

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Maestría en Ciencias de la Energía

**PRODUCCIÓN DE PELLETS DE CASCARILLA DE ARROZ CON MÁXIMO
CONTENIDO ENERGÉTICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA ENERGÍA**

PRESENTA

INÉS MARÍA RÍOS BADRAN

DIRIGIDO POR

Dra. CLAUDIA GUTIÉRREZ ANTONIO

Santiago de Querétaro, Querétaro, Octubre 2017.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Maestría en Ciencias de la Energía

PRODUCCIÓN DE PELLETS DE CASCARILLA DE ARROZ CON MÁXIMO
CONTENIDO ENERGÉTICO

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA ENERGÍA

PRESENTA
INÉS MARÍA RÍOS BADRAN

DIRIGIDA POR
Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Dr. Claudia Gutiérrez Antonio
Presidente

Dr. Miguel Ángel Ramos López
Secretario

Dr. Eduardo Castaño Tostado
Vocal

Dr. José Santos Cruz
Suplente

Dr. Sandra Andrea Mayén Hernández
Suplente

M.S.P. Sergio Pacheco Hernández
Director de la Facultad

Firma
Firma
Firma
Firma

Mayén Hdez. S.A.
Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Dedicatoria

ÍNDICE GENERAL

| Contenido | Página |
|--|---------------|
| ÍNDICE GENERAL | 1 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 4 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 6 |
| | |
| RESUMEN | 8 |
| ABSTRACT | 9 |
| | |
| 1. INTRODUCCIÓN | 10 |
| 1.1. Preámbulo de la investigación..... | 10 |
| 1.2. Descripción del problema..... | 12 |
| 1.3. Objetivos..... | 15 |
| 1.3.1. Objetivo general | 15 |
| 1.3.2. Objetivos particulares | 15 |
| 1.4. Justificación | 16 |
| | |
| 2. ANTECEDENTES | 17 |
| 2.1. Fundamentación teórica | 19 |
| 2.1.1. La biomasa | 19 |
| 2.1.1.1. Procesos de conversión de la biomasa..... | 22 |
| 2.1.1.1.1. Procesos bioquímicos | 23 |
| 2.1.1.1.2. Procesos fisicoquímicos | 24 |
| 2.1.1.1.3. Procesos termoquímicos | 24 |
| 2.1.1.2. La cascarilla de arroz | 28 |
| 2.1.1.2.1. Composición fisicoquímica de la cascarilla de arroz | 29 |
| 2.1.1.3. La paja de trigo..... | 35 |
| 2.1.2. Los pellets | 37 |
| 2.1.2.1. La fabricación de los pellets | 40 |

| | |
|---|----|
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 47 |
| 3.1. Materiales y equipos..... | 47 |
| 3.1.1. Materiales..... | 48 |
| 3.1.2. Equipos..... | 48 |
| 3.2. Métodos..... | 49 |
| 3.2.1. Recolección de biomosas..... | 49 |
| 3.2.2. Descripción del laboratorio para la caracterización de biomasa | 49 |
| 3.2.3. Caracterización de las biomosas | 49 |
| 3.2.4. Determinación de porcentajes de humedad inicial de las biomosas..... | 49 |
| 3.2.5. Secado de la cascarilla de arroz..... | 50 |
| 3.2.5.1. Disminución del tamaño de partícula | 52 |
| 3.2.5.1.1. Contenido de compuestos volátiles | 53 |
| 3.2.5.1.2. Contenido total de carbono..... | 54 |
| 3.2.5.1.3. Contenido total de nitrógeno (N)..... | 54 |
| 3.2.5.1.4. Contenido proximal de cenizas..... | 56 |
| 3.2.5.2. Poder calorífico..... | 57 |
| 3.2.5.3. Dimensiones..... | 59 |
| 3.2.5.4. Durabilidad mecánica..... | 59 |
| 3.2.5.5. Densidad a granel | 60 |
| 3.2.6. Diseño experimental inicial..... | 60 |
| 3.2.7. Elaboración de pellets..... | 61 |
| | |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 62 |
| 4.1. Caracterización de las biomosas..... | 62 |
| 4.1.1. Análisis térmico de la cascarilla de arroz (TGA) | 62 |
| 4.2. Propiedades físicas de las biomosas..... | 64 |
| 4.2.1. Cascarilla de arroz | 64 |
| 4.2.2. Paja de trigo | 68 |
| 4.3. Peletización de las biomosas..... | 71 |
| 4.4. Diseño experimental modificado | 72 |
| 4.5. Pellets de cascarilla de arroz con 2 niveles de humedad..... | 73 |
| 4.6. Pellets de cascarilla de arroz y paja de trigo con porcentajes diferentes..... | 79 |

| | |
|---|----|
| 4.7. Comparación de pellets de cascarilla de arroz y paja de trigo con mejor poder calorífico y humedad de 21%..... | 84 |
| 4.8. Descripción del diseño de experimental realizado | 86 |
| 4.8.1. Diseño experimental realizado | 87 |
| 4.8.2. Diseño experimental con un factor y dos niveles. | 88 |
| 4.8.3. Tabla de datos resultados del software JMP..... | 90 |
| 4.8.4. Análisis estadístico entre M1 y M2 | 90 |
| | |
| 5. CONCLUSIONES..... | 97 |
| | |
| 6. BIBLIOGRAFÍA | 98 |

| | |
|---|-----|
| ANEXO 1. ESTADO FÍSICO DE LA CASCARILLA DE ARROZ Y PAJA DE TRIGO | |
| CON DIFERENTES HUMEDADES..... | 106 |
| Figura A.1. Polvo de cascarilla de arroz con 17.5% de humedad | 107 |
| Figura A.2. Cascarilla de arroz con 21% de humedad | 107 |
| Figura A.3. Cascarilla de arroz con 23% de humedad | 107 |
| Figura A.4. Cascarilla de arroz con 27% de humedad | 108 |
| Figura A.6. Pellets elaborados con el mezclado de cascarilla de arroz y paja de trigo | 108 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Tipos de biomasa..... | 20 |
| Tabla 2. Características químicas de las cuatro variedades de cascarilla de arroz en Canadá | 29 |
| Tabla 3. Poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz y composición elemental a nivel mundial..... | 33 |
| Tabla 4. Poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz en función del contenido de humedad..... | 33 |
| Tabla 5. Composición elemental de la cascarilla de arroz a diferentes porcentajes de humedad..... | 34 |
| Tabla 6. Composición elemental de la paja de trigo con un porcentaje de humedad constante (Lydia Toscano Palomar, 2015)..... | 36 |
| Tabla 7. Composición química de la paja de trigo con un porcentaje de humedad constante (Lydia Toscano Palomar, 2015)..... | 37 |
| Tabla 8. Ventajas de la utilización de los pellets..... | 38 |
| Tabla 9. Instalaciones en función de los servicios prestados..... | 39 |
| Tabla 10. Parámetros para la fabricación de pellets..... | 41 |
| Tabla 11. Caracterización química, física y energética de la cascarilla de arroz. | 65 |
| Tabla 12. Caracterización química, física y energética de la paja de trigo. | 69 |
| Tabla 13. Combinaciones de manera porcentual de biomasa que tendrá cada pellet..... | 72 |
| Tabla 14. Comparación de parámetros de la norma francesa contra resultados de las pruebas a los pellets de cascarilla de arroz con 12.05 y 10.91% de humedad..... | 75 |
| Tabla 15. Combinaciones de porcentajes de cascarilla de arroz y paja de trigo..... | 79 |
| Tabla 16. Caracterización química, física y energéticas para los pellets de cascarilla de arroz y paja de trigo, en comparación con los valores referencia de la norma francesa. | 81 |
| Tabla 17. Factores y variables respuesta evaluados..... | 86 |
| Tabla 18. Variables respuesta evaluadas..... | 87 |
| Tabla 19. Diseño experimental realizado en el proyecto..... | 87 |
| Tabla 20. Resultados de las réplicas de cada muestra, para todos los análisis realizados.... | 90 |

Tabla 21. Contenido de cenizas (%), nitrógeno total Kjeldahl (%TKN), sólidos totales (%), carbono total (%) y calorías totales (kcal) de las muestras evaluadas..... 95

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Pellets de paja de arroz..... | 37 |
| Figura 2. Etapas de la Producción de Pellets..... | 43 |
| Figura 3. Caldera de biomasa | 45 |
| Figura 4. Mufla..... | 51 |
| Figura 5. Desecador..... | 51 |
| Figura 6. Balanza..... | 52 |
| Figura 7. Estufa | 52 |
| Figura 8. Tamiz | 53 |
| Figura 9. Digestor..... | 55 |
| Figura 10. Espectrofotómetro..... | 56 |
| Figura 11. Prensa Manual..... | 57 |
| Figura 12. Calorímetro | 58 |
| Figura 13. Vernier Mitutoyo..... | 59 |
| Figura 14. Peletizadora..... | 62 |
| Figura 15. Análisis termogravimétrico de la cascarilla de arroz con 8.27% de humedad.... | 63 |
| Figura 16. Análisis termogravimétrico de la cascarilla de arroz con 1% de humedad..... | 63 |
| Figura 17. Cascarilla de arroz con humedad inicial de 8.2% | 65 |
| Figura 18. Biomasa con diferentes humedades. A) 10% de humedad. B) 8.2% de humedad. C) 1% de humedad | 65 |
| Figura 19. Relación en los parámetros químicos y energéticos de la cascarilla de arroz con diferentes humedades | 67 |
| Figura 20. Paja de trigo con humedad inicial de 6% | 69 |
| Figura 21. Paja de trigo molida con humedad inicial de 6% | 69 |
| Figura 22. Matriz atascada con la materia prima..... | 72 |
| Figura 23. Pellets de 100% cascarilla de arroz con diferentes humedades. A) 12.05% de humedad. B) 10.91% de humedad..... | 74 |
| Figura 24. Parámetros físicos de pellets cascarilla de arroz con 12.05% de humedad. A) Longitud. B) Diámetro. | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 25. Parámetros físicos de pellets cascarilla de arroz con 10.91% de humedad. A) Longitud. B) Diámetro. | 75 |
| Figura 26. Relación de los parámetros químicos y energéticos de los pellets de cascarilla de arroz con humedades de (P1, 12.91%; P2, 10.91%)..... | 76 |
| Figura 27. Relación de los parámetros físicos de los pellets de cascarilla de arroz con humedades de P1 y P2..... | 77 |
| Figura 28. Pellets de mezclas. A) 50% cascarilla de arroz y 50% paja trigo, B) 75% cascarilla de arroz y 25% paja de trigo..... | 80 |
| Figura 29. Parámetros físicos de pellets de mezclas 75% cascarilla de arroz y 25% paja de trigo. A) Longitud. B) Diámetro..... | 80 |
| Figura 30. Parámetros físicos de pellets de mezclas 50% cascarilla de arroz y 50% paja de trigo. A) Longitud. B) Diámetro..... | 81 |
| Figura 31. Relación de los parámetros químicos y energéticos de los pellets de cascarilla de arroz y paja de trigo con diferentes porcentajes de mezclas y humedades M3; 15.79% y M4; 13.99%..... | 82 |
| Figura 32. Relación de los parámetros físicos de los pellets de cascarilla de arroz y paja de trigo con diferentes porcentajes de mezclas y humedades (M3 y M4). | 83 |
| Figura 33. Análisis estadístico respecto al porcentaje de cenizas, entre la muestra 1 y la muestra 2. Se realizó la Prueba de Tukey-Kramer ($p < 0.05$) entre las muestras evaluadas (M1 y M2) | 92 |
| Figura 34. Análisis estadístico respecto al porcentaje de cenizas, entre la muestra 3 y la muestra 4. Se realizó la Prueba de Tukey-Kramer ($p < 0.05$) entre las muestras evaluadas (M3 y M4) | 93 |
| Figura 35. Análisis estadístico respecto al porcentaje de cenizas, entre la muestra 1 y la muestra 3. Se realizó la Prueba de Tukey-Kramer ($p < 0.05$) entre las muestras evaluadas (M1 y M3) | 94 |

RESUMEN

El agotamiento progresivo de los combustibles fósiles junto con el problema ambiental derivado de su excesivo uso impulsa la investigación sistemática en alternativas renovables de producción de energía. Dentro de las energías renovables se encuentran algunas muy importantes como son: la solar, eólica, geotérmica, mareomotriz y aquella proveniente de la biomasa. Este trabajo se centró en la biomasa como recurso energético, la cual se puede clasificar en biomasa natural, residual y cultivos energéticos; dentro de esta clasificación, los desechos agroindustriales son una de las biomásas más abundantes. Uno de estos desechos es la cascarilla de arroz y la paja de trigo, cuya densificación es la principal alternativa para la generación de biocombustibles sólidos; este uso no ha sido reportado previamente en la literatura. Por lo tanto, en este trabajo se determinó el efecto del contenido de humedad y la porción de paja de trigo en el poder calorífico de biocombustibles sólidos, pellets utilizando un diseño experimental de un factor con dos niveles, con tres réplicas. Para ello, se realizó la caracterización fisicoquímica y energética de la cascarilla de arroz y paja de trigo; posteriormente se realizó la producción de pellets, y se determinaron sus propiedades fisicoquímicas, energéticas y mecánicas. Finalmente, se compararon las propiedades de los pellets producidos con aquellos establecidos en la norma francesa. Los resultados muestran que los pellets elaborados con mezclas de cascarilla de arroz y paja de trigo presentan el mayor poder calorífico, cumpliendo con las propiedades establecidas en la norma francesa. De esta manera, la presente investigación contribuyó a añadir valor a estos residuos agroindustriales, los cuales abundan en México, con el fin de utilizarlos como un biocombustible sólido.

Palabras clave: Biocombustibles sólidos, pellets, cascarilla de arroz, extrusión mecánica, residuos agroindustriales.

ABSTRACT

The progressive depletion of fossil fuels along with the environmental problem derived from their excessive use drives systematic research into renewable alternative energy production. Within the renewable energies are some very important such as: solar, wind, geothermal, tidal and biomass. This work focused on biomass as an energy resource, which can be classified as natural biomass, residual biomass and energy crops; within this classification, agroindustrial wastes are one of the most abundant biomass. One of these wastes is the husk of rice and wheat straw, whose densification is the main alternative for the generation of solid biofuels; this use has not been previously reported in the literature. Therefore, in this study the effect of moisture content and the portion of wheat straw in the calorific value of solid biofuels determined, pellets using an experimental design of a factor two levels, with three replicates. For this, the physicochemical and energetic characterization of rice husks and wheat straw was carried out; pellets were produced and their physicochemical, energetic and mechanical properties were determined. Finally, the properties of pellets produced with those established in the French standard were compared. The results show that the pellets made with mixtures of rice husks and wheat straw have the highest calorific value, complying with the properties established in the French standard. In this way, the present research contributed to add value to these agroindustrial residues, which abound in Mexico, in order to use them as a solid biofuel.

Key words: Solid biofuels, pellets, rice husks, mechanical extrusion, agroindustrial waste.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Preámbulo de la investigación

La crisis del petróleo de la década de 1970 impulsó el interés en los biocombustibles, como alternativa a los combustibles fósiles, para su uso en el transporte en muchos países. Brasil aceleró su programa de producción de etanol nacional (Pro-alcohol) después de que los precios del petróleo alcanzaron su punto máximo en 1979; los Estados Unidos pusieron en marcha un programa de producción de etanol a base de maíz casi al mismo tiempo, pero a una escala menor que en Brasil (Bautista, 2013). Otros países como China, Kenia y Zimbabwe también se sumaron a la acción por la crisis del petróleo, pero sus intentos de promover los biocombustibles no tuvieron éxito (López J. H., 2008).

Posteriormente, las caídas en los precios del petróleo eliminaron gran parte del incentivo, y se estancó el impulso para expandir la producción de biocombustibles en la mayoría de los países, con la notable excepción de Brasil. No obstante, las cuestiones relacionadas con la seguridad del suministro de energía así como la volatilidad de los precios del petróleo provocaron un resurgimiento de los biocombustibles; siendo de interés la rápida expansión de la producción, los mandatos y objetivos para garantizar el consumo, así como la inversión en el desarrollo de tecnologías avanzadas de producción. La disminución de los costos de producción de los biocombustibles permite hacerlos competitivos, especialmente cuando los precios del petróleo son altos; no obstante, en casi todos los casos se requieren subsidios para competir con la gasolina y el diésel en la actualidad (Alzate, 2009).

La dependencia del petróleo trae consigo los efectos a largo plazo del medio ambiente, la seguridad energética y el aumento del costo de vida. No obstante, es posible reemplazar a los combustibles fósiles como el petróleo y productos derivados del carbón, mediante productos elaborados a partir de biomasa. El término biomasa hace referencia a toda materia orgánica originada de forma inmediata en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. La biomasa abarca un amplio rango de

materias orgánicas que se caracterizan por su heterogeneidad. Esta heterogeneidad hace difícil disponer, en muchos casos, de una base fiable de la disponibilidad global del recurso. La biomasa ha sido desde siempre la mayor fuente de energía para el ser humano, y se ha estimado que actualmente contribuye entre un 10% y 14% al abastecimiento de la energía mundial (McKendry, 2002).

En general, la biomasa de origen agrícola y forestal es ampliamente utilizada para generar electricidad, calor, suministro de vapor y calefacción doméstica (Cerdá, 2016). En un reciente estudio de los Estados Unidos, los Departamentos de Energía y de Agricultura llegaron a la conclusión de que hay más de mil millones de toneladas de biomasa sólo en Estados Unidos, que pueden sustituir alrededor del 30% de su consumo actual de petróleo (Tumuluru, 2014).

Por otra parte, la concientización sobre el problema del cambio climático ha servido como un importante motivador de los biocombustibles, ya que éstos ayudan a mejorar los esfuerzos de mitigación de la contaminación, mediante el desplazamiento del consumo de combustibles fósiles. Dada la enorme proporción del consumo de energía en el sector transporte, los biocombustibles podrían contribuir de manera significativa a la reducción de las emisiones de CO₂. Es importante mencionar que los biocombustibles pueden brindar reducción neta de las emisiones de gases de efecto invernadero, siempre y cuando los procesos de producción sean sustentables; es decir, con una reducida huella de carbono. Por otra parte, la creciente producción de biocombustibles así como la escalada de precios de los alimentos en 2007 y 2008 crearon serias preocupaciones acerca del posible papel de los biocombustibles en la crisis alimentaria, lo cual dio lugar a disturbios en muchas partes del mundo (Govinda R. Timilsina, 2010). Por ello, las investigaciones se han enfocado tanto en la energía para el sector transporte como para la generación de energía eléctrica y térmica, en uso residencial e industrial, considerando materias primas que no compitan con la alimentación. De manera particular, para la producción de energía térmica y/o eléctrica renovable se emplean biocombustibles sólidos. Dichos biocombustibles se generan a partir de la biomasa residual de actividades forestales o agroindustriales; resultan de interés ya que dichos residuos se encuentran disponibles en grandes cantidades y su costo es bajo. Por

este motivo se enfoca la presente investigación en el aprovechamiento de residuos agroindustriales, específicamente la cascarilla de arroz y sus mezclas con paja de trigo, para la producción de biocombustibles sólidos.

