcentaje LSD

Composición	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
10-30	6	19,0	0,0	X
20-20	6	20,0	0,0	X
15-25	6	21,0	0,0	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
10-30 - 15-25	*	-2,0	0,0
10-30 - 20-20	*	-1,0	0,0
15-25 - 20-20	*	1,0	0,0

* indica una diferencia significativa.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo H. Datos de la humedad liberada de las briquetas de jugo de henequén y miel final.

Tabla 1. Composición: 60% Carbonilla-20% Jugo de henequén-20% Miel

No. Briquetas	Humedad Liberada
1	33.17
2	33.68
3	33.32
4	33.15
5	31.77
6	28.52

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Composición: 60% Carbonilla-30% Jugo de henequén-10% Miel

No. Briquetas	Humedad Liberada
1	31.27
2	30.13
3	31.18
4	30.91
5	33.02
6	33.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Composición: 60% Carbonilla-25% Jugo de henequén-15% Miel

No. Briquetas	Humedad Liberada
1	29.30
2	28.90
3	30.08
4	30.35
5	30.02
6	30.04

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Pruebas de Múltiple Rangos para Humedad por Composición.

Método: 95,0 porcentaje LSD

Composición	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
15-25	6	29,7817	0,552064	X
10-30	6	31,585	0,552064	X
20-20	6	32,2683	0,552064	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
10-30 - 15-25	*	1,80333	1,6641
10-30 - 20-20		-0,683333	1,6641
15-25 - 20-20	*	-2,48667	1,6641

* indica una diferencia significativa.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo I. Datos del IRI de las briquetas de jugo de henequén y miel.

Tabla 1. Composición: 60% Carbonilla-20% Jugo de henequén-20% Miel

No. Briquetas	Resistencia de impacto %
1	100
2	
3	
4	
5	
6	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Composición: 60% Carbonilla-30% Jugo de henequén-10% Miel

No. Briquetas	Resistencia de impacto %
1	100
2	
3	
4	
5	
6	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Composición: 60% Carbonilla-25% Jugo de henequén-15% Miel

No. Briquetas	Resistencia de impacto %
1	100
2	
3	
4	
5	
6	

Fuente: Elaboración propia.

Anexo J. Tiempo de combustión de las briquetas de jugo de henequén y miel final.

Tabla 1. Composición: 60% Carbonilla-20% Jugo de henequén-20% Miel

No. Briquetas	Tiempo de combustión
1	175
2	157
3	235
4	185
5	200
6	256

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Composición: 60% Carbonilla-30% Jugo de henequén-10% Miel

No. Briquetas	Tiempo de combustión
1	295
2	296
3	285
4	318
5	291
6	292

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Composición: 60% Carbonilla-25% Jugo de henequén-15% Miel

No. Briquetas	Tiempo de combustión
1	276
2	266
3	221
4	218
5	268
6	231

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Pruebas de Múltiple Rangos para Combustión por Composición.

Método: 95,0 porcentaje LSD

Composición	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20-20	6	201,333	10,228	X
15-25	6	296,167	10,228	X
10-30	6	303,167	10,228	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
10-30 - 15-25		7,0	30,8305
10-30 - 20-20	*	101,833	30,8305
15-25 - 20-20	*	94,8333	30,8305

* indica una diferencia significativa.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo K. Datos de los valores calóricos de las briquetas de jugo de henequén y miel.

Tabla 1. Composición: 60% Carbonilla-20% Jugo de henequén-20% Miel

No. Briquetas	Valor calórico (Kcal/Kg)
1	358,42
2	277,09
3	341,74
4	320,89
5	277,75
6	316,60

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Composición: 60% Carbonilla-30% Jugo de henequén-10% Miel

No. Briquetas	Valor calórico (Kcal/Kg)
1	586,25
2	648,09
3	664,15
4	325,82
5	632,13
6	345,49

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Composición: 60% Carbonilla-25% Jugo de henequén-15% Miel

No. Briquetas	Valor calórico (Kcal/Kg)
1	430,86
2	355,85
3	326,06
4	376,96
5	307,31
6	206,60

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Pruebas de Múltiple Rangos para PC por Composición.

Método: 95,0 porcentaje LSD

Composición	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20-20	6	315,415	41,548	X
15-25	6	333,94	41,548	X
10-30	6	533,655	41,548	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
10-30 - 15-25	*	199,715	125,24
10-30 - 20-20	*	218,24	125,24
15-25 - 20-20		18,525	125,24

* indica una diferencia significativa.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo L. Datos de la generación de cenizas de las briquetas de jugo de henequén y miel final.

Tabla 1. Composición: 60% Carbonilla-20% Jugo de henequén-20% Miel

No. Briquetas	% Cenizas
1	6,421052632
2	27,22834646
3	25,94716981
4	27,5
5	26,29602888
6	26,360601

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Composición: 60% Carbonilla-30% Jugo de henequén-10% Miel

No. Briquetas	% Cenizas
1	21,03007519
2	24,10687023
3	25,43589744
4	25,44554455
5	21,52985075
6	22,28571429

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Composición: 60% Carbonilla-25% Jugo de henequén-15% Miel

No. Briquetas	% Cenizas

1	20,28252788
2	20,03957038
3	18,2875
4	18,62045985
5	20,73304826
6	20,7173913

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Pruebas de Múltiple Rangos para Cenizas por Composición

Método: 95,0 porcentaje LSD

Composición	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
15-25	6	19,7801	2,02246	X
20-20	6	23,2922	2,02246	X
10-30	6	23,3057	2,02246	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
10-30 - 15-25		3,52558	6,09637
10-30 - 20-20		0,0134589	6,09637
15-25 - 20-20		-3,51212	6,09637

* indica una diferencia significativa.

Fuente: Elaboración propia.