1.2. Descripción del problema

En México, en el año 2014, se produjeron 75.73 millones de toneladas de materia seca proveniente de 20 cultivos de diferentes alimentos; de los cuales 60.13 millones de toneladas corresponden a residuos primarios, obtenidos al momento de la cosecha, entre los que se encuentran hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, así como cáscara de algodón. El resto, 15.60 millones de toneladas, corresponden a residuos secundarios obtenidos del procesamiento post-cosecha, entre los que están bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olores, bagazo de maguey o agave, así como pulpa de café (Saval, 2012). De manera particular, la producción de arroz en México es cercana a las 232,159 toneladas, lo cual significa que se producen cerca de 58,040 toneladas anuales de cascarilla de arroz (SAGARPA, 2014). La cascarilla de arroz es un residuo agroindustrial que abunda, dado que la demanda de arroz continúa en ascenso. Dentro del proceso de producción de arroz se encuentra el de la remoción de la cáscara; se estima que por cada tonelada de arroz que se procesa se genera un cuarto de tonelada de cascarilla de arroz (Gutierrez, 2010). Este tipo de residuo tiene diversos usos de poco valor agregado; por ejemplo, para la elaboración de camas en las granjas avícolas, pesebreras, aplicaciones en floricultura, elaboración de alimentos concentrados para animales y para la producción de compostaje principalmente. Otros usos que se pueden mencionar son:

- Abono: la cascarilla de arroz es utilizada por agricultores para, junto con otros componentes, obtener abono fermentado.
- Complemento en procesos industriales: la industria se ha caracterizado en los últimos años por la inversión que realiza hacia el desarrollo tecnológico como respuesta a las necesidades del mercado, para generar productos más competitivos,

de mayor calidad y menor costo. Entre los usos como complemento de la cascarilla de arroz se encuentran:

- ✓ Cemento: la ceniza producida por la quema de cascarilla de arroz se emplea como complemento en la fabricación de cemento.
- ✓ Caucho: la ceniza producida por la quema de cascarilla de arroz se utiliza en la producción de caucho.
- ✓ Floricultura: compactación de la cascarilla de arroz para conformar los pisos de los cultivos.
- ✓ Materiales aislantes: Debido a su baja conductividad térmica ($0.036 \text{ W/m}^*\text{K}$) es ideal para generar material aislante utilizado en casas, fincas y lugares de almacenamiento refrigerado.
- ✓ Paneles de construcción: utilización en el relleno de bloques de hormigón, ya que mediante el proceso de compactación se ha demostrado que se aportan propiedades de dureza y resistencia (Gutierrez, 2010).

Otro uso, no explorado hasta ahora, es la producción de biocombustibles sólidos mediante la densificación de la cascarilla de arroz para la obtención de pellets (Martinez, Ramirez, & Soto, 2012). En contraparte, la paja de arroz sí ha sido estudiada ampliamente. La utilización de paja de arroz como fuente de energía renovable contribuye a la mitigación de las emisiones de metano de los suelos, y las emisiones de dióxido de carbono a partir del uso de combustibles fósiles. Las tecnologías que se utilizan para la producción de energía a partir de la paja de arroz incluyen combustión, la densificación para generar pellets o briquetas, gasificación, pirólisis, digestión anaerobia y producción de bioetanol (Gutierrez, 2010). La peletización de la paja de arroz es un proceso de densificación que genera un biocombustible sólido que es fácil de manejar, transportar, almacenar y utilizar.

Por otra parte, la paja de trigo sí ha sido estudiada y entre sus usos se encuentran:

- ✓ Producción de bioetanol lignocelulósico, que supone una gran ventaja con respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero; puesto que implica una mayor

reducción neta de emisiones de CO₂ en comparación con los biocombustibles provenientes de materias amiláceas o azucaradas.

- ✓ Fabricación de paneles autoportantes para hacer particiones interiores, tabiques, techos e incluso muros exteriores
- ✓ Elaboración de maderas plásticas con base en paja de trigo y matriz polimérica (Velázquez, Moreno, Ramírez, Páez, & Palomar, 2013).

Estos residuos fueron seleccionados por las siguientes razones. La producción de trigo representa el 21% del consumo de granos básicos en México, y se prevé que su producción se incrementará dado que ha crecido 14.6% desde 2013 hasta 2017. Por otro lado, se estima que la producción de arroz en México se incrementará en 48% para el año 2018. Asimismo, los residuos de ambos cultivos poseen, como se presentó, aplicaciones de bajo valor agregado; adicionalmente, no se ha reportado su uso para la producción de biocombustibles sólidos. Por lo tanto, el presente trabajo se centra en la fabricación de pellets de cascarilla de arroz, realizando un análisis del efecto del contenido de humedad así como del uso combinado de un segundo residuo, paja de trigo, en la capacidad calorífica de los pellets. El objetivo de este estudio es analizar el efecto de la composición de la biomasa y el contenido de humedad, como parámetros de peletización, en la calidad física de los pellets obtenidos con cascarilla de arroz y con mezclas de ésta con un segundo residuo, paja de trigo; asimismo, se determinarán las condiciones necesarias para obtener pellets de máximo contenido energético.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar el efecto del contenido de humedad en el poder calorífico de pellets elaborados a partir de cascarilla de arroz y sus mezclas con paja de trigo.

1.3.2. Objetivos particulares

- ❖ Cuantificar experimentalmente la humedad y composición iniciales de la cascarilla de arroz y de la paja de trigo.
- ❖ Elaborar pellets variando la humedad inicial de la cascarilla de arroz, así como la cantidad de paja de trigo adicionada para estudiar las diferencias en el poder calorífico.
- ❖ Calcular el poder calorífico de los diferentes pellets producidos mediante un calorímetro.

1.4. Justificación

A nivel mundial la producción de desechos agroindustriales es muy abundante. Dicha abundancia representa un serio problema ambiental, razón por la cual los residuos han sido estudiados desde diferentes aristas con el objetivo de aprovecharlos como materias primas para la producción de biocombustibles. Esto posibilitará la protección del medio ambiente así como la producción de nuevas formas de energía renovable. Para el caso de México, una investigación de este tipo es muy importante, ya que la producción de residuos agroindustriales es muy alta; entonces compete a todos encontrar soluciones para el manejo de este tipo de residuos. Considerando que en México se producen cerca de 58,040 toneladas de cascarilla de arroz, resulta claro que la búsqueda de alternativas de uso permitiría generar un combustible renovable y, al mismo tiempo, resolver este problema ambiental. Adicionalmente, el uso de pellets de cascarilla de arroz como biocombustible sólido coadyuvará en la disminución de gases de efecto invernadero. En el afán de usar de manera óptima este residuo agroindustrial se propone entonces la determinación de los parámetros más adecuados de humedad y otros componentes para la fabricación de pellets a partir de cascarilla de arroz, consiguiendo el mayor potencial calorífico posible. Entonces se puede decir que la justificación principal de esta investigación es el aprovechamiento de los residuos agroindustriales, así como la búsqueda y consecución de nuevas alternativas energéticas sustentables.

2. ANTECEDENTES

En la mayoría de las ciudades del mundo se presenta una problemática importante sobre el manejo de los residuos sólidos, los cuales en los últimos años han crecido de manera exponencial; esto debido a diversos factores como crecimiento demográfico, la concentración masiva en zonas urbanas, el desarrollo ineficiente de los sectores industriales y empresariales, así como los cambios en los patrones de consumo de las personas. Al generarse los residuos sólidos intervienen una serie de etapas que se disponen para su manejo, dentro de las cuales se mencionan el almacenamiento, la recolección, el transporte, procesamiento, tratamiento y la disposición final (Sáez & Urdaneta, 2014).

Según su fuente los residuos sólidos se clasifican en domésticos, industriales, comerciales, institucionales, servicios municipales, forestales y agroindustriales; estos últimos siendo el objeto de la presente investigación. Los residuos agroindustriales son materiales en estado sólido o líquido, que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización; dichos residuos ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otros productos con valor económico, de interés comercial y/o social. De esta manera, se transforma un problema en una oportunidad, pudiéndose generar nuevas formas de producción de energía. Existen varios tipos de desechos agroindustriales dependiendo de su procedencia, desde aquellos producidos en granjas de cría, residuos orgánicos de frutales, de granos, entre otros (Saval, 2012).

Los residuos agroindustriales pueden ser aprovechados de diferentes formas; por ejemplo en la producción de biocombustibles líquidos, gaseosos y sólidos (bioetanol, metano y pellets), la producción de alimentos funcionales para animales y compostaje (Laiz-Saldaña, Tovar-Miranda, Durán-de-Bazúa, & Solís-Fuentes, 2009). No obstante, una de las desventajas que tiene su uso como combustible es su baja densidad física y energética. Por eso, el proceso de densificación tiene una gran importancia en el aprovechamiento de estos residuos para ser usados como materia prima para la producción de biocombustibles.

A nivel mundial la producción de residuos agroindustriales es de gran envergadura, siendo de 3,045 millones de toneladas por año (Hernández, Forero y Alfonso, 2014), y proveen una ilimitada fuente de materia prima, y de costo reducido para la producción de biocombustibles (Acosta, 2015; Flórez, 2009). Por ejemplo, alrededor de 1.5 Giga toneladas de paja derivada de cultivos de cereales se producen anualmente en todo el mundo (Lu, Tabil, Wang, Wang, & Emami, 2013). De este residuo, el mayor productor es el continente asiático con 1,367 millones de Toneladas/año, lo que representa el 44.9% de la producción total, seguido por Europa, Norteamérica, Latinoamérica y África; siendo los dos últimos los menores generadores de estos residuos con un 9.1% y un 5.3%, respectivamente (Giusiano, 2016).

Así, la producción primaria anual terrestre añade aproximadamente 120×10^{15} g de biomasa vegetal seca, de los cuales se almacenan 2.2×10^{21} J de energía en materiales vegetales (Mingxin Guo, 2014). La demanda mundial de energía fue de 5.5×10^{20} J en 2010; sin embargo, se prevé que aumente a 6.6×10^{20} en 2020 y 8.6×10^{20} J en el año 2040 (Guo, Song, & Buhain, 2014). En gran parte, la bioenergía extraída de las plantas terrestres es 3-4 veces mayor que la demanda de energía antropogénica. El potencial de suministro de bioenergía de la superficie terrestre total del mundo, con exclusión de las tierras de cultivo, infraestructura, montes y los bosques más densos, se estima en 190×10^{18} J yr⁻¹, lo que representa el 35% de la actual demanda mundial de energía (Guo, Song, & Buhain, 2014). Lo anterior evidencia el gran potencial que el uso de la biomasa representa para la generación de biocombustibles sólidos, susceptibles de ser usados en la generación de energía eléctrica y térmica. Teniendo en cuenta el incremento de la actividad en el desarrollo económico y la problemática ambiental nacieron nuevas tecnologías de producción de bioenergía para sustituir a los combustibles fósiles.

Por otra parte, cuando se habla de biomasa es necesario revisar las políticas y estrategias actuales en relación con la utilización de combustible de biomasa densificada (DBF) en otros países; en China se centran principalmente en los modos de fabricación de mediana o gran escala, que no pueden proporcionar soluciones viables para resolver los problemas de energía de los hogares en las zonas rurales de China (Shan, Li, Jiang, & Yang, 2016). Para

simplificar los procesos comerciales relacionados con la recolección de materia prima para la producción de DBF y su utilización se propone un enfoque novedoso a escala rural. Diversos proyectos piloto han demostrado la viabilidad y flexibilidad de este nuevo enfoque en el desarrollo sostenible en zonas rurales de China. La utilización efectiva de DBF en la China rural dará lugar a ganancias globales, regionales y locales de energía, protección del medio ambiente, el desarrollo sostenible y los beneficios sociales relacionados. Ese modelo podría beneficiar a otros países en desarrollo para una mejor utilización de la biomasa como fuente de energía doméstica viable. Por lo tanto, esa propuesta ofrece la posibilidad de ganancias recíprocas, y como tal merece la atención de los políticos y las diversas partes interesadas; ya que los biocombustibles son el futuro del mundo (Shan, Li, Jiang, & Yang, 2016).

2.1. Fundamentación teórica

2.1.1. La biomasa

La biomasa abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza. La biomasa se puede definir como aquellas sustancias orgánicas que tienen su origen en los compuestos de carbono formados en la fotosíntesis (Nogués & Galindo, 2010). Estos productos pueden haber sufrido diferentes tipos de transformación, naturales o artificiales, que pueden tener variados niveles de complejidad (Nogués & Galindo, 2010). Para esto es necesario revisar los análisis realizados en otros entornos a nivel mundial así como los resultados obtenidos (Karkania, Fanara, & Zabaniotou, 2012). En el contexto energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable, basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato, o bien de los productos derivados de ésta. La biomasa puede clasificarse de acuerdo a lo expuesto en la Tabla 1, donde se muestran los diferentes tipos de biomasa; que en el sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos, como plantas, o sus desechos metabólicos (el estiércol); el concepto de biomasa comprende productos tanto de origen vegetal como de origen animal. En la actualidad se ha

aceptado este término para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se origina a partir de la materia prima orgánica formada por vía biológica (Callejas & Quesada, 2009).

Tabla 1. Tipos de biomasa (Callejas & Quesada, 2009)

| Tipos de Biomasa | Características |
|-------------------------|--|
| Biomasa Natural | <p>Se produce en ecosistemas naturales. La explotación intensiva de este recurso no es compatible con la protección del medio ambiente, aunque sea una de las principales fuentes energéticas en los países subdesarrollados. La biomasa natural se produce sin la intervención del hombre para potenciarla o para modificarla. Se trata fundamentalmente de residuos forestales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Derivados de limpieza de bosques y de restos de plantaciones. • Leñas y ramas. • Coníferas. • Frondosas |
| Biomasa Residual | <p>Generada en las actividades humanas que utilizan materia orgánica. Su eliminación en muchos casos supone un problema. Este tipo de biomasa tiene asociadas unas ventajas en su utilización:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduce la contaminación y riesgos de incendios. • Reduce el espacio en vertederos. • Los costos de producción y transporte pueden ser bajos. • Evita emisiones de CO₂. • Genera puestos de trabajo. • Contribuye al desarrollo rural. |
| Excedentes | <p>Los excedentes agrícolas que no sean empleados en la alimentación humana pueden ser utilizados con fines energéticos. El uso de productos agrícolas en la cadena de alimentación</p> |

| | |
|-----------------------------|---|
| Agrícolas | <p>humana ha provocado una mala fama injustificada del uso de la biomasa con fines energéticos; ya que se le responsabiliza del aumento del costo de los productos agrícolas base de la alimentación en muchos países del tercer mundo y en vías de desarrollo.</p> <p>Los excedentes agrícolas pueden ser utilizados tanto como combustible en plantas de generación eléctrica como transformados en biocombustibles.</p> |
| Cultivos Energéticos | <p>Los cultivos energéticos son específicos y están dedicados exclusivamente a la producción de energía. A diferencia de los agrícolas tradicionales tienen como características principales su gran productividad de biomasa, y su elevada rusticidad; expresada en características tales como resistencia a la sequía, a las enfermedades, vigor, precocidad de crecimiento, capacidad de rebrote y adaptación a terrenos marginales.</p> <p>Entre los cultivos energéticos se pueden incluir cultivos tradicionales (cereales, caña de azúcar, semillas oleaginosas) y otros no convencionales (cynara, pataca, sorgo dulce) que están siendo objeto de numerosos estudios para determinar sus necesidades de cultivo.</p> |
| Biomasa Térmica | <p>Este tipo de biomasa es utilizada para suministrar calefacción, producción de agua caliente sanitaria y/o productos industriales.</p> <p>Los tipos de biomasa más frecuentes en los usos térmicos proceden de las industrias agrícolas (huesos de aceitunas y cáscaras de frutos secos), de las industrias forestales (astillas, virutas) y de actividades silvícolas y de cultivos leñosos (podas, leña). Estos materiales se pueden transformar en biocombustibles sólidos (pellets y briquetas) así como astillas molturadas y compactadas que facilitan su transporte, almacenamiento y manipulación.</p> |

2.1.1.1. Procesos de conversión de la biomasa

La biomasa es la única fuente de energía renovable que puede ser transformada en combustibles gaseosos, sólidos o líquidos, mediante procesos de conversión biológicos, fisicoquímicos y térmicos. Cuando se aplican los procesos de conversión se adquieren productos con densidades altas y un valor energético mayor, transformando la biomasa en recursos energéticos secundarios aprovechables en forma de biocombustibles; a partir de los cuales se puede producir energía en forma de calor, electricidad o fuerza motriz. A su vez, los biocombustibles ayudan a controlar problemas de contaminación al ambiente así como problemas de almacenamiento; aportando un beneficio al reducir los costos de energías fósiles, electricidad y disposición de residuos (Steiner, 2006) (McKendry, 2001).

Las propiedades bioquímicas y fisicoquímicas del residuo biomásico determinan la selección del tipo de aprovechamiento energético; en su defecto el aprovechamiento de la biomasa seca mediante procesos termoquímicos depende de factores como el contenido de humedad, el poder calorífico, la concentración de carbono fijo y de volátiles, el contenido de cenizas y metales alcalinos presentes. Por otra parte, para el aprovechamiento de la biomasa húmeda mediante procesos bioquímicos se tiene en cuenta el contenido de humedad y la relación entre celulosa y lignina (McKendry, 2002).

La biomasa posee un contenido energético menor, en comparación con los combustibles fósiles; esto se debe a que la biomasa tiene una relación mayor de oxígeno e hidrógeno con respecto al carbono, dado que la mayor cantidad de energía se almacena en la cadenas carbono-carbono (Hernández, Prada, Lesmes, Ruiz, & Ortega, 2010).

Por ello, para la generación de energía a partir de la biomasa (animal o vegetal) se debe tener en cuenta el contenido de humedad, dado que esta característica determina el proceso de conversión a aplicar; así, para la biomasa húmeda ($H > 60\%$) se llevan a cabo los procesos bioquímicos y fisicoquímicos, y para la biomasa seca ($H < 60\%$), se aplican los procesos termoquímicos. A continuación se describen cada uno de estos procesos.

2.1.1.1.1. Procesos bioquímicos

Los procesos de conversión bioquímicos consisten en la transformación de la materia orgánica, mediante la aplicación de diversos tipos de microorganismos que degradan las moléculas de biomasa. Estos procesos se clasifican en dos grupos: los que se producen en ausencia de aire (anaerobios) y los que se producen en presencia de aire (aerobios) (Ruíz, 2013).

- **Procesos bioquímicos anaerobios:** Son procesos de fermentación bacteriana que ocurren en ausencia de oxígeno, donde se genera una mezcla de gases; principalmente metano y dióxido de carbono, los cuales se conocen como biogás. También se genera una suspensión acuosa o lodo que contiene compuestos no degradados y minerales. Este tipo de procesos se utiliza generalmente para residuos animales o vegetales de baja relación carbono/nitrógeno; y se realiza en un reactor anaerobio, donde ocurre una digestión que se da en tres etapas consecutivas: hidrólisis, fermentación y metanogénesis. En la hidrólisis, los compuestos complejos se dividen en azúcares solubles; a su vez las bacterias fermentativas los convierten en alcoholes, ácido acético, ácidos grasos volátiles y un gas que contiene H_2 y CO_2 , el cual es metabolizado por metanógenos y convertido en CH_4 (60-70%) y CO_2 (30-40%) (Purshouse M. T., 2010). Para la fermentación de biomasa húmeda se manejan residuos pecuarios, aguas residuales urbanas o biomasa marina húmeda (López D. , 2013) (Secretaría de Energía, 2008).
- **Procesos bioquímicos aerobios:** En el proceso de conversión aerobio, la biomasa posee un alto contenido de hidratos de carbono simples (azúcares) o complejos (almidón y celulosa). A partir de la fermentación de estos compuestos se da la formación del alcohol (etanol), combustible líquido con características similares a los que se obtienen por medio de la refinación del petróleo, y metanol, a partir de la destilación destructiva de la madera (López D. , 2013). El proceso aerobio consta de las siguientes etapas: trituración, molienda, fermentación, destilación y rectificación (López D. , 2013) (Secretaría de Energía, 2008). Para la producción de etanol se utiliza biomasa rica en azúcares como la caña de azúcar y remolacha; o biomasa rica

en almidón, como el maíz, trigo, sorgo, raíces, así como tubérculos como papa y yuca. Los materiales ricos en celulosa, como árboles, pastos y desechos agrícolas, deben ser tratados con hidrólisis para luego ser utilizados en la fermentación alcohólica. El etanol puede ser utilizado en vehículos y motores, mientras que el metanol no es conveniente como combustible, debido a su alta toxicidad (Steiner, 2006).

2.1.1.1.2. Procesos fisicoquímicos

En un proceso fisicoquímico se transforman los aceites vegetales que pueden obtenerse de plantas por medio del prensado de sus semillas y su posterior extracción; por ello sólo se pueden usar especies de biomasa que contienen aceite como son las semillas de colza, girasol, frijol de soya y aceite de palma. El aceite vegetal se utiliza en los sistemas de calefacción ambiental o para la producción de biodiésel o bioturbosina. El proceso fisicoquímico es muy eficiente, debido a que minimiza los residuos agrícolas, disminuye la contaminación ambiental y ayuda al desarrollo agrícola; sin embargo, genera altos costos energéticos por lo tanto es el proceso menos utilizado (Robles-Gil, 2001). Es importante mencionar que la biomasa que se genera en el proceso de extracción del aceite también puede ser aprovechada para la generación de biocombustibles, mediante procesos bioquímicos o termoquímicos.

2.1.1.1.3. Procesos termoquímicos

En el proceso de conversión termoquímica se transforma la biomasa seca a recursos energéticos en presencia de calor, y se obtienen productos como combustibles en estado sólido, líquido, gaseoso o una mezcla de éstos. Este tratamiento de la materia orgánica ocurre a altas temperaturas en presencia de gases como N_2 , aire, H_2 , vapor de agua, He, O_2 y en ciertos casos en presencia de catalizadores, implicando reacciones químicas irreversibles en condiciones variables de oxidación (Tabarés, 2012).

Así, si el calentamiento de la biomasa se lleva a cabo con un exceso de aire (combustión) el producto final obtenido es calor; por otro lado, si la combustión de la biomasa no es completa, el proceso que se da es la gasificación, el cual se puede llevar a cabo con oxígeno, permitiendo obtener gas de síntesis, o con aire produciendo “gas pobre” el cual se puede utilizar en la línea de vapor, calor y finalmente electricidad. Por último, un proceso termoquímico puede ocurrir en el calentamiento de la biomasa en ausencia total de aire, el cual es conocido como pirólisis. A continuación se proporciona información detallada de estos tres procesos termoquímicos.

- **La combustión:** es un proceso de conversión termoquímica por medio del cual la biomasa se combina con el oxígeno para producir calor. Este proceso se lleva a cabo a altas temperaturas y con exceso de aire estequiométrico, obteniendo como productos principalmente dióxido de carbono derivado de la oxidación del carbono y vapor de agua como oxidación del hidrógeno; además de otros productos secundarios como el NO_x y SO₂ obtenidos de la oxidación del azufre y el nitrógeno, respectivamente. Éstos últimos productos suelen permanecer inalterados (excepto cuando las temperaturas son muy altas) y se mezclan con los gases originados en la combustión (humos) (Tabarés, 2012). Mediante este proceso es posible quemar la biomasa con humedad inferior al 50 %; esta humedad se elimina por evapotranspiración (Ruíz, 2013).

El proceso de combustión involucra un número de aspectos físicos y químicos de alta complejidad. La naturaleza de los procesos de combustión depende tanto de las propiedades del combustible como de la aplicación de la combustión. Al ser una biomasa húmeda primero comprende la etapa de secado, luego debe pirolizarse para después pasar por una combustión parcial, conocida como gasificación, antes de alcanzar la combustión completa. En general la conversión se puede dar de modo continuo o discontinuo, y la adición de aire se da de manera natural o forzada. La combustión discontinua es usada en unidades a pequeña escala, utilizando corriente natural. Las unidades medianas y a gran escala son siempre continuas y utilizan corrientes de aire forzado (Kamila & Suchý, 2010). En general, los modelos de combustión de biomasa pueden ser clasificados como

macroscópicos y microscópicos. En el proceso macroscópico, las propiedades de la biomasa se obtienen por análisis elemental, tales como poder calorífico, contenido de humedad, densidad aparente, el tamaño de la partícula y temperatura de fusión de la ceniza. Mientras las propiedades en el análisis microscópico incluyen cinética térmica y datos de minerales (Ragland & Aerts, 2003). Para la obtención de un biocombustible por medio de combustión es conveniente agrupar las propiedades de la biomasa en físicas, químicas, térmicas y las propiedades minerales. Los valores de las propiedades físicas tales como densidad, porosidad y área superficial interna pueden variar en gran medida en relación con las especies de biomasa; mientras que la densidad aparente, tamaño de partícula, forma y distribución están relacionados con los métodos de preparación del combustible (Saidur et al. 2011)

La biomasa ofrece ventajas importantes como materia prima para la combustión, debido a la alta volatilidad del combustible y la alta reactividad tanto del combustible como del residuo de carbón que se origina después que este libera las sustancias volátiles (char) resultante. Las técnicas de gravimetría isotérmica y no isotérmicas se utilizan para investigar la reactividad de los materiales carbonosos (Demirbas 2004; Saidur et al. 2011). En los últimos años se han realizados diversos estudios con respecto a las propiedades de la biomasa y la optimización de los procesos de conversión; para que ésta se pueda convertir en una alternativa económicamente rentable para la generación de energía y amigable con el ambiente.

- **Pirólisis:** En este proceso termoquímico de transformación del recurso biomásico se descompone térmicamente la materia orgánica por acción del calor y en ausencia de oxígeno; dicha biomasa es transformada en tres productos: gases no combustibles, aceites y char, también conocido como biochar, biocarbón o residuo carbonoso (Bahng et al.2009). La pirólisis de la biomasa se lleva a cabo teniendo en cuenta condiciones específicas de temperatura, presión, estructura y composición de la materia prima, tamaño de la partícula, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia y velocidad de enfriamiento. Además se desarrolla bajo un barrido continuo de gas de arrastre, el cual puede ser N₂, He o argón; y tiene como función

proporcionar una atmósfera inerte para que la biomasa se pueda descomponer y los volátiles producidos se puedan retirar (Bridgwater, 1999; Giraldo, 2012). La formación de volátiles se da por la descomposición de la biomasa cuando se le suministra calor en una atmósfera inerte; de estos volátiles, los que se pueden condensar se recuperan como productos líquidos, y los que no se pueden condensar se recuperan como productos gaseosos. Finalmente, cuando los volátiles abandonan la matriz de la biomasa se forma un sólido carbonoso (Giraldo, 2012). Según Mohan et al. (2006), los cambios que se producen durante la pirólisis son los siguientes:

- ✓ Transferencia de calor, desde una fuente de energía para aumentar la temperatura en el interior del combustible.
 - ✓ Inicio de reacciones primarias de pirólisis. Allí se liberan volátiles y se forman sólidos (char).
 - ✓ Flujo de calor entre los volátiles calientes y las partículas de la biomasa sin pirolizar.
 - ✓ Condensación de algunos compuestos volátiles en las partes más frías del combustible, seguida de reacciones secundarias donde se pueden producir sólidos (alquitrán).
 - ✓ Desarrollo simultáneo y competición de reacciones de pirólisis secundarias (autocatalíticas) y reacciones de pirólisis primarias (pirolíticas).
 - ✓ Descomposición térmica y reformado, reacciones de desplazamiento de vapor de agua, recombinación de radicales, y deshidratación del líquido en función del tiempo de residencia del proceso.
-
- **Gasificación:** La gasificación es un proceso de conversión termoquímica por el cual un material sólido (biomasa) o líquido (combustibles fósiles o no fósiles) es convertido en un gas combustible, conocido como gas de síntesis o Syngas; el cual está compuesto principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono, cuyas concentraciones dependen de la materia prima y las condiciones de operación durante el proceso. Este gas posee además ventajas de combustión respecto al insumo original, tales como aumentar el poder calorífico del combustible

eliminando compuestos no combustibles como el nitrógeno o el agua; elimina sulfuros y nitrógeno evitando que durante la quema del combustible sean emitidos a la atmósfera en forma de contaminantes, y reduce la tasa carbono-hidrógeno en el combustible (Ruíz, 2013). De acuerdo al gas final que se desea obtener se utiliza un medio de reacción donde ocurre la gasificación; generalmente este ambiente es bajo en oxígeno, y puede ser oxígeno puro o simplemente aire atmosférico. El material sólido también puede ser gasificado en presencia de cantidades relativas de vapor de agua súper calentado siendo incorporadas al agente de gasificación (oxígeno o aire); con el objetivo principal de optimizar la mezcla del Syngas, cuya combustión es más eficiente que aquella del combustible original (Míguez Tabarés, 2012). Uno de los factores que determinan la eficiencia de la mezcla gaseosa resultante (altos contenidos de hidrógeno y monóxido de carbono) es la temperatura, para lo cual se debe aplicar un valor mínimo de 700 a 800 °C; y con el fin de evitar problemas técnicos que se pueden presentar por la fusión y la aglomeración de cenizas se impone una temperatura máxima que oscila entre 800 y 1500 °C (Melissari, Mayo 2012). La gasificación es considerada como una técnica limpia para la disposición final de residuos; además de ser una tecnología importante para el desarrollo en el campo de energía renovable. La obtención de Syngas a partir de biomásas, tales como el bagazo de caña, cáscara de arroz, residuos del café, carbón mineral y cáscara de madera, permiten la producción de metanol e hidrógeno, siendo de utilidad para ser transportados (Ruíz, 2013). El gas obtenido tiene como aplicaciones prácticas la combustión de motores alternativos de combustión interna y turbinas a gas, para la generación de energía mecánica y eléctrica (accionamiento de máquinas de flujo); también para la generación directa de calor, o como materia prima en la obtención de combustibles líquidos. Cabe nombrar que en la actualidad la gasificación de combustibles es más común que la de combustibles biomásicos (Machado, 2010)

2.1.1.2. La cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz, subproducto que se obtiene del procesamiento del arroz, es un material de origen vegetal constituido principalmente por celulosa y óxido de silicio; estos dos elementos son muy importantes en la producción de combustibles, ya que posibilitan el incremento en el rendimiento del producto final. La utilización de la cascarilla de arroz en la producción de biocombustibles es de vital importancia en la conservación de los recursos naturales, y representa un avance significativo en el desarrollo de nuevas tecnologías limpias y económicas; cabe mencionar que el arroz es uno de los elementos más importantes de las canastas familiares alrededor del mundo.

Las composiciones fisicoquímicas de la cascarilla de arroz, como el contenido de humedad, la composición química y el poder calorífico de la cascarilla son aspectos que hay que conocer. Dichas variables revisten especial importancia para la construcción y el funcionamiento de hornos y hogares mecánicos, que son los más adecuados para la quema e incineración de este subproducto agrícola; de lo cual se puede decir que las propiedades fisicoquímicas de la cascarilla varían según la variedad y zona de cultivo (Valverde, Serria, & Monteagudo, 2007).

2.1.1.2.1. Composición fisicoquímica de la cascarilla de arroz

La Tabla 2 presenta algunos parámetros que han sido reportados para la caracterización y evaluación de cuatro variedades diferentes de cascarilla de arroz que se cultiva en Canadá; se presentan estos datos dado que no existen datos disponibles para las variedades mexicanas de arroz. El alto contenido de sílice 20% hace que su uso alimenticio en harinas para animales sea limitado. Uno de los elementos que se atribuye a la combustión de cascarilla de arroz es la celulosa $(C_6H_{10}O_5)_n$, siendo el componente principal de las fibras de este subproducto agrícola.

Tabla 2. Características químicas de las cuatro variedades de cascarilla de arroz en Canadá (Valverde, Serria, & Monteagudo, 2007).

| Canadá | | | | |
|------------|----|----|----|----|
| Parámetros | V1 | V2 | V3 | V4 |

| | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| Celulosa | 29.20 | 33.47 | 25.89 | 33.50 |
| Hemicelulosa | 20.10 | 21.03 | 18.10 | 21.35 |
| Lignina | 20.00 | 18.80 | 24.60 | 18.20 |

Los rangos obtenidos para el análisis químico de las diferentes variedades (V1, V2, V3, V4) de cascarilla de arroz para Canadá corresponden a los siguientes: celulosa 25.89 – 35.5 %; hemicelulosa 18.1 – 21.35 %, y lignina 18.20 – 24.6 %. La lignina cuando es sometida a altas temperaturas desarrolla una propiedad aglomerante en la cascarilla de arroz, transformándola en una pasta sólida.

Se debe agregar que las características físicas de la biomasa influyen en el tratamiento previo que se le debe aplicar (BUN-CA, 2002). A continuación se definen algunas de dichas características físicas de relevancia.

- **Densidad aparente:** Esta característica se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que se presenta bajo condiciones dadas. Cuando los combustibles tienen una alta densidad aparente se favorece la relación de energía por unidad de volumen; puesto que se requieren equipos de conversión más pequeños. Por otro lado, cuando los materiales tienen baja densidad aparente se necesita un mayor volumen de almacenamiento y transporte, lo que implica problemas para fluir por gravedad complicando el proceso de combustión, generando un aumento en los costos (BUN-CA, 2002).
- **Humedad:** El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. La humedad en la biomasa puede verse influenciada por los efectos de la climatología o no; lo que permite considerar dos formas de humedad: humedad intrínseca y humedad extrínseca. Esta característica interviene en la elección del proceso de conversión de la biomasa; ya que un material con un alto contenido de humedad debe tratarse previamente para ser procesado con el fin de obtener energía, lo que implica un aumento en los costos de operación. Así, para la mayoría de los procesos de conversión energética es necesario que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%, y

específicamente para los procesos termoquímicos se recomienda una humedad inferior al 50% (BUN-CA, 2002) (López D. , 2013).

- **Distribución granulométrica:** Hace referencia al formato como se presenta la biomasa; es decir, en fardos, ramas, polvos, entre otros (Nogués & Galindo, 2010). En dicha distribución granulométrica se incluyen los siguientes análisis.
 - ✓ **Análisis elemental:** este análisis permite establecer el porcentaje en peso de los elementos con mayor presencia en la estructura molecular de la materia orgánica: carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O) y azufre (S). Se utiliza para combustibles sólidos y líquidos. A partir de dichos constituyentes es posible establecer las reacciones de oxidación; determinando por ejemplo, el aire preciso para el proceso de combustión (aire estequiométrico) (Nogués & Galindo, 2010).
 - ✓ **Análisis inmediato:** el análisis inmediato proporciona los contenidos de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo de la biomasa, expresados como porcentajes en peso. Este análisis sirve para identificar la fracción de la biomasa en la que se encuentra almacenada su energía química (compuestos volátiles y carbono fijo), y la fracción inerte (humedad y cenizas) (Nogués & Galindo, 2010).
- **Proporción de carbón fijo y compuestos volátiles:** esta característica proporciona una medida de cómo una biomasa determinada puede ser inflamada, y consecuentemente, gasificada u oxidada. En el contenido de compuestos volátiles se determina la porción de gas liberada mediante calentamiento (950°C durante 7 minutos); y en el carbón fijo se determina la masa que queda después de la liberación de los compuestos volátiles, excluyendo la ceniza y la humedad (López D. , 2013). En comparación con el carbón, la biomasa sólida tiene un alto contenido de material volátil (entre 60-80 %), que constituye más de dos terceras partes del poder como combustible (Nogués & Galindo, 2010).
- **Contenido de cenizas:** son los residuos inorgánicos que quedan tras la combustión del carbono fijo; se produce como residuo sólido en la ruptura de los enlaces de la biomasa por procesos termoquímicos o bioquímicos. Esta característica puede afectar los resultados del proceso de conversión energética y los costos del mismo;

dado que en los procesos termoquímicos, la magnitud del contenido en cenizas influye en la cantidad de energía disponible en el combustible (López D. , 2013).

- **Contenido en metales alcalinos:** Está característica de la biomasa es importante porque la presencia de metales puede catalizar o inhibir los procesos de conversión de biomasa en energía; así los principales metales alcalinos que se encuentran en este biomasa son sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), fósforo (P) y calcio (Ca) (López D., 2013).
- **Poder calorífico (Energía/Masa) (MJ/kg):** Esta característica determina la energía disponible en la biomasa, y está relacionada directamente con el contenido de humedad; esto se debe a que el contenido de humedad reduce la eficiencia en la combustión, debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material (Cerquera & Galindo, 2006). El poder calorífico se expresa como el contenido energético liberado por un material cuando éste es quemado en aire; según (López D., 2013) el poder calorífico se puede expresar de dos formas.
- **PCS (Poder calorífico superior):** Es la energía total liberada cuando el subproducto es quemado, incluye el calor latente contenido en el vapor de agua; por lo cual representa la cantidad máxima de energía que se puede recuperar a partir de una fuente de biomasa determinada.
- **PCI (Poder calorífico inferior):** Es el contenido energético sin contar el calor latente contenido en el vapor de agua. Luego el PCI es el valor que se considera para determinar la potencialidad de la biomasa como combustible

2.1.1.2.2. Poder calorífico de la cascarilla de arroz y su composición elemental.

En la Tabla 3 se presenta el poder calorífico inferior y la composición elemental de la cascarilla de arroz de diferentes Variedades (V1, V2, V3, V4) que se cultivan en diferentes países (Canadá, USA y China).

Tabla 3. Poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz y composición elemental a nivel mundial (Cerquera & Galindo, 2006)

| Canadá | Carbono | Hidrógeno | Oxígeno | Nitrógeno | Azufre | Cenizas | Poder calorífico (kJ/kg) |
|-------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|---------------|----------------|---------------------------------|
| V1 | 37.6 | 5.42 | 36.56 | 0.38 | 0.03 | 20 | 14.22 |
| V2 | 24.1 | 4.98 | 33.66 | 0.4 | 0.02 | 18.8 | 13.24 |
| V3 | 38.7 | 4.7 | 31.37 | 0.5 | 0.01 | 24.6 | 13.4 |
| V4 | 42.6 | 5.1 | 33.44 | 0.51 | 0.02 | 18.2 | 14.12 |
| California | | | | | | | |
| V1 | 38.83 | 4.75 | 35.47 | 0.52 | 0.05 | 20.26 | 0 |
| V2 | 38.24 | 5.2 | 36.26 | 0.87 | 0.18 | 18.67 | 0 |
| China | | | | | | | |
| V1 | 37.6 | 5.78 | 37.62 | 1.88 | 0.09 | 16.93 | 13.4 |

En la Tabla 4 se presenta el poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz procedente de Ibagué, Tolima Colombia como función de la humedad. De la Tabla 4 se observa que a menor porcentaje de humedad mayor poder calorífico.

Tabla 4. Poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz en función del contenido de humedad (Cerquera & Galindo, 2006)

| CONTENIDO DE HUMEDAD | PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) kJ/kg |
|-----------------------------|--|
| 0 | 19.880 |
| 10 | 17.644 |
| 20 | 15.412 |
| 30 | 13.180 |
| 40 | 10.947 |
| 50 | 8.715 |
| 60 | 6.413 |

Por otra parte, el análisis de la composición elemental de la cascarilla de arroz proveniente de las arroceras de Ibagué Tolima, Colombia, presentado en la Tabla 5, está dentro de los rangos encontrados en otros países (Tabla 3); exceptuando los porcentajes de azufre y nitrógeno. Cabe mencionar que el análisis se realizó en base seca con diferentes porcentajes de humedad (Valverde, Serria, & Monteagudo, 2007).

Tabla 5. Composición elemental de la cascarilla de arroz a diferentes porcentajes de humedad (Valverde, Serria, & Monteagudo, 2007)

| Cascarilla de Arroz | | | | | | |
|----------------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|---------------|----------------|
| Humedad | Carbono | Hidrógeno | Oxígeno | Nitrógeno | Azufre | Cenizas |
| 8.6 | 42.5 | 6.0 | 36.2 | 0.21 | 0.49 | 14.6 |
| 8.9 | 39.1 | 5.2 | 37.2 | 0.27 | 0.43 | 17.8 |
| 9.4 | 33.4 | 4.3 | 38.5 | 0.38 | 0.32 | 23.1 |

El contenido de humedad de la cascarilla de arroz cuando sale de la máquina descascaradora tiene una variación entre el 5 y el 30% generalmente, luego de estar expuesta a la intemperie.

También hay que tener en cuenta la época en que se cosecha el arroz; en época no lluviosa, la humedad promedio de la cascarilla va del 8 al 15%. Esta variación es importante ya que para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía.

Cabe añadir que la cascarilla de arroz de las variedades mexicanas no ha sido estudiada desde el punto de vista de su composición ni de su proceso de densificación para la obtención de pellets. A continuación se proporciona información del segundo residuo agroindustrial que se utilizará en el presente trabajo.

2.1.1.3. La paja de trigo

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es el principal cultivo agrícola del valle de Mexicali; durante la última década se han destinado para ello una superficie total que va desde 81,000 a 105, 000 has, abarcando actualmente el 84% de la superficie cultivable (Secretaría de Fomento Agropecuario, 2010). Por cada tonelada de cereal producido en campo se generan aproximadamente 250 kg de paja, teniendo como destino final en su gran mayoría la destrucción mediante quemas controladas (Moncada et al., 2006). El uso del fuego para eliminar la paja es todavía una práctica muy común, principalmente por su bajo costo y sus efectos fitosanitarios positivos (Madariaga, 2003). Sin embargo, esta alternativa causa problemas ambientales y además graves accidentes, a causa de la escasa visibilidad generada por el humo. Esta práctica no es sustentable, y en los próximos años la presión para eliminarla se hará insostenible.

Las alternativas existentes a la quema de la paja de los rastrojos difieren en sus relaciones costo/beneficio, y se requiere en forma urgente encontrar soluciones atractivas para los productores de trigo. Las alternativas propuestas para reducir la cantidad de paja incluyen pastar el ganado en el campo o en potreros (talajeo) con alta carga animal; lo cual requiere de una gran cantidad de animales que pueden causar graves problemas de compactación del suelo, cuando éste aumenta su contenido de humedad con las lluvias. Otra alternativa es poner el forraje cortado en hileras para el posterior manejo y recolección (hilarar) de la paja en el mismo terreno, y esperar que se degrade con el paso de los años; esta alternativa, que ocupa entre 10 y 15% del terreno no es atractiva. La incorporación de toda la paja al suelo causa un aumento de la relación C/N y otros problemas, cuya solución tiene costos que no pueden ser sostenidos dada la baja rentabilidad del cultivo (Crovetto, 1999; 2002).

La paja recolectada por la cosechadora y que no es quemada puede destinarse a usos ganaderos, agrícolas o industriales. Entre los primeros está la alimentación del ganado; los usos agrícolas incluyen la producción de hongos saprófitos, compostaje y suelo orgánico, cobertura de suelos erosionados, cama invernal del ganado e incorporación a ensilajes con mucha agua (Crovetto, 2002). Los usos industriales incluyen su utilización como

combustible sólido, con un aporte de 14 a 15 MJ kg⁻¹, aproximadamente, lo cual para una recuperación de 3 t ha⁻¹ equivale a unos 1.125 L de combustible diésel por hectárea. Este uso está muy difundido en el norte de Europa para la calefacción de edificios de uso colectivo, como escuelas, hospitales, condominios; en Chile podría convertirse, además, en un combustible barato para secar productos agrícolas. Otros usos incluyen la fabricación de bioetanol, celulosa, papel, paneles aislantes y relleno en embalajes (Butterworth, 1985)

Ahora bien, la composición de la paja depende de la proporción de hojas/tallos, el diámetro del tallo y la altura de la planta; de modo que se presentan variaciones ligadas a la especie, el ecotipo o la climatología. La mayor parte de los componentes de las pajas de cereales (incluyendo proteína y minerales) están asociados a la pared celular, distribuida en un 38% de celulosa, un 25% de hemicelulosa, un 8% de lignina y un 0.2% de cutina (Suárez & Río, 2010). La paja tiene un bajo contenido en proteína bruta (3.4%), esto es debido a que en su mayor parte (75%) se encuentra ligada a la pared celular. El resto está constituido por nitrógeno no proteico fácilmente soluble. Por otra parte, presenta marcadas deficiencias en la mayor parte de los macrominerales (excepto potasio, cloro y hierro) y en vitaminas.

En el análisis de la composición elemental y composición química de la paja de trigo provenientes de los cultivos de invierno de Mexicali y Baja California, en México, presentados en las Tablas 6 y 7 la paja de trigo fue secada al ambiente por un período de 2 meses; posteriormente fue lavada para remover tierra y suciedad, y secada al ambiente por 2 semanas para ser molida en un molino de cuchillas; el análisis se realizó en base seca.

Tabla 6. Composición elemental de la paja de trigo con un porcentaje de humedad constante (Lydia Toscano Palomar, 2015)

| Paja de trigo | | | | | | | |
|----------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|---------------|----------------|---------------------------------|
| Humedad | Carbono | Hidrógeno | Oxígeno | Nitrógeno | Azufre | Cenizas | Poder calorífico (kJ/kg) |
| 6 | 41.4 -42.7 | 5.3 | 40.2 | 0.69-0.77 | 0.49 | 10.7 | 4545 |

Tabla 7. Composición química de la paja de trigo con un porcentaje de humedad constante (Lydia Toscano Palomar, 2015)

| Paja de trigo | |
|----------------------|--------|
| Celulosa | 34.76 |
| Hemicelulosa | 14.-21 |
| Lignina | 14.85 |

2.1.2. Los pellets

Los pellets son pequeños cilindros de material comprimido, provenientes de madera, desechos agroindustriales, etc.; como se puede observar en la Figura 1. Su humedad es muy baja; además, necesitan poco espacio de almacenamiento (Esteban & Fernández, 2012).



Figura 1. Pellets de paja de arroz (IDAE, 2012).

Los pellets tienen su principal uso en la calefacción de viviendas, naves industriales, invernaderos, hoteles mediante equipos generadores de calor, con una eficiencia superior al 90% y totalmente automatizados, así como en la generación de agua caliente; cualquier instalación que funcione con combustibles tradicionales puede operar mediante pellets. Éstos proporcionan una serie de ventajas, derivado de su utilización, las cuales se muestran en la Tabla 8 y el detalle del tipo de instalaciones así como la descripción de los servicios que pueden presentar se presenta en la Tabla 9.

Tabla 8. Ventajas de la utilización de los pellets (Boada & Vargas, 2015)

| Ventajas | Descripción |
|------------------------------|--|
| Ventajas económicas | <ul style="list-style-type: none"> ❖ El precio del pellet no depende de los continuos cambios en los precios del petróleo. ❖ Es más barato que cualquier combustible fósil, y se evita la dependencia de los cambios en los precios de los combustibles. Se fortalece la economía de la región y se fomenta el empleo local en la zona, ya que el valor agregado permanece en la misma región. |
| Ventajas en seguridad | <ul style="list-style-type: none"> ❖ La combustión de pellets apenas produce humos. ❖ No existe riesgo de explosión, no hay volatilidad en su almacenaje y no produce olores. No existe riesgo para la salud en caso de riesgo o vertido. Es un combustible no tóxico e inocuo para la salud. |
| Ventajas ecológicas | <ul style="list-style-type: none"> ❖ La combustión del pellet es mucho más eficiente que la combustión de la leña, y por tanto las emisiones son mínimas. ❖ Si los residuos de podas y limpieas del monte se utilizan para fabricar pellets se revaloriza el residuo. De esta forma se fomenta la limpieza de montes, creando o mejorando hábitats salvajes y evitando incendios. ❖ La ceniza que resulta de la combustión del pellet es mínima, por la alta eficiencia de la combustión (para una instalación de 15 kW se producen unos 25 kg de ceniza anualmente) y es totalmente biodegradable, incluso es un buen abono. ❖ Reduce la emisión de gases efecto invernadero. La combustión de los pellets es más eficiente que la combustión de la leña, por eso la emisión es mínima. Los pellets no contienen azufre, por lo cual disminuye la contaminación que genera la lluvia ácida. Se fomenta el |

| | |
|--|--|
| | <p>aprovechamiento de los residuos orgánicos, agroindustriales, forestales, etc. así como la conservación del planeta. La ceniza es mínima por la gran eficiencia de la combustión y completamente biodegradable, además ésta puede ser utilizada como abono (Observatorio Tecnológico de la Energía, 2012).</p> |
|--|--|

La Tabla 8 muestra las ventajas de la utilización de los pellets como combustible, mostrando excelentes resultados en diferentes ámbitos, como el hogar y la industria; lo que significa que es un excelente producto y con mucho futuro, buscando la conservación del medio ambiente y la producción de combustibles sustentables. Otro de los beneficios que los pellets presentan en cuanto a la fabricación es que se pueden elaborar a partir de diferentes tipos de biomasa; desde la madera natural, las podas, el sarmiento proveniente de la vid, hasta el purín deshidratado de los animales. En este último caso utilizado como fertilizantes o como combustible de grandes calderas para granjas (Moya-Roque, Rodríguez-Zúñiga, Tenorio, Valdez, & Valaert, 2015).

Tabla 9. Instalaciones en función de los servicios prestados

| Instalaciones | Descripción |
|-------------------------------------|---|
| Estufas | Para calentar pequeñas estancias como comercios, restaurantes, estudios, salas de estar, etc. |
| Calderas domésticas | Se utilizan para dar servicio de calefacción y agua caliente sanitaria a pisos, caseríos, hoteles rurales, chalets, viviendas unifamiliares, etc. |
| Calderas de mediana potencia | Proporcionan servicio de calefacción y agua caliente sanitaria a bloques de viviendas, edificios de oficinas, etc. |
| Calderas industriales | Se usan para generar calor en instalaciones ganaderas, industria, etc., y agua caliente sanitaria de pequeños municipios. |

Por otro lado, la industria global de pellets de madera está idealmente posicionada para adoptar tecnologías de torrefacción de biomasa. En la investigación de Kumar et al (2016)

se revisan los posibles beneficios y desafíos de integrar la torrefacción dentro de la industria de los pellets; y se analizan las intervenciones tecnológicas necesarias para permitir esta integración. Es evidente que la integración aceleraría la comercialización de la torrefacción de biomasa, y beneficiaría a la industria de pellets de madera, a los desarrolladores de torrefacción, así como a las utilidades basadas en el carbón. Se espera que los gránulos torrefaccionados tengan distintas aplicaciones en la generación de energía; y ayuden a las empresas de carbón a reducir sus niveles de emisiones y cumplir con las regulaciones cada vez más estrictas.

La industria de la fabricación de pellets es tan importante en el mundo que se busca producir este tipo de producto a partir de cualquier material; Tsuchiya y Yoshida (2017) plantean como objetivo la utilización del carbón pardo como combustible en las plantas de co-combustión, mediante el desarrollo de una técnica para la peletización del carbón y del salvado de arroz. Mediante la mezcla de salvado de arroz con carbón se mejoró el poder calorífico del carbón, y aumentó su seguridad durante el transporte. El valor calorífico de los gránulos mixtos con 50% de carbón y 50% de salvado de arroz alcanzó 15 MJ / kg, y su durabilidad fue suficientemente alta, 98%. Esta técnica de granulación disminuye los costos de fabricación, porque no se requiere energía térmica para deshidratación y secado. Además, es beneficioso porque utiliza residuos agrícolas; si la proporción de carbón se redujo a menos del 50%, los gránulos mixtos no actuaron como un material pirofórico.

2.1.2.1. La fabricación de los pellets

La fabricación de los pellets va mucho más allá de la utilización de diferentes tipos de biomasa; existen ciertos estándares para producirlos tales como el tamaño y la potencia calorífica. Dichos estándares representan una barrera para la producción en diferentes países, ya que cada uno utiliza un estándar propio (Núñez, Fajardo, & Vargas, 2012). A continuación se presentarán una serie de parámetros comunes para la fabricación de los pellets de biomasa. Algunos de estos parámetros fueron generados por el proyecto para la instalación de una planta piloto experimental para la estandarización de pellets de rastrojo

de maíz para su uso como combustible, apoyado por el Gobierno de la República de México (CONACYT, 2015). Tales parámetros se muestran y describen en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros para la fabricación de pellets (CONACYT, 2015)

| Parámetros | Características |
|-----------------------------|---|
| Durabilidad mecánica | Se refiere a la calidad y densidad con la cual el pellet se ha formado al final del proceso de fabricación; evidentemente, cuanto más denso, más fuerte; y cuanto más densidad se consigue se tendrá una menor producción junto con un aumento de los costos para producir dicho material. |
| Finos | Se define como el porcentaje de partículas menores al tamaño especificado. La producción de finos se empieza con un mal proceso de elaboración y continúa a través del proceso de manejo hasta antes de que éste sea consumido en las diferentes aplicaciones. |
| Densidad a granel | La densidad a granel es un parámetro importante para la entrega de combustibles en base volumétrica, ya que junto con el poder calorífico determinan la densidad energética. También facilita la estimación del espacio requerido de almacenamiento y transporte, las cuales son unas de las principales motivaciones en un proceso de densificación como el peletizado. La densidad a granel no es un valor absoluto, por lo tanto para obtener resultados comparativos las condiciones para su determinación deben estar estandarizadas |
| Contenido de humedad | Cuanto menos humedad tenga un gránulo de pellet al final de su proceso de fabricación, más energía poseerá en su interior. Desafortunadamente se necesita un determinado porcentaje de agua para el proceso del peletizado; por lo que hay que peletizar con el menor grado de humedad posible para crear un pellet de calidad. El contenido de un pellet enfriado y seco |

| | |
|--------------------------------|---|
| | debe de ser inferior a un 10% con una densidad óptima, al menor costo y con la mayor eficiencia posible. |
| Producción | <p>Una producción y el proceso óptimo de pellets de biomasa dependen básicamente de la materia prima disponible. La materia prima es muy importante por las siguientes razones:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cada material tiene diferentes valores caloríficos, residuos, cenizas y cualidades corrosivas únicas. 2. Cada material ha de ser preparado de forma diferente para su transformación en pellets de calidad; teniendo en cuenta la humedad, tamaño de la partícula, tipo de biomasa y sus características fisicoquímicas. 3. La densidad de la materia prima inicial es muy importante para la cantidad de producción del combustible. 4. Cualquier materia prima viva o muerta que se pueda utilizar para fabricar pellets se denomina biomasa. |
| Proceso de peletización | <ol style="list-style-type: none"> 1. Triturado de la materia prima. 2. Transporte. 3. Secado de la materia triturada. 4. Mezclado del producto triturado. 5. Acondicionamiento de la materia prima. 6. Producción de pellets. 7. Cribado y seleccionado. 8. Enfriado. 9. Almacenado. |
| Requisitos de potencia | La producción de pellets es un proceso intensivo que requiere mucha demanda de potencia eléctrica. Las trituradoras y las peletizadoras son la maquinaria que más demanda energética tienen, y requieren una conexión eléctrica trifásica de alta tensión mínima de 500 kva. |
| Situación de la planta | La planta de producción debe localizarse lo más cerca |

| | |
|----------------------|---|
| de producción | posible de la materia prima para ahorrar en costos de transporte; sin embargo, se debe garantizar el acceso a la electricidad trifásica. También hay que tener en cuenta que deben tenerse accesos para camiones, grúas, etc. |
|----------------------|---|

La utilización de este tipo de biocombustibles sólidos tiene efectos benéficos en la atmósfera, colaborando con la reducción de gases efecto invernadero (ECOticias.com, 2013), así como en la reducción de residuos que surgen de la utilización de madera, desechos orgánicos de las ciudades, y productos agroindustriales. En el proceso de fabricación se reduce la materia prima seleccionada al tamaño del aserrín, luego se seca al 12% de contenido de humedad antes de su extrusión en molinos agrícolas adaptados para formar cilindros de 6 a 18 mm de diámetro y de 15 a 30 mm de largo, con una densidad que tiene un rango de 950 a 1,300 kg/m³. El secado de la materia prima de los pellets suele realizarse en tambores giratorios. La fabricación de los pellets se lleva a cabo mediante las siguientes etapas, Figura 2.

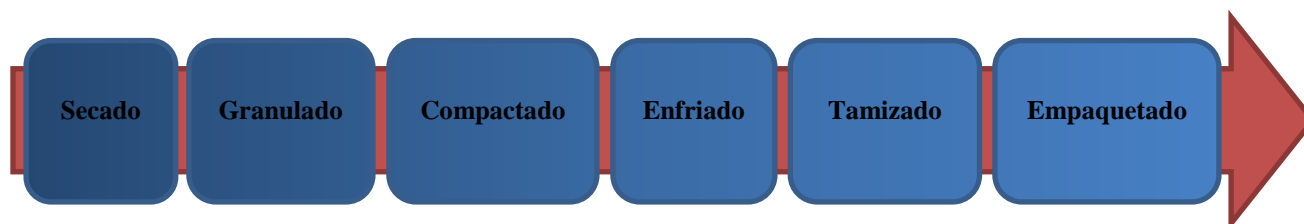


Figura 2. Etapas de la Producción de Pellets (IDAE, 2012)

- **Secado:** La materia prima se introduce en el secador por medio de una banda porosa sinfín. El aire caliente se hace circular a través de esta banda y la materia prima se va secando. Al final de la banda porosa hay un aspirador que absorbe la materia prima con una humedad inferior al 10%, y deja pasar el que contenga una humedad superior. La materia prima absorbida pasa a la siguiente fase, y el aserrín húmedo sigue en circulación en la banda porosa hasta que su humedad es inferior al 10%.
- **Granulado:** La materia prima seca pasa al molino donde se homogeniza el grano, consiguiendo así un producto con un tamaño uniforme.

- Compactado: La materia prima se introduce en una matriz perforada, y gracias a la acción de unos rodillos es obligada a pasar por unos agujeros de 6 mm de diámetro. La presión ejercida por los rodillos junto con la lignina contenida permiten obtener cilindros de producto prensado (pellets). La temperatura del producto triturado aumenta en la máquina peletizadora, la lignina se derrite y aglutina el pellet cuando se enfría. De ahí que el pellet no presenta dureza hasta una vez enfriado.
- Enfriado: Después de la compresión, la temperatura de los pellets es alta (cercana a los 90° C). El enfriado estabiliza los pellets y endurece la lignina. A partir de ahí los pellets adquieren gran consistencia.
- Tamizado: El polvo de la materia prima es separado, y devuelto al proceso de peletizado.
- Empaquetado: Si el pellet va a ser distribuido a granel, simplemente hay que almacenarlo en un lugar adecuado.

Para esta investigación se tiene en cuenta la humedad del producto principal como uno de los factores de producción del pellet. Por este motivo es indispensable tener en cuenta investigaciones como la de (Ingwald Obernberger, 2004); en dicho estudio, se analizaron los parámetros de los combustibles de diferentes biomasa; los parámetros analizados fueron las dimensiones de los combustibles, el volumen y la densidad de partículas, el agua y la ceniza contenido, el valor calorífico neto y bruto, la abrasión, el contenido de almidón (como indicación para el uso de agentes ligantes biológicos), las concentraciones de C, H, N, S, Cl, K así como de los metales pesados Cd, Pb, Zn, Cr, Cu, As y H. Con esto se puede constatar que la humedad afecta el rendimiento calorífico del pellet, por lo cual es indispensable determinar la humedad óptima para la producción de pellets.

Cuando se desean fabricar pellets es necesario revisar otras investigaciones que consideran la homogeneidad de los gránulos en el tamaño, contenido de agua y densidad de las partículas; dichas variables son de gran relevancia para lograr un funcionamiento totalmente automático, y una combustión completa en hornos automáticos de pequeña escala. Se exige menos calidad en grandes hornos industriales debido a su robustez superior

(que ayuda a prevenir el daño causado por la corrosión y la formación de depósitos), los sistemas de depuración de gases de combustión y la más sofisticada tecnología de control de la combustión aplicado para este tipo de plantas (Ishii, 2014).

Es sólo con pellets de alta calidad, como lo refieren en su estudio García Maraver et al (2011), o astillas de madera que los hornos automáticos de pequeña escala pueden operar con un alto confort para el usuario final (baja frecuencia de la eliminación de cenizas), y sin fallo operativo o de energía durante 20 años. Hoy en día, los fabricantes de calderas industriales están tratando de ajustar y mejorar la tecnología para que un mayor número de residuos de biomasa (agrícola, forestal e industrial) se pueda utilizar (Serrano, Monedero, Lapuerta, & Portero, 2010). En la Figura 3 se muestra una caldera de biomasa marca D'Alessandro Termodinámica modelo C5230 de 410kW.



Figura 3. Caldera de biomasa

A nivel mundial se han hecho mejoras al rendimiento de los pellets de diferentes materias primas con base en desechos orgánicos (biomasa), esta optimización se evidencia en el estudio de Esteban y Fernández (2012); dicho estudio expone que las principales materias primas utilizadas para la producción de pellets son residuos de madera de los aserraderos e industrias de procesamiento de madera. Sin embargo, la búsqueda de otras materias primas es necesaria para garantizar el suministro permanente. Por este motivo, los cultivos energéticos álamo se han estudiado como materia prima (Baettig, Yáñez, & Albornoz,

2010); los resultados mostraron que el álamo es un material resistente para su peletización, además aumenta la estabilidad del proceso y disminuye la energía específica demandada.

También se ha investigado sobre la peletización de biomasa en estado puro y en mezclas con otros productos o residuos; lo que logró demostrar que debido a su baja densidad y escasa fluidez, la biomasa cruda no puede ser una materia prima económicamente viable para la producción de biocombustibles. Sin embargo, la densificación mecánica se puede emplear para mejorar su viabilidad. En el estudio de Crawford et al (2015) las propiedades de flujo (compresión, cizalla y fricción de la pared) de las materias primas rastrojo de maíz, álamo híbrido, y *Panicum virgatum* *Miscanthus*, y sus mezclas se investigan y se comparan con los valores de consumo de energía de granulación medidos. Las cuatro materias primas herbáceas se comportaron de forma similar, mientras que la materia prima de álamo híbrido requirió temperaturas de pretratamiento más altas para obtener resultados óptimos. Los datos de rendimiento para tres materias primas mezcladas fueron el promedio de los datos de rendimiento para las materias primas individuales.

En cuanto a la peletización de la biomasa para la producción de biocombustibles se han realizado estudios sobre los efectos de la composición de las materias primas, y las condiciones de peletización en la calidad y propiedades de los pellets obtenidos a partir de diferentes tipos de biomasa leñosa y no leñosa (Castellano, Gómez, Fernández, Esteban, & Carrasco, 2015). También se han realizado estudios sobre la peletización de los cultivos herbáceos (Gilbert, Ryu, Sharifi, & Swithenbank, 2009); otros tipos de residuos han sido investigados como la paja de trigo combinados con residuos de madera y aglutinantes (Lu, Tabil, Wang, Wang, & Emami, Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders, 2014).

Otro producto del cual se han realizado estudios con el objetivo de peletizarlo son los residuos de rastrojo de maíz de alta humedad (Tumuluru, 2014); los residuos forestales también han sido foco de investigación, donde se ha buscado su densificación (Miranda, Arranz, Rojas, & Montero, 2009). Esta inquietud que se ha venido despertando alrededor de los biocombustibles sólidos ha llevado a los investigadores a debatir sobre la influencia

del contenido de humedad, tamaño de partícula y la temperatura de formación en la productividad y calidad de los pellets de paja de arroz (Ishii, 2014).

De manera particular, los pellets de paja de arroz son el principal tipo de combustibles sólidos de biomasa, y tienen un gran potencial como recurso bioenergético en muchos países, principalmente en China (Cerdá, 2016). No obstante, la combustión de estos pellets mostró problemas importantes debido a su alto contenido de cenizas y su bajo valor calorífico bruto, lo que reduce la posibilidad de ser utilizado en la calefacción doméstica. Pruebas posteriores certificaron que la mezcla de diferentes tipos de materiales de biomasa era muy útil para mejorar las propiedades de los gránulos. En la búsqueda de un mejoramiento sustancial de las propiedades de los pellets de paja de arroz se utilizó una mezcla de bambú y paja de arroz (Esteban & Fernández, 2012).

El objetivo de la investigación de Esteban y Fernández es optimizar las proporciones de cascarilla de arroz y bambú, para conseguir el mayor poder calorífico de los pellets. Esto también muestra que la mezcla de diferentes materiales de la biomasa es una forma efectiva para optimizar las propiedades de los combustibles sólidos de biomasa. Todos los gránulos después de la mejora se proponen como combustible sólido biomasa, y tienen el potencial de ser desarrollados en forma de gránulos comerciales a escala industrial en China (Zhijia Liu, 2013).

Todo lo anterior evidencia que son muchos los residuos de biomasa utilizados para la producción de pellets; pero hasta el momento no se ha investigado sobre la cascarilla de arroz, que es un desecho que se produce en grandes cantidades derivado de la producción de arroz, uno de los cereales de más consumo a nivel mundial (Expansión, 2014).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales y equipos

3.1.1. Materiales

- ❖ Cascarilla de arroz.
- ❖ Paja de trigo.
- ❖ Agua.
- ❖ Bolsa plástica
- ❖ Ácido sulfúrico
- ❖ Peróxido de Hidrógeno
- ❖ Crisol de porcelana
- ❖ Recipiente de aluminio.
- ❖ Pinzas metálicas.
- ❖ Guantes de látex
- ❖ Mascarilla respiratoria.

3.1.2. Equipos

- ❖ Mufla, modelo FE-361-Felisa
- ❖ Licuadora Oster Xpert Series
- ❖ Juego de tamices, ALCON
- ❖ Agitador de tamices eléctrico, ALCON
- ❖ Termo-balanza, OHAUS MB45
- ❖ Vernier 8"-200 mm, MITUTOYO 500-197-30
- ❖ Prensa manual, Parr Pellet Press 2811
- ❖ Higrómetro, BENETECH GM640
- ❖ TGA, TA Instruments Q500.
- ❖ Digesdahl, 8075 HACH
- ❖ Espectrofotómetro, DR6000 HACH
- ❖ Desecador, Numak.
- ❖ Balanza analítica electrónica, UTEST UTW-0620
- ❖ Calorímetro, 6200 Parr.
- ❖ Peletizadora, Pellet Machine.

3.2. Métodos

3.2.1. Recolección de biomasas

La cascarilla de arroz fue recolectada en la Arrocería Del Bajío, S.A. de C.V ubicada en Paseo de La Juventud 96, en el municipio de Cortázar, Guanajuato; la paja de trigo fue donada por la empresa Todo Pellet, ubicada en Agropark en Irapuato, Guanajuato.

3.2.2. Descripción del laboratorio para la caracterización de biomasa

El experimento se llevó a cabo en el laboratorio de Bioenergía, Facultad de Ingeniería Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), ubicado en el poblado de Amazcala, El Marqués, Querétaro.

3.2.3. Caracterización de las biomasas

En esta sección se muestran, analizan y discuten las pruebas de caracterización que se realizaron a ambas biomasas; se describen igualmente las pruebas de caracterización de los pellets con sus diferentes mezclas. Las pruebas de caracterización de combustibles incluyen la determinación del análisis proximal (contenido de agua, de ceniza y de materia volátil) y del análisis último (contenido de carbono, nitrógeno) así como la medición del poder calorífico.

3.2.4. Determinación de porcentajes de humedad inicial de las biomasas

Primeramente, se colocaron los crisoles de porcelana en el horno durante media hora para determinar su peso anhidro (PA) y así establecer, por diferencia entre pesos, el PA final de las muestras; para ello se usó un horno de secado con temperatura de 106 ± 2 °C.

Se tomaron seis crisoles de porcelana de tamaño pequeño, secados y tarados previamente. En cada una de ellos se adicionaron cinco gramos de cascarilla de arroz y paja de trigo, se sometieron a calentamiento en la estufa a 110 ± 2 °C, monitoreando y pesando las muestras cada 30 minutos por 5 horas hasta llegar a un peso constante. Transcurrido este tiempo, los crisoles con las muestras fueron llevados al desecador para evitar que la cascarilla de arroz y la paja ganaran nuevamente humedad. Finalmente, se pesaron en una balanza analítica electrónica con la muestra de biomasa seca, y se determinó la humedad por la diferencia de pesos.

3.2.5. Secado de la cascarilla de arroz

De la cascarilla de arroz se tomaron aproximadamente 20 gramos, y se colocaron en los crisoles de porcelana secos y tarados previamente; posteriormente, se sometieron a calentamiento en una mufla por 20 y 30 min para disminuir su humedad a una temperatura de 300 °C. Una vez transcurridos los 30 minutos, los crisoles con las muestras fueron sacados de la mufla, se dejaron enfriar en el desecador y luego se transfirieron a bolsas herméticas pequeñas (ziploc resellables).

Se tomaron dos muestras de cascarilla de arroz por triplicado para secarlas en la mufla a 300 °C; posteriormente, una vez que las muestras se encontraban a temperatura ambiente se midió la humedad en una termo balanza. A continuación en las Figuras 4, 5, 6 y 7 se muestran los equipos utilizados para la determinación del porcentaje de humedad, el secado de la cascarilla de arroz y paja de trigo.



Figura 4. Mufla



Figura 5. Desecador



Figura 6. Balanza



Figura 7. Estufa

3.2.5.1. Disminución del tamaño de partícula

La cascarilla de arroz y la paja de trigo fueron sometidos a un proceso de pulverización en la peletizadora (Machine). Dado que ambos residuos son diferentes, el proceso de pulverización difirió en el tiempo requerido. Las biomásas fueron tamizadas de manera independiente para conocer el tamaño promedio de partículas, resultado de la molienda; posteriormente, se procedió a realizar un análisis de granulometría con tamices N°20, N°40, N°60, N°140, N°160, N°200 de la serie ALCON de la siguiente manera:

- Se pesaron 3 muestras de 50 g de cada biomasa

- Se colocaron las muestras desde el tamiz que tiene mayor tamaño hasta el de menor tamaño de malla
- Se agitó por 10 minutos en un agitador eléctrico de tamices marca ALCON
- Se pesó el remanente en cada uno de los tamices.
- Se obtuvo el peso de cada uno de los remanentes, y se calculó el porcentaje de la biomasa con la ecuación 1.



Figura 8. Tamiz

$$\% \text{ Biomasa} = \frac{A}{B} * 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

A= Peso de la biomasa que se queda en cada tamiz (g)

B= Peso inicial de la biomasa (g)

3.2.5.1.1. Contenido de compuestos volátiles

Los sólidos volátiles fueron determinados evaporando una muestra en un horno a 103-105 °C en un recipiente, al cual se llevó a peso constante anteriormente. Posteriormente la muestra seca se incineró en el recipiente a 550 °C, en una mufla marca Felisa en periodos

de 30 minutos hasta lograr un peso constante. La pérdida de masa de la muestra posterior a la ignición equivale a los sólidos volátiles, esto se realizó mediante el método 8267 (Método 8267, Water analysis handbook, Hach Company, 2012). Los resultados fueron calculados en base en la ecuación 2.

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = \frac{(A-B)*100}{\text{Peso muestra seca (g)}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde:

A= Peso del residuo + peso del contenedor antes de la ignición (g)

B= Peso del residuo + peso del contenedor después de la ignición (g)

3.2.5.1.2. Contenido total de carbono

El carbono orgánico total (COT) se determinó con el método de pérdida por ignición (loss on ignition, LOI) el cual se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra sometida a calcinación en una mufla a 375 °C durante 16 horas (Karla y Maynard, 1991). Esta pérdida de peso se traduce en el porcentaje de materia orgánica. El 50% de la materia orgánica está compuesta por carbono, por lo tanto para convertir el carbono orgánico total a materia orgánica, se utilizó un factor de 1.724 propuesto por Van Bemmelen (Eyherabide M 2014). El cálculo se realiza mediante la ecuación 3.

$$\% \text{ Toc} = \frac{\left[\frac{(A-B)*100}{A} \right]}{1.724} \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:

A= Peso de muestra seca (g)

B= Peso de muestra incinerada (g)

3.2.5.1.3. Contenido total de nitrógeno (N)

El nitrógeno total se analizó por medio de la técnica de Kjeldahl modificada por HACH Company (2012), método HACH 8075. El término nitrógeno total de Kjeldahl se refiere a las combinaciones de nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico. Sin embargo, sólo los compuestos orgánicos de nitrógeno que aparecen como nitrógeno ligado orgánicamente en este estado trinegativo se determinan en esta prueba. El nitrógeno que está presente en esta forma se convierte en sales de amonio por la acción del ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno en el equipo de digestión Digesdadl de la marca HACHA, que se observa en la Figura 10. Las lecturas de los análisis proximal y último se realizaron por los métodos HACH se efectuaron en un espectrofotómetro marca HACH modelo DR6000 a 460 nm; dicho equipo se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Digestor



Figura 10. Espectrofotómetro

3.2.5.1.4. Contenido proximal de cenizas

Siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D 1102 – 84:2007, las etapas para la medición del contenido de cenizas fueron las siguientes.

- La mufla se configuró a 950 °C de temperatura, y se dejó calentar por 48 horas aproximadamente.
- Se obtuvo el contenido de humedad inicial de la muestra mediante el método de pérdida de peso.
- Se pesaron tres muestras de 2 g cada una en los crisoles previamente secos y tarados.
- Los crisoles sin tapa fueron ubicados a la entrada de la mufla, observando que los pellets hicieran combustión y esperando hasta que dejara de arder.
- Posteriormente, los crisoles fueron ubicados en el centro de la mufla dejándolos a puerta cerrada por 8 h.
- Transcurrido dicho tiempo, se apagó la mufla y se abrió la tapa sobre la cual se pusieron los crisoles durante 10 min para bajar la temperatura.
- A continuación los crisoles fueron puestos en el desecador cada uno con tapa y se dejaron enfriar por 30 min. Finalmente, los crisoles sin tapa fueron pesados en balanza analítica, se anotó el color de la ceniza y se calculó su porcentaje (%) con relación al peso seco de la muestra inicial observado con la ecuación 4.

$$CC = \frac{P_{Sc} - P_{Cc}}{P_{Cm}} * 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

Dónde:

CC= Contenido de cenizas (%).

P_{Sc}= Peso seco del crisol más la ceniza (g).

P_{Cc} = Peso seco del crisol (g).

P_{Cm} = Peso seco de la muestra inicial corregido por humedad (g).

3.2.5.2. Poder calorífico

Se pesó aproximadamente 1 g de muestra pulverizada de cada biomasa. Mediante una prensa manual, Figura 12, se procedió a introducir la muestra para generar una pastilla. Las pastillas obtenidas se introducirán al calorímetro, Figura 11, el cual se conecta a una fuente de 110 V.



Figura 11. Prensa Manual



Figura 12. Calorímetro

Se regularon los manómetros de los tanques de oxígeno y aire a 300 KPa y 80 Psia, respectivamente. En la pantalla de mando del calorímetro se selecciona la opción operar calorímetro, se verificó la existencia de agua en el reservorio de éste, ubicado en la parte de abajo. Se procede a seleccionar la opción calentador de bomba 3 (predestinada) en la pantalla de mando del calorímetro. Se espera de 5-8 minutos para que el equipo alcance una temperatura de 30 °C. Luego se procedió a colocar el hilo de algodón con dos pinzas metálicas, de manera que éste quede en contacto con la muestra para realizar la combustión. Posteriormente, se introdujo la muestra (pastilla) dentro del cuerpo de la bomba de combustión; se cerró de manera que quedara completamente hermética para no tener algún accidente o intervención en la muestra.

Finalmente, se introduce el peso de la muestra en el software del equipo, y se espera aproximadamente 7 minutos para obtener el valor del poder calórico inferior. Cabe mencionar que cada uno de los procedimientos se realizó por triplicado para obtener una mejor reproducibilidad en los datos.

Los procedimientos anteriormente descritos también se realizaron a los pellets de cascarilla de arroz y los pellets de mezclas con paja de trigo; además de estos análisis se agregan tres procedimientos más durabilidad, dimensiones y densidad, los cuales se describen a continuación.

3.2.5.3. Dimensiones

La determinación del diámetro y la longitud de los pellets se realizaron utilizando un vernier de 200 mm, marca Mitutoyo, mostrado en la Figura 13. La medición del diámetro y longitud de los pellets fue realizada de la siguiente forma; para la longitud se localizó cada punta del calibrador en el centro de cada extremo del pellet, y el diámetro se midió en el centro de la longitud del pellet.

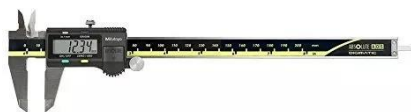


Figura 13. Vernier Mitutoyo

3.2.5.4. Durabilidad mecánica

Para la evaluación de este parámetro se escogió un método en el que se dejaron caer los pellets; ya que este método es más adecuado para simular las cargas a las que serán sometidos los pellets en el proceso de transporte.

Se estimó la durabilidad de los pellets en las pruebas preliminares utilizando una variación del Standard Test Method for Drop Shatter Test for Coke ASTM D3038 – 93 (2010). Se midió la masa de un solo pellet antes de realizar la prueba utilizando la balanza de precisión; luego se dejó caer el pellet desde una altura de 1.85 m sobre una baldosa plástica, se recogió el pedazo de mayor tamaño y éste se toma como la masa final del pellet. La prueba se realizó por triplicado, y se le aplicó tanto a los pellets de cascarilla de arroz como los de mezcla con paja de trigo con una muestra inicial de 200 g. Finalmente, se calcula la resistencia al impacto utilizando la Ecuación 5.

$$DU = \frac{A}{B} * 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde:

A= Masa final (g)

B= Masa inicial (g)

3.2.5.5. Densidad a granel

En un recipiente de aluminio cilíndrico resistente e impermeable con una altura de 72 mm y un diámetro de 53 mm se colocaron manualmente los pellets hasta llegar al tope; luego la muestra es pesada en la balanza de precisión.

El volumen del recipiente se determinó llenando el recipiente con agua y unas gotas de jabón líquido hasta la máxima capacidad; se pesan los recipientes antes y después de llenado para calcular el peso del agua, y se calcula el volumen del agua así como la densidad a granel con la ecuación 6. Este procedimiento se realizó por triplicado para los pellets de cascarilla de arroz y mezclas.

$$D = \frac{B-A}{v} \quad (\text{Ec. 6})$$

Dónde:

B = es la masa del recipiente con la muestra en kg.

A= es la masa del recipiente vacío en kg.

V = es el volumen del recipiente en m³.

3.2.6. Diseño experimental inicial

Con el fin de encontrar las condiciones óptimas para peletizar las materias primas se seleccionaron dos factores.

- Porcentaje de humedad para obtener mayor poder calorífico.
- Porción de paja de trigo adecuado para obtener mayor poder calorífico
-

En el caso de la humedad, se estudiaron tres niveles en función de la humedad inicial del residuo (1%, 4%, Humedad inicial %), mientras que las mezclas fueron tres niveles: cascarilla de arroz (100%), cascarilla de arroz y paja de trigo (50% y 50%), cascarilla de arroz y paja de trigo (75% y 25%). Todas estas combinaciones se realizaron por triplicado.

3.2.7. Elaboración de pellets

Para la elaboración de los pellets se mezclaron las materias primas con los tratamientos anteriormente mencionados hasta obtener una textura homogénea; luego con la ayuda del higrómetro se obtuvo la medida de la humedad de cada una de éstas y se procedió a peletizar. Primero se produjeron los pellets de cascarilla de arroz, y posteriormente los pellets con la mezcla de cascarilla de arroz y paja de trigo. En la Figura 15 se muestra el equipo utilizado para la fabricación de los pellets. Los pellets resultantes fueron caracterizados de acuerdo a lo establecido previamente en la sección 3.2.5.



Figura 14. Peletizadora

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de las propiedades fisicoquímicas y análisis elemental de la cascarilla de arroz, paja de trigo, pellets de cascarilla de arroz y de mezclas. Los resultados serán presentados por escenarios para facilitar el análisis e interpretación. Estos incluyen la caracterización de las biomásas, peletización de las biomásas, diseño experimental modificado, pellets de cascarilla de arroz y pellets de mezclas.

4.1. Caracterización de las biomásas

De la caracterización de las biomásas se obtuvo que la humedad de la cascarilla de arroz en su estado natural fue de 8.27%. Para el caso de la paja de trigo se realizaron los mismos procesos encontrándose una humedad inicial de 6%.

4.1.1. Análisis térmico de la cascarilla de arroz (TGA)

Se analizaron dos muestras de biomasa de la cascarilla de arroz mediante la técnica de termogravimetría. La Muestra 1 contiene un 8.27% de humedad y la Muestra 2 un 1% de humedad; dichas humedades se seleccionaron dado que representan los extremos de los valores seleccionados en el diseño de experimentos. Las Figuras 16 y 17 indican la pérdida de peso detectada mediante el calentamiento de ambas muestras de cascarilla de arroz en las siguientes condiciones de análisis: (a) 40.0 ml aire/min; (b) incremento de 10 °C/min.

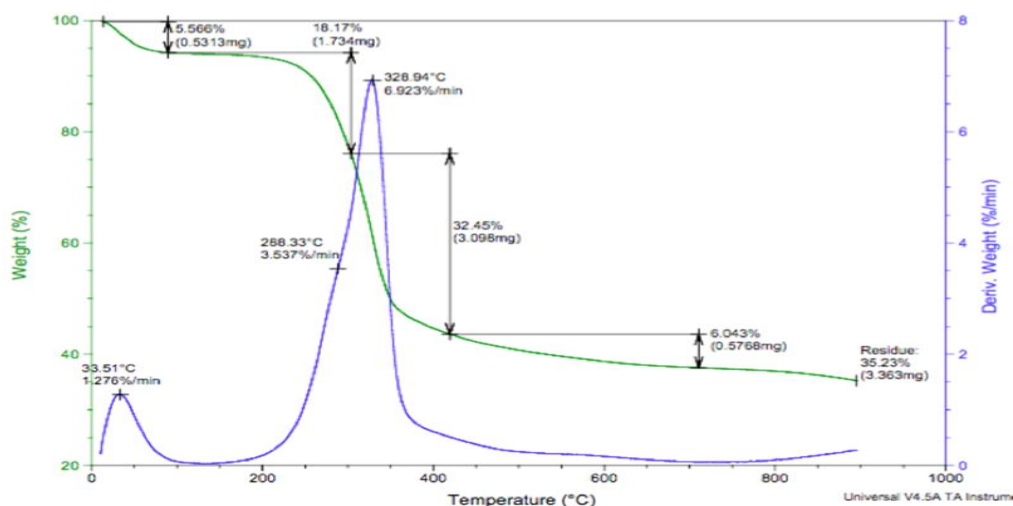


Figura 15. Análisis termogravimétrico de la cascarilla de arroz con 8.27% de humedad

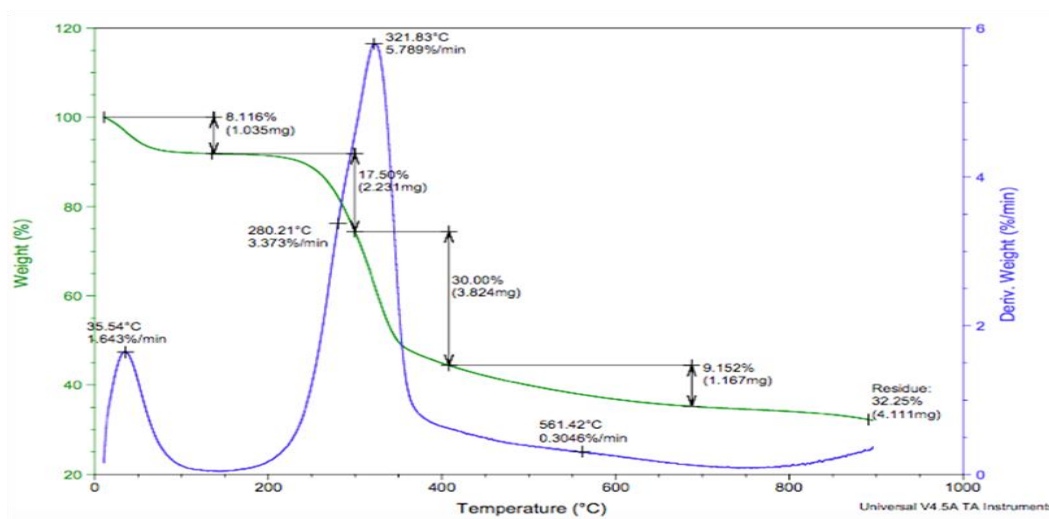


Figura 16. Análisis termogravimétrico de la cascarilla de arroz con 1% de humedad

De acuerdo a los resultados obtenidos, Figura 16, la biomasa de cascarilla de arroz seca (1% humedad) experimenta dos pérdidas importantes de masa a lo largo de dos períodos determinados de temperatura: 1er período: 100 - 300 °C; 2o período: 300 – 420 °C. Estos períodos son nombrados según varios autores como “zonas de reacción”. A partir de 700 °C la biomasa no experimenta ninguna pérdida de masa importante, debido a que ésta ya se encuentra en forma de ceniza.

Inicialmente, el intervalo de temperatura que va desde 0 a 100 °C, muestra que a una temperatura máxima de 33.51 °C ocurrió una pérdida de peso del 1.276%; estas pérdidas se atribuyen a la humedad de la muestra.

Luego se inició la descomposición de la hemicelulosa, entre 200-320 °C, con temperatura máxima de 288.83 °C; inmediatamente con el inicio de la pirólisis de la celulosa, entre 320-400 °C, se observó su descomposición a una temperatura máxima de 328.94 °C. Finalmente, se conoce que la lignina se descompone secuencialmente en el intervalo de temperatura ambiente hasta 900 °C; por ello y de acuerdo a la literatura, no se registró una banda específica para su descomposición a una temperatura determinada.

Por otra parte, la biomasa de cascarilla de arroz seca con 8.27% de humedad, Figura 16, experimenta dos pérdidas importantes de masa a lo largo de dos períodos determinados de temperatura: 1er período: 150 - 300 °C; 2o período: 300 – 410 °C. A partir de 700 °C la biomasa no experimenta ninguna pérdida de masa importante, debido a que ésta ya se encuentra en forma de ceniza.

Inicialmente, el intervalo de temperatura que va desde 0 a 100 °C, muestra que a una temperatura máxima de 35.54 °C ocurrió una pérdida de peso del 1.64%; estas pérdidas se atribuyen a la humedad de la muestra.

Luego se inició la descomposición de la hemicelulosa, entre 200-320 °C, con temperatura máxima de 280.21 °C; inmediatamente con el inicio de la pirólisis de la celulosa, entre 320-400 °C, se observó su descomposición a una temperatura máxima de 321.83 °C. Finalmente, se conoce que la lignina se descompone secuencialmente en el intervalo de temperatura ambiente hasta 900 °C; por ello y de acuerdo a la literatura, no se registró una banda específica para su descomposición a una temperatura determinada.

4.2. Propiedades físicas de las biomásas.

4.2.1. Cascarilla de arroz

En la Figura 17 se presenta el estado físico de la cascarilla de arroz con la humedad inicial; mientras que en la Figura 18 se muestra la cascarilla de arroz molida en función del porcentaje de humedad. Se observa que cuanto más húmeda se encuentra la cascarilla presenta un color más pardo, y su consistencia es más granulosa.



Figura 17. Cascarilla de arroz con humedad inicial de 8.2%



(A)

(B)

(C)

Figura 18. Biomasa con diferentes humedades. A) 10% de humedad. B) 8.2% de humedad. C) 1% de humedad

En la Tabla 11 se presenta la comparación entre los parámetros de la caracterización de la cascarilla de arroz en diversos países (Valverde, Serria & Monteagudo, 2007) con los resultados de las pruebas de la cascarilla de arroz realizadas en el presente trabajo, mientras que en la Figura 20 se presentan las propiedades fisicoquímicas y el poder calorífico de las tres muestras con las diferentes humedades M1 (10%), M2 (8.27%) y M3 (1%).

Tabla 11. Caracterización química, física y energética de la cascarilla de arroz.

| Análisis inmediato | | | | | |
|--------------------|--------|----|----|----|----------------------|
| Origen | Unidad | M1 | M2 | M3 | (Valverde, Serria, & |
| | | | | | |

| | | | | | Monteagudo, 2007) |
|----------------------|----------|-----------|-------------|----------|----------------------|
| Humedad total | % (b.h) | 10 | 8.27 | 1 | (0-10) |
| Volátiles | % (b.s) | 85.3 | 83.18 | 82.03 | (74-89) |
| Cenizas | % (b.s) | 17.5 | 14.6 | 12.8 | (16.93-24.6) |
| Carbono fijo | % (b.s) | 40.5 | 37.68 | 31.10 | (37.6-42.6) |
| TKN | % (b.s) | 0.425 | 0.21 | 0.19 | (0.21-1.88) |

| Poder calorífico | | | | | |
|-------------------------|------------------|----------------|---------------|---------------|--------------------------|
| PCI | (kcal/kg) | 3078.72 | 3223.7 | 4000.1 | (3164.43-3398.66) |

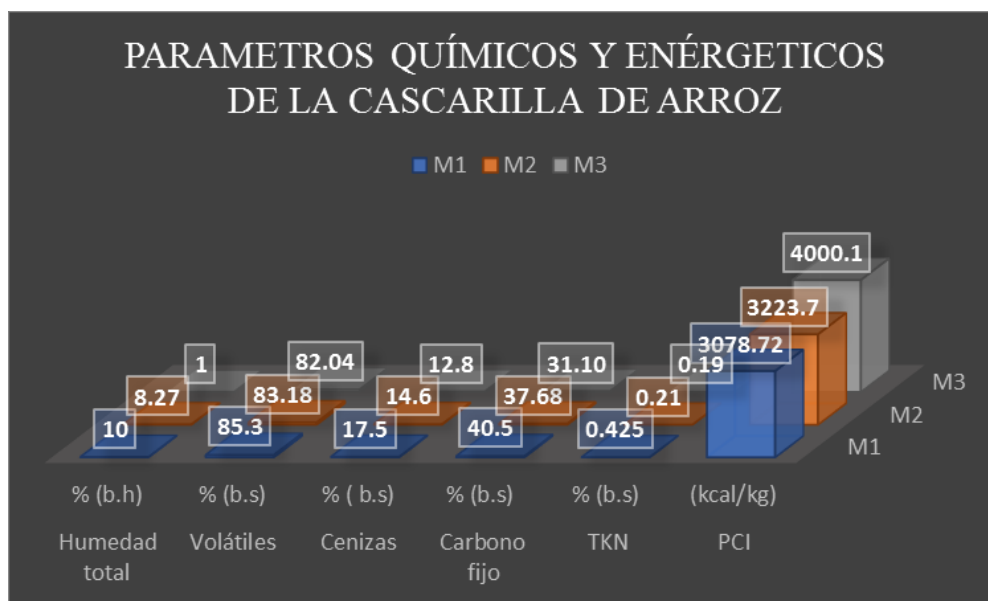


Figura 19. Relación en los parámetros químicos y energéticos de la cascarilla de arroz con diferentes humedades

De la información contenida en la Tabla 10 y en la Figura 20 se observa que los resultados de la biomasa analizada se encuentran en el rango de valores reportados en la literatura, para la composición elemental de la cascarilla de arroz a diferentes porcentajes de humedad (Valverde, Serria, & Monteagudo, 2007).

- **Contenido de humedad:** Las humedades obtenidas en las pruebas (10, 8.27 y 1%), están dentro del valor expuesto en los valores de referencia (0, 10%). Esto indica que son óptimos valores para realizar procesos de conversión termoquímica como la combustión.
- **Contenido de ceniza:** El contenido de ceniza de las muestras M1, M2 y M3 fue de 15.6, 14.6 y 12.8 en porcentaje de masa, respectivamente; éstas se encuentran dentro del rango que se reporta en la literatura (19.93 y 24.6). El contenido de cenizas más bajo lo presenta M3 con el 12.8%. Debe tenerse en cuenta que entre mayor sea la cantidad de ceniza en el combustible sólido, menor será el calor obtenido; aumentándose los problemas de manejo y disposición de las grandes cantidades de ceniza producidas (Uribe, 1986); puesto los combustibles con niveles de más de 20% de cenizas no son propicios para la generación de calor (López & Llera, 2010; García et al.2012).
- **Poder calorífico:** Los poderes caloríficos obtenidos de las muestras M1, M2 y M3 fueron de 4000.1, 3223.7 y 3078.72 kcal/kg, respectivamente; estos valores se encuentran dentro del rango reportado en la literatura. Como se pudo observar el poder calórico está relacionado directamente con el contenido de humedad, ya que la muestra M1 que obtuvo mayor poder calorífico 4000.1 Kcal/kg es la que pose menor humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia en la combustión, debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua, y no se aprovecha en la reducción química del material.
- **Análisis elemental:** El contenido de nitrógeno de las muestras M1, M2 y M3 fue de 0.425, 0.21 y 0.19 en porcentaje de masa, respectivamente; comparado con el valor

de referencia de la literatura reportada se encuentra muy por debajo del rango. También se observa que el contenido de nitrógeno es directamente proporcional a la humedad, ya que la muestra con menor humedad M3 es la que contiene menor porcentaje de nitrógeno. Los resultados de las muestras M1, M2 y M3 analizadas presentan valores de material volátil de 85.3, 83.18 y 82.035 %, respectivamente; ubicándose en el rango reportado por la literatura el cual está entre 74-89%. Se denota en la Figura 20 que la muestra con mayor contenido de material volátil es M1, mostrando la relación inversamente proporcional que tiene con el porcentaje de humedad.

- **Análisis inmediato:** El contenido de carbono de las muestras fue de 40.5, 37.68 y 31.902 % para M1, M2 y M3, respectivamente; los cuales se encuentran entre 33.4-42.5% que es el rango reportado en la literatura (Valverde, Serría, & Monteagudo, 2007). Por otro lado, se observa en la Figura 20 que la muestra M3 presenta el menor porcentaje de carbono, 31.10%; esto es muy importante tenerlo en cuenta ya que el contenido de carbono es relevante en los diferentes procesos termoquímicos. Los resultados en las muestras analizadas de los porcentajes de carbono fijo para la cascarilla de arroz son un índice de ignición, ya que están relacionados con la reactividad de la materia; entre menor sea el contenido de carbono fijo respecto al contenido de compuestos volátiles se necesita menor tiempo de residencia para la combustión completa del recurso biomásico (López & Llera, 2010).

4.2.2. Paja de trigo

En la Figura 20 se presenta el estado físico de la paja de trigo con la humedad inicial, mientras que en la Figura 21 se muestra la paja de trigo después de ser molida en la peletizadora.



Figura 20. Paja de trigo con humedad inicial de 6%



Figura 21. Paja de trigo molida con humedad inicial de 6%

En la Tabla 12 se presenta la comparación entre los parámetros de la caracterización de la paja de trigo cultivada en Mexicali y Baja California con los resultados de las pruebas de la paja de trigo obtenidas en el presente trabajo.

Tabla 12. Caracterización química, física y energética de la paja de trigo.

| Análisis inmediato | | | | |
|---------------------------|----------------|------------|------------|--|
| Origen | Unidad | MT1 | MT2 | (Lydia Toscano Palomar, 2015) |
| Humedad total | % (b.h) | 1 | 8.2 | (0-10) |
| Volátiles | % (b.s) | 69.2 | 67.17 | (74-89) |

| | | | | |
|---------------------|----------|-------|------|-------------|
| Cenizas | % (b.s) | 11.3 | 12.9 | ≤10.7 |
| Carbono fijo | % (b.s) | 48.56 | 49.3 | (41.4-42.7) |
| TKN | % (b.s) | 0.22 | 0.63 | (0.69-0.77) |

| Poder calorífico | | | | |
|-------------------------|------------------|--------------|--------------|----------------------|
| PCI | (kcal/kg) | 4,567 | 4,262 | (4,280-4,345) |

De la información contenida en la Tabla 12 se observa que los resultados de la biomasa analizada se encuentran en el rango de valores reportados en la literatura, para la composición elemental de la paja de trigo a diferentes porcentajes de humedad.

- **Contenido de humedad:** Las humedades obtenidas en las pruebas (1% y 8.2%), están dentro del valor expuesto en los valores de referencia (0, 10%). Esto indica que son óptimos valores para realizar procesos de conversión termoquímica como la combustión.
- **Contenido de ceniza:** El contenido de ceniza de las muestras MT1 y MT2 fue de 11.3 y 12.9 en porcentaje de masa, respectivamente; éstas se encuentran fuera del rango que se reporta en la literatura ≤ 10 . El contenido de cenizas más bajo lo presenta M3 con el 11.3%.
- **Poder calorífico:** Los poderes caloríficos obtenidos de las muestras MT1 y MT2 fueron de 4567 y 4262 kcal/kg, respectivamente. Como se pudo observar el poder calorífico está relacionado directamente con el contenido de humedad, ya que la muestra MT1 que obtuvo mayor poder calorífico 4567 kcal/kg es la que posee menor humedad.
- **Análisis elemental:** El contenido de nitrógeno de las muestras MT1 y MT2 fue de 0.22 y 0.36 en porcentaje de masa, respectivamente; comparado con el valor de referencia de la literatura reportada MT1 se encuentra muy por debajo del rango, mientras MT2 está dentro de éste. También se observa que el contenido de nitrógeno es directamente proporcional a la humedad, ya que la muestra con menor

humedad es la que contiene menor porcentaje de nitrógeno. Los resultados de las muestras MT1 y MT2 analizadas presentan valores de material volátil de 69.2 y 67.17 %, respectivamente; ambos ubicándose debajo del rango reportado por la literatura.

- **Análisis inmediato:** El contenido de carbono de las muestras fue de 48.56 y 49.3 % para MT1 y MT2, respectivamente; esto es muy importante ya que el contenido de carbono es relevante en los diferentes procesos termoquímicos. Los resultados en las muestras analizadas de los porcentajes de carbono fijo son un índice de ignición, ya que están relacionados con la reactividad de la materia; entre menor sea el contenido de carbono fijo respecto al contenido de compuestos volátiles se necesita menor tiempo de residencia para la combustión completa del recurso biomásico (López & Llera, 2010).

4.3. Peletización de las biomasas.

En la elaboración de pellets se logró observar que la materia prima se recalienta en el interior de la máquina, produciendo un vapor que humedece el material; esto ocasiona el atascamiento de la cascarilla de arroz y la paja de trigo en la matriz. Realizando un segundo esfuerzo para reducir el calentamiento se agregó agua al material para incrementar la humedad, pero el resultado sigue siendo el mismo. Intentando por tercera vez para lograr la producción de los pellets en la máquina se procedió a moler la cascarilla de arroz y la paja de trigo con el fin de obtener una granulometría más pequeña; se procedió a agregar el producto molido y se obtuvieron unos pocos pellets casi calcinados y la máquina se atascó nuevamente, como se muestra en la Figura 22. En un cuarto intento, se molió más cascarilla de arroz y se tomaron tres muestras a las cuales se les agregaron diferentes porciones de agua y el resultado siguió siendo el mismo: se producen unos pocos pellets y se atasca el material en la matriz.



Figura 22. Matriz atascada con la materia prima

Después de haber realizado las pruebas en varias ocasiones se determinó que el equipo utilizado tiene muy poca potencia para peletizar este tipo de materia prima, y que además tenía muy baja humedad; por esta razón se procedió a modificar la peletizadora y el diseño experimental inicial, este último se detalla a continuación.

4.4. Diseño experimental modificado

Con el fin de encontrar las condiciones óptimas para peletizar las materias primas se probaron dos factores.

- Porcentaje de humedad para poder peletizar.
- Porción de paja de trigo adecuado para obtener mayor poder calorífico

En el caso de la humedad, se estudiaron dos niveles en función de la humedad inicial del residuo (21 y 23%), mientras que las mezclas fueron tres niveles: cascarilla de arroz (100%), cascarilla de arroz y paja de trigo (50% y 50%), cascarilla de arroz y paja de trigo (75% y 25%). Las variables respuesta analizadas fueron: poder calorífico, contenido de humedad, durabilidad, contenido de cenizas, contenido de material volátil, contenido de carbono, contenido de nitrógeno y dimensiones. A continuación en la Tabla 13 se observan las combinaciones de biomasa que se tendrán en los pellets. Todas estas combinaciones se realizaron por triplicado.

Tabla 13. Combinaciones de manera porcentual de biomasa que tendrá cada pellet.

Combinaciones de mezclas

| Pellets | %Cascarilla de arroz | %Paja de trigo | %Humedad |
|---------|----------------------|----------------|----------|
| M1 | 100 | | 23 |
| M2 | 100 | | 21 |
| M3 | 50 | 50 | 21 |
| M4 | 75 | 25 | 21 |

Al finalizar el proceso de peletizado los pellets se esparcieron en una mesa para que ser enfriados, y luego se almacenaron de manera individual en bolsas ziploc previamente rotuladas con cada porcentaje de mezcla y su número.

4.5. Pellets de cascarilla de arroz con 2 niveles de humedad

Después de la caracterización química, energética y física de la cascarilla de arroz con diferentes niveles de humedad se concluyó que la muestra adecuada para realizar los pellets y caracterizarlos sería la que contiene menor humedad (1%); ya que ésta es la que obtuvo los mejores niveles requeridos para la gasificación y combustión de la biomasa. Pero como se mencionó en la sección anterior se cambió el diseño experimental y el resultado final de estas pruebas arroja que las humedades mínimas que se pueden peletizar en este equipo y esta clase de biomasa es 23% y 21% de humedad; estos al ser peletizados redujeron las humedades considerablemente quedando en 12.05% y 10.91%. Para el caso de los pellets de la cascarilla de arroz, no se tienen estudios sobre su densificación reportados a la fecha en la literatura.

Los pellets producidos en la prueba preliminar se presentan en la Figura 24, y los parámetros físicos en las Figuras 25 y 26.



(A)



(B)

Figura 23. Pellets de 100% cascarilla de arroz con diferentes humedades. A) 12.05% de humedad. B) 10.91% de humedad.



(A)



(B)

Figura 24. Parámetros físicos de pellets cascarilla de arroz con 12.05% de humedad. A) Longitud. B) Diámetro.



(A)

(B)

Figura 25. Parámetros físicos de pellets cascarilla de arroz con 10.91% de humedad. A) Longitud. B) Diámetro.

En la Tabla 14 se presenta la comparación entre los parámetros de la norma francesa con los resultados de las pruebas de los pellets, mientras que en las Figuras 27 y 28 se presentan los parámetros químicos, energéticos y físicos de los pellets.

Tabla 14. Comparación de parámetros de la norma francesa contra resultados de las pruebas a los pellets de cascarilla de arroz con 12.05 y 10.91% de humedad

| Análisis inmediato | | | | |
|---------------------------|---------------|-----------|-----------|-----------------------|
| Origen | Unidad | M1 | M2 | Norma Francesa |
| Humedad total | % (b.h) | 12.05 | 10.91 | <15 |
| Volátiles | % (b.s) | 83.13 | 83.02 | |
| Cenizas | % (b.s) | 16.75 | 16.64 | <7 |
| Carbono fijo | % (b.s) | 33.32 | 33.68 | <50 |
| TKN | % (b.s) | 0.296 | 0.4933 | <2 |

| Poder calorífico | | | | |
|-------------------------|------------------|----------------|-------------|-----------------|
| PCI | (kcal/kg) | 3265.67 | 3465 | >3439 |
| | | | | |

| Parámetros físicos | | | | |
|---------------------------|--|--|--|--|
|---------------------------|--|--|--|--|

| | | | | |
|--------------------------|-------------------|-------|-------|---------|
| Diámetro | Mm | 6.01 | 6 | (6-16) |
| Longitud | Mm | 25.24 | 25.12 | (10-30) |
| Densidad aparente | Kg/m ³ | 100 | 102 | >650 |
| Finos , F | % | 2 | 2.5 | <3 |
| Durabilidad, DU | % | 0.97 | 0.96 | >92 |

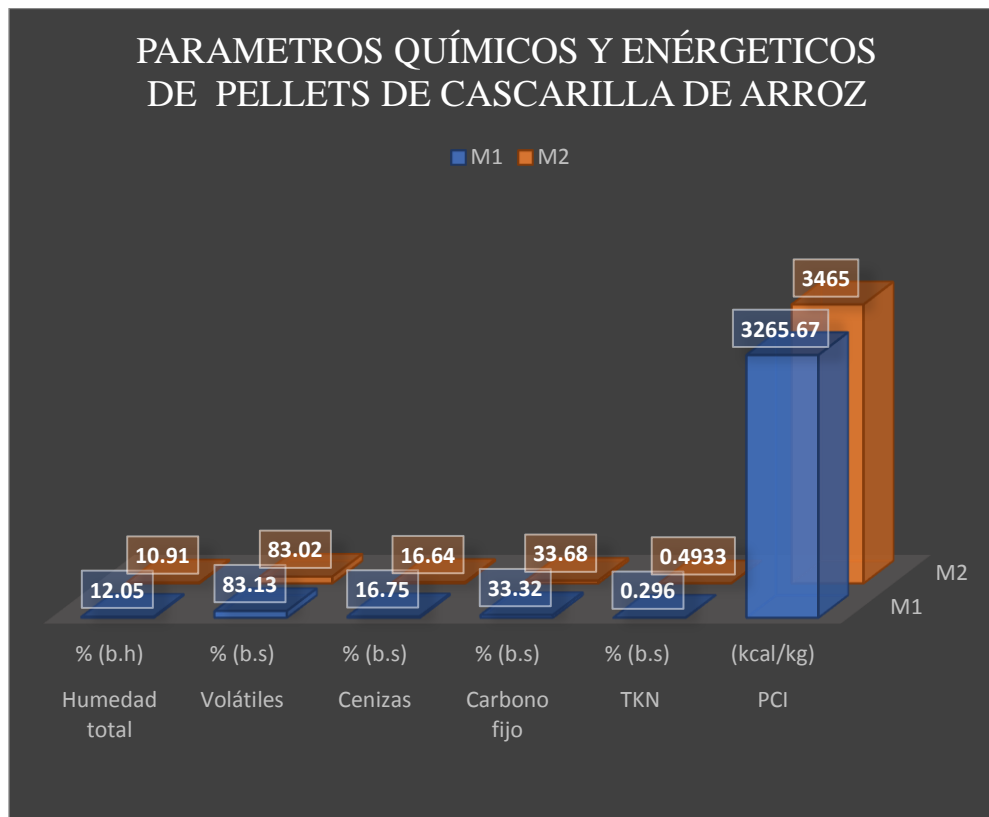


Figura 26. Relación de los parámetros químicos y energéticos de los pellets de cascarilla de arroz con humedades de (P1, 12.91%; P2, 10.91%)

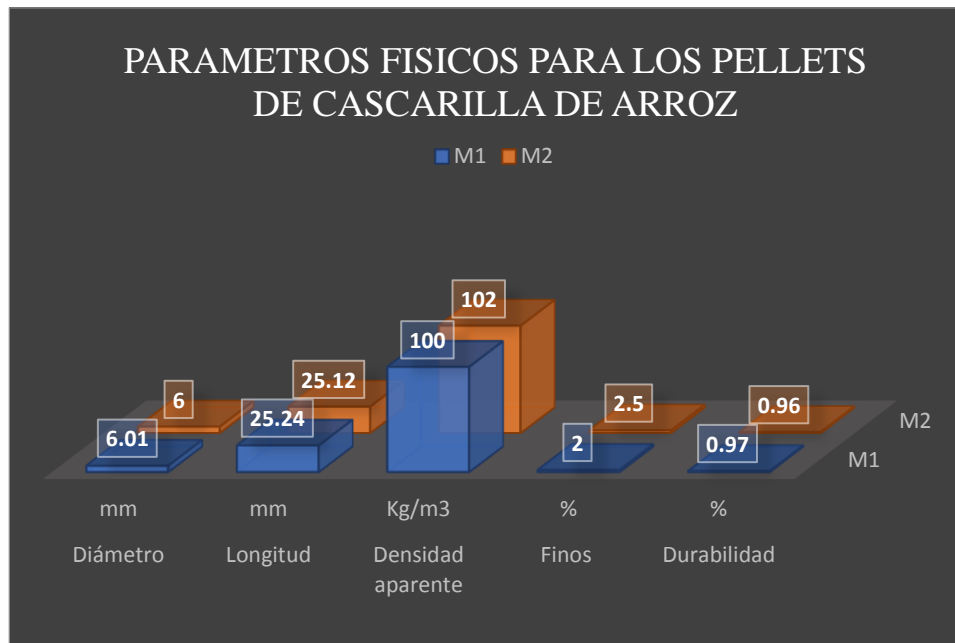


Figura 27. Relación de los parámetros físicos de los pellets de cascarilla de arroz con humedades de P1 y P2

A continuación se analizan y discuten los resultados obtenidos de las pruebas aplicadas a los pellets de acuerdo a los métodos antes mencionados.

- Contenido de humedad:** Las humedades obtenidas en las pruebas (P1 y P2) están dentro del valor expuesto en la norma (<15). El contenido de agua tuvo una influencia negativa sobre el poder calorífico neto, la eficiencia de la combustión y la temperatura de la combustión; puesto que un material lignocelulósico con mayor contenido de humedad requiere más energía para la evaporación del agua presente en la muestra durante dicha conversión humedad (Valverde, Serria, & Monteagudo, 2007).
- Contenido de ceniza:** El contenido de ceniza de las muestras fue de 16.75 y 16.64 en porcentaje de masa, muy por encima del valor de la norma (<7). Este valor se ve incrementado por el contenido de sílice, el principal componente que no sufre disociación al quemarse; esto hace que se presente una difícil combustión continua y completa. El contenido de ceniza es alto para los diferentes tipos de pellets existentes; todas las muestras analizadas presentaron contenidos de ceniza por

encima del 16%. Debe tenerse en cuenta que entre mayor sea la cantidad de ceniza en el carbón o combustible sólido, menor será el calor obtenido, aumentándose los problemas de manejo y disposición de las grandes cantidades de ceniza producidas (Uribe, 1986).

- **Poder calorífico:** Los poderes caloríficos obtenidos de las muestras fueron de 3465 y 3265.67 y kcal/kg. El pellet de menor humedad quedó dentro del rango permitido por la norma francesa; esto es importante para el uso final de biocombustible, ya que permite obtener gran cantidad de energía en pocas cantidades de combustible (densidad de energía). El pellet de mayor humedad quedó por debajo del valor de referencia de la norma, mostrando la influencia negativa de la humedad en el poder calorífico.
- **Análisis inmediato:** El contenido del carbono fijo de las muestras fue de 33.68 y 33.32 en porcentaje de masa, estos porcentajes están incluidos dentro del rango de la norma francesa. Cabe mencionar que el contenido de carbono fijo se obtiene de restar al total del carbono el contenido de cenizas el material volátil y la humedad en porcentaje de masa. Entre más alto sea este valor, más material sólido se tendrá para ser quemado; por lo que es importante para calcular la eficiencia en equipos de combustión. El contenido del material volátil de las muestras fue de 83.13 y 82.02 en porcentaje de masa; aunque no hay parámetro de comparación en la norma es importante resaltar que los pellets con alto contenido de volátiles se combustionan más fácilmente.
- **Análisis elemental:** El contenido de nitrógeno de las muestras fue de 0.493 y 0.296 en porcentaje de masa; comparado con el valor de referencia de la norma francesa se encuentra muy por debajo del rango. Esto es una ventaja ya que un alto contenido de nitrógeno es perjudicial, dado que se producirían emisiones de NO_x; lo cual generaría una gran preocupación por las medidas ambientales que se están tomando en la evaluación de nuevos combustibles.
- **Dimensiones:** Comparando los resultados obtenidos con los criterios evaluados en la norma francesa se nota que en cuanto a las dimensiones de los pellets se cumple con esta norma, pues estas están entre 6 y 16 mm.

- **Densidad aparente:** En cuanto a la densidad aparente de los pellets se cumple con lo expuesto en la norma, ya que el valor obtenido fue de (100 y 102 kg/m³). Una baja densidad tiene un efecto negativo sobre la densidad de energía; y por lo tanto en los costos de transporte y la capacidad de almacenamiento, tanto para el productor y el usuario final de pellets.
- **Durabilidad:** El peso inicial de los pellets fue de 4.6 y 4.5 g; el peso registrado fue de 0.21 y 0.16 g. La pérdida de peso tras las caídas no es significativa, con esto se muestra que el material es lo suficientemente compacto para resistir las operaciones de transporte, almacenamiento y uso final sin que se desintegre o reduzca a tamaños más pequeños.

4.6. Pellets de cascarilla de arroz y paja de trigo con porcentajes diferentes.

Observando los resultados fisicoquímicos y energéticos de los pellets de cascarilla de arroz se tomó la determinación de hacer las mezclas con un 21% de humedad y con 2 porcentajes de paja de trigo como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Combinaciones de porcentajes de cascarilla de arroz y paja de trigo

| Análisis inmediato | | | |
|--------------------|----------------------|----------------|----------|
| Pellets | %Cascarilla de arroz | %Paja de trigo | %Humedad |
| M3 | 50 | 50 | 21 |
| M4 | 75 | 25 | 21 |

Las humedades se seleccionaron ya que los pellets producidos previamente cumplieron en todas las especificaciones de la norma (menos el de la ceniza), y tuvieron el mejor valor para el poder calorífico. Estas mezclas al ser peletizadas redujeron su humedad considerablemente quedando en 15.79% y 13.99%, respectivamente para M3 y M4. Para el caso de los pellets de la mezcla de cascarilla de arroz y paja de trigo no se tienen estudios reportados a la fecha en la literatura. A continuación, para cada muestra, se presenta la

caracterización obtenida junto con una imagen del pellet ensayado, mediante la Tabla 15 y las Figuras 29, 30 y 31, respectivamente.



(A)



(B)

Figura 28. Pellets de mezclas. A) 50% cascarilla de arroz y 50% paja trigo, B) 75% cascarilla de arroz y 25% paja de trigo.

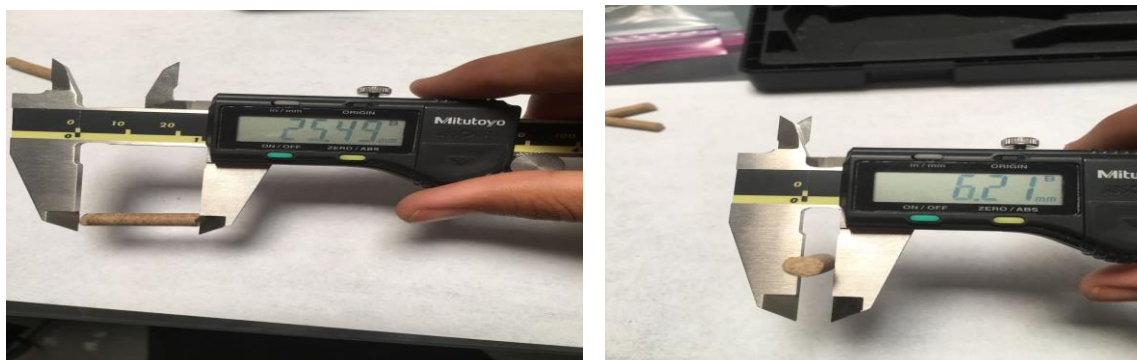


(A)



(B)

Figura 29. Parámetros físicos de pellets de mezclas 75% cascarilla de arroz y 25% paja de trigo. A) Longitud. B) Diámetro.



(A)

(B)

Figura 30. Parámetros físicos de pellets de mezclas 50% cascarilla de arroz y 50% paja de trigo. A) Longitud. B) Diámetro.

Tabla 16. Caracterización química, física y energéticas para los pellets de cascarilla de arroz y paja de trigo, en comparación con los valores referencia de la norma francesa.

| Análisis inmediato | | | | |
|---------------------------|---------------|-----------|-----------|-----------------------|
| Origen | Unidad | M3 | M4 | Norma Francesa |
| Humedad total | % (b.h) | 15.798 | 13.99 | <15 |
| Volátiles | % (b.s) | 88.652 | 86.07 | |
| Cenizas | % (b.s) | 11.39 | 13.97 | <7 |
| Carbono fijo | % (b.s) | 35.546 | 34.426 | <50 |
| TKN | % (b.s) | 1.56 | 1.03 | <2 |

| Poder calorífico | | | | |
|-------------------------|------------------|---------------|----------------|-----------------|
| PCI | (kcal/kg) | 3587.6 | 3518.33 | >3439 |

| Parámetros físicos | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|---------|
| Diámetro | mm | 6.21 | 6,33 | (6-16) |
| Longitud | mm | 25.49 | 25.37 | (10-30) |
| Densidad aparente | Kg/m3 | 103 | 108 | >650 |
| Finos , F | % | 3 | 2.8 | <3 |
| Durabilidad, DU | % | 0.89 | 0.91 | >92 |

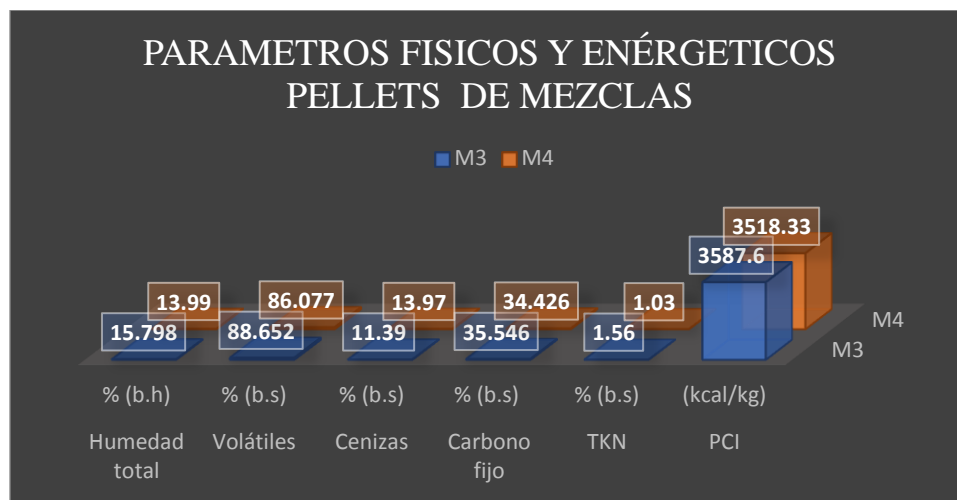


Figura 31. Relación de los parámetros químicos y energéticos de los pellets de cascarilla de arroz y paja de trigo con diferentes porcentajes de mezclas y humedades M3; 15.79% y M4; 13.99%.

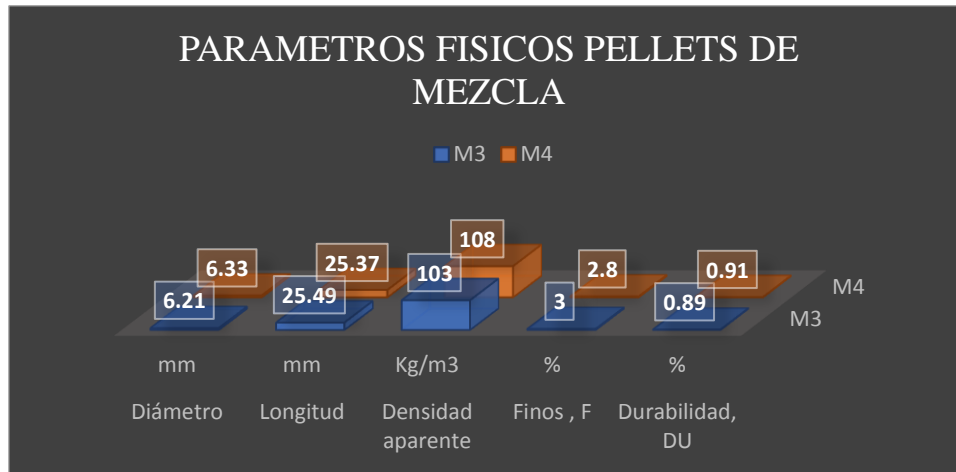


Figura 32. Relación de los parámetros físicos de los pellets de cascarilla de arroz y paja de trigo con diferentes porcentajes de mezclas y humedades (M3 y M4).

Se analizan y discuten los resultados obtenidos de las pruebas aplicadas a los pellets de acuerdo a los métodos antes mencionados.

- **Contenido de humedad:** Las humedades obtenidas en las pruebas (M3 y M4) están dentro del valor expuesto en la norma (<15).
- **Contenido de ceniza:** El contenido de ceniza de las muestras fue de 11.39 y 13.97 en porcentaje de masa, muy por encima del valor de la norma (<7).
- **Poder calorífico:** Los poderes caloríficos obtenidos de las muestras fueron de 3587.6 y 3518.33 y kcal/kg. Los dos pellets quedaron dentro del rango requerido por la norma.
- **Análisis inmediato:** El contenido del carbono fijo de las muestras fue de 35.54 y 34.42 en porcentaje de masa, estos porcentajes están incluidos dentro del rango de la norma francesa. Cabe mencionar que el contenido de carbono fijo se obtiene de restar al total del carbono el contenido de cenizas el material volátil y la humedad en porcentaje de masa. Entre más alto sea este valor, más material sólido se tendrá para ser quemado; por lo que es importante para calcular la eficiencia en equipos de combustión. El contenido del material volátil de las muestras fue de 88.65 y 86.07 en porcentaje de masa; aunque no hay parámetro de comparación en la norma es

importante resaltar que los pellets con alto contenido de volátiles se combustiónan más fácilmente.

- **Análisis elemental:** El contenido total de nitrógeno de las muestras fue de 1.56 y 1.03 en porcentaje de masa; comparado con el valor de referencia de la norma francesa se encuentra por debajo del rango.
- **Dimensiones:** Comparando los resultados obtenidos con los criterios evaluados en la norma francesa se nota que en cuanto a las dimensiones de los pellets se cumple con esta norma, pues estas están entre 6 y 16 mm.
- **Densidad aparente:** En cuanto a la densidad aparente de los pellets se cumple con lo expuesto en la norma, ya que el valor obtenido fue de (100 y 102 kg/m³). Una baja densidad tiene un efecto negativo sobre la densidad de energía; y por lo tanto en los costos de transporte y la capacidad de almacenamiento, tanto para el productor y el usuario final de pellets.
- **Durabilidad:** El peso inicial de los pellets fue de 4.6 y 4.5 g; el peso registrado fue de 0.21 y 0.16 g. La pérdida de peso tras las caídas no es significativa, con esto se muestra que el material es lo suficientemente compacto para resistir las operaciones de transporte, almacenamiento y uso final sin que se desintegre o reduzca a tamaños más pequeños.

4.7. Comparación de pellets de cascarilla de arroz y paja de trigo con mejor poder calorífico y humedad de 21%

- **Contenido de humedad:** A pesar que las biomásas tienen la misma humedad inicial de 21% al momento de peletizarlos los pellets se obtienen con humedades diferentes. Para la muestra P2 (10.91%) está dentro del valor expuesto en la norma (<15), mientras que P3 (15.79%) está por encima del valor establecido en ésta. Observando la diferencia entre los dos pellets el porcentaje de humedad de P3 es superior en 30.94%, lo cual obtiene una diferencia de 4.88 porcentaje de humedad entre P2 y P3.
- **Contenido de ceniza:** El contenido de ceniza de las muestras para P3 (11.39%) y P2 (16.64%) en porcentaje de masa se encuentran por encima del valor de la norma

el cual es (<7); se observa que P3 tiene menor porcentaje de cenizas debido a que contiene menor porcentaje de silicio, la variación porcentual entre las dos es de 46.09%.

- **Poder calorífico:** Los poderes caloríficos obtenidos de las muestras fueron para P3 (3587.6 kcal/kg) y P2 (3465 kcal/kg). Comparando el resultado de los pellets se observa que el porcentaje calorífico de P3 es superior en un 3.42% a P2, la cual obtiene una diferencia de 122 kcal/kg entre las dos muestras. El poder calorífico es inversamente proporcional a la humedad; sin embargo en los resultados se observa que los pellets de mezcla, a pesar que tienen mayor humedad, son los que obtienen mayor poder calorífico. Los dos pellets quedaron dentro del rango requerido por la norma.
- **Análisis inmediato:** El contenido del carbono fijo de las muestras fue de P3 (35.54) y P4 (34.42) en porcentaje de masa, con una diferencia de 1.866 de porcentaje total de carbono fijo y una diferencia porcentual de 5.25%; estos porcentajes están incluidos dentro del rango de la norma francesa. Cabe mencionar que el contenido de carbono fijo se obtiene de restar al total del carbono el contenido de cenizas el material volátil y la humedad en porcentaje de masa. Entre más alto sea este valor, más material sólido se tendrá para ser quemado; por lo que es importante para calcular la eficiencia en equipos de combustión. El contenido del material volátil de las muestras fue de P3 (88.65%) y P2 (86.07%) en porcentaje de masa; aunque no hay parámetro de comparación en la norma es importante resaltar que los pellets con alto contenido de volátiles se combustionan más fácilmente.
- **Análisis elemental:** El contenido total de nitrógeno de las muestras fue de P3 (1.56) y P2 (0.49) en porcentaje de masa; encontrando que P3 se encuentra por encima con un valor porcentual de 68.38% y una diferencia de 1.0667 en porcentaje de nitrógeno total, comparado con el valor de referencia de la norma francesa se encuentra por debajo del rango.
- **Dimensiones:** Comparando los resultados obtenidos los pellets P3 (6.21 mm, 25.49 mm) y P2 (6 mm y 25.12 mm) se observan de forma homogénea con una mínima de diferencia de (0.21 mm y 0.37 mm). Comparando los criterios evaluados con la

norma francesa en cuanto a las dimensiones de los pellets se cumple con esta norma, pues estas están entre 6 mm y 16 mm.

- **Densidad aparente:** En cuanto a la densidad aparente de los pellets se cumple con lo expuesto en la norma, ya que el valor obtenido fue de (100 y 102 kg/m³). Una baja densidad tiene un efecto negativo sobre la densidad de energía; y por lo tanto en los costos de transporte y la capacidad de almacenamiento, tanto para el productor y el usuario final de pellets.
- **Durabilidad:** El peso inicial de los pellets fue de P3 (0.89) y P2 (0.96). La pérdida de peso tras las caídas no es significativa, con esto se muestra que el pellets de arroz P2 es de un material lo suficientemente compacto para resistir las operaciones de transporte, almacenamiento y uso final sin que se desintegre o reduzca a tamaños más pequeños, mientras que la mezcla con trigo lo hace más frágil.

4.8. Descripción del diseño de experimental realizado

Para el experimento llevado a cabo se propusieron los siguientes factores y variables respuesta como se puede observar en la Tabla 17.

Tabla 17. Factores y variables respuesta evaluados

| Variable Respuesta | Nomenclatura |
|---|-------------------------|
| Porcentaje de Cenizas (%) | % Cenizas |
| Porcentaje de nitrógeno total por la metodología Kjeldahl (%) | % TKN |
| Porcentaje de sólidos totales (%) | % Sólidos Totales |
| Porcentaje de Carbono total (%) | % TOC |
| Poder calorífico (Kcal) | Calorías totales (Kcal) |

Tabla 18. Variables respuesta evaluadas

| Factor | Niveles del Factor | Nomenclatura |
|---------------------------|---|---------------------|
| Materia Prima del pellet. | 100% Cascarilla de arroz | 100CA |
| | 50% Cascarilla de Arroz y 50% cascarilla de trigo | 50CA50CT |
| | 75% cascarilla de arroz y 25% cascarilla de trigo | 75CA25CT |
| Humedad (%) | 21% | 21 |
| | 23% | 23 |

4.8.1. Diseño experimental realizado

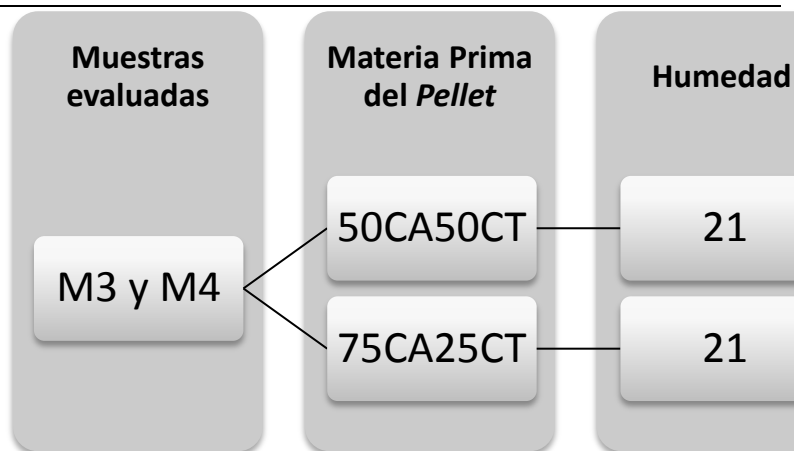
Para el proyecto, respecto a los tratamientos evaluados, se realizaron dos diseños experimentales de acuerdo al tipo de materia prima evaluada, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 19. Diseño experimental realizado en el proyecto

| Diseño Experimental | Esquema |
|---|----------------|
| <p>Primera etapa experimental: Dos factores, con uno de ellos de dos niveles (2^1)</p> | |
| Segunda | |

etapa experimental:

Dos factores con uno de ellos de dos niveles (2¹)



Como se muestra en la Tabla 19 se siguieron dos experimentos diferentes. En la primera etapa experimental únicamente se consideró un pellet de cascarilla de trigo (100CA) con dos humedades (21% y 23%). Debido a que se pretendía el mayor poder calorífico posible, y que se ha reportado que el poder calorífico se maximiza conforme se reduce la humedad, para la segunda etapa experimental sólo se ensayó la menor humedad (21%) puesto que era de esperarse un resultado inferior con 23%.

Cabe mencionar que se procedió con este diseño debido a que luego de evaluaciones realizadas, la humedad del 23% no arrojaba los mejores resultados de la mayor variable respuesta de interés (poder calorífico). Por ese motivo, en la segunda parte, sólo se evaluaron las nuevas materias primas del pellet (50CA50CT y 75CA25CT) con una única humedad (21%). 100CA: 100% cascarilla de arroz; 50CA50CT: 50% cascarilla de arroz y 50% cascarilla de trigo; 75CA25CT: 75% cascarilla de arroz y 25% cascarilla de trigo.

4.8.2. Diseño experimental con un factor y dos niveles.

El experimento más simple de todos es el de 1 único factor con k tratamientos, completamente aleatorizado. El diseño unifactorial (diseño de una vía) evalúa la significancia de cada término dividiendo cada media al cuadrado entre la media promedio al cuadrado entre grupos, y posteriormente la compara con el resultante estadístico F con el

valor crítico de F, considerando los apropiados grados de libertad (Wallenstein, Zucker & Fleiss, 1980).

Se asume, bajo los siguientes análisis, que sólo hay influencia del error experimental típico asociado a la unidad experimental sin restricción en aleatorizaciones (puesto que las unidades experimentales son homogéneas). En este caso, se habla de un diseño unifactorial completamente aleatorizado. El modelo estadístico a aplicar es:

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}, \varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \quad (\text{Ec. 7})$$
$$i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n$$

Ecuación 7. Modelo de diseño estadístico de un factor con dos niveles, completamente aleatorizado. Castaño y Domínguez (2010).

Asimismo, se supone que en los experimentos se dan los supuestos del error:

- El error es pequeño cuando su promedio de acerca a cero (tiene media cero).
- Es parejo (es decir, que la varianza es constante y no depende del tratamiento – homogeneidad de varianzas.).
- Cada unidad experimental (UE) tiene su propio error (ε_{ij} son mutuamente independientes, es decir, el error de una UE no influye en la expresión del de otra).
- El error sigue una función de Densidad Normal

(Ec. 8)

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2), \text{ con } \varepsilon \text{ independientes}$$

Ecuación 8. Expresión del error como una función de un comportamiento Normal con media cero y varianza determinada. Castaño y Domínguez (2010)

Se realizan pruebas de hipótesis donde se evalúa la diferencia entre los tratamientos. La variabilidad del error experimental (dada por la varianza) no es posible ser estimada. Si la diferencia de medias de los tratamientos es muy grande en relación a la varianza, entonces éstos no tienen efectos iguales sobre la variable respuesta.

4.8.3. Tabla de datos resultados del software JMP

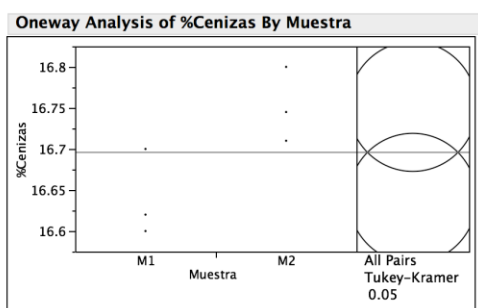
Este análisis se efectuó para los tratamientos individuales y para la combinación de los mismos, teniendo en cuenta que la información inicial requerida (Tabla 19), la cual fue introducida y procesada en el programa computacional JMP, donde se ejecuta un ANOVA para conocer si los elementos mencionados anteriormente influyen significativamente en el poder calorífico. Es importante aclarar que en el ANOVA se observa que los valores entre réplicas no tienen ninguna variación significativa, por lo tanto se puede concluir que los datos obtenidos entre las corridas experimentales son confiables de un replica a otra.

Tabla 20. Resultados de las réplicas de cada muestra, para todos los análisis realizados

| Muestra | Materia Prima | Humedad | Cenizas (%) | TKN (%) | Sólidos totales (%) | TOC (%) | Calorías Totales (Kcal) |
|---------|---------------|---------|-------------|---------|---------------------|---------|-------------------------|
| M1 | 100CA | 21 | 16.62 | 0.491 | 83.093 | 33.708 | 3467 |
| M1 | 100CA | 21 | 16.7 | 0.5 | 83.1 | 33.668 | 3473 |
| M1 | 100CA | 21 | 16.6 | 0.489 | 82.87 | 33.685 | 3456 |
| M2 | 100CA | 23 | 16.745 | 0.31 | 83.258 | 33.178 | 3256 |
| M2 | 100CA | 23 | 16.8 | 0.286 | 82.964 | 33.4632 | 3268 |
| M2 | 100CA | 23 | 16.71 | 0.292 | 83.174 | 33.328 | 3282 |
| M3 | 50CA50CT | 21 | 11.361 | 1.56 | 88.568 | 35.551 | 3585 |
| M3 | 50CA50CT | 21 | 11.4 | 1.572 | 88.7 | 35.545 | 3588 |
| M3 | 50CA50CT | 21 | 11.42 | 1.562 | 88.688 | 35.542 | 3590.3 |
| M4 | 75CA25CT | 21 | 13.978 | 1.0359 | 86.08 | 34.436 | 3518 |
| M4 | 75CA25CT | 21 | 13.972 | 1.0368 | 86.187 | 34.423 | 3516 |
| M4 | 75CA25CT | 21 | 13.98 | 1.0401 | 85.965 | 34.419 | 3521 |

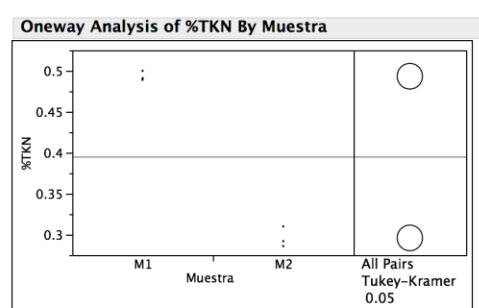
4.8.4. Análisis estadístico entre M1 y M2

Se realizó el análisis estadístico entre muestras del mismo tipo de biomasa (cascarilla de arroz) (M1 y M2). La prueba de Tukey-Kramer ($p < 0.05$).



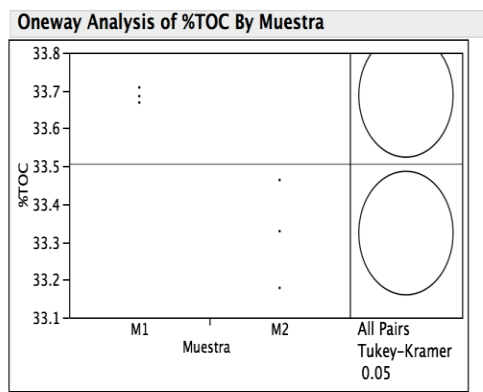
Means Comparisons
Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

90



Means Comparisons
Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

Figura 33a



Excluded Rows 6

Means Comparisons

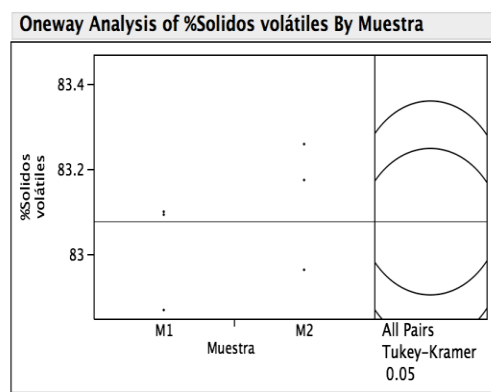
Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

| | q* | Alpha |
|--------------|----------|----------|
| Abs(Dif)-LSD | 2.77645 | 0.05 |
| | M1 | M2 |
| M1 | -0.23094 | 0.132993 |
| M2 | 0.132993 | -0.23094 |

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Figura 33c

Figura 33b



Excluded Rows 6

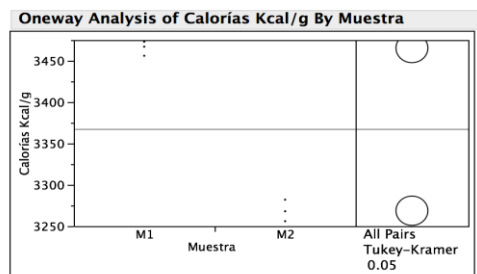
Means Comparisons

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

| | q* | Alpha |
|--------------|----------|----------|
| Abs(Dif)-LSD | 2.77645 | 0.05 |
| | M2 | M1 |
| M2 | -0.32078 | -0.20978 |
| M1 | -0.20978 | -0.32078 |

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Figura 33d



Excluded Rows 6

Means Comparisons

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

| | q* | Alpha |
|--------------|----------|----------|
| Abs(Dif)-LSD | 2.77645 | 0.05 |
| | M1 | M2 |
| M1 | -25.0223 | 171.6444 |
| M2 | 171.6444 | -25.0223 |

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Figura 33e

Figura 33. Análisis estadístico respecto al porcentaje de cenizas, entre la muestra 1 y la muestra 2. Se realizó la Prueba de Tukey-Kramer ($p < 0.05$) entre las muestras evaluadas (M1 y M2)

No hubo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre M1 y M2 para el porcentaje de cenizas (**Figura 33a**) y el porcentaje de sólidos (**Figura 33d**), aunque sí la hubo para los demás parámetros TKN (**Figura 33b**), %TOC (**Figura 33c**), Poder calorífico (**Figura 33e**). Se muestra, en cuanto al poder calorífico, que M1 tiene el mayor valor en este parámetro, razón por la cual se seleccionó como la muestra más deseable para los objetivos experimentales.

4.8.1 Análisis estadístico entre M3 y M4

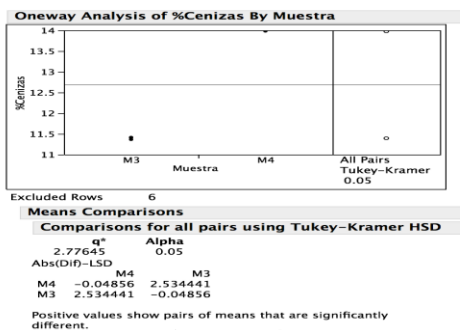


Figura 34a

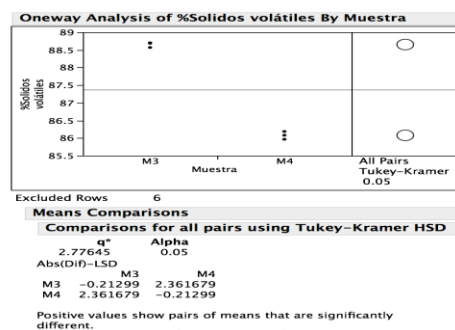


Figura 34b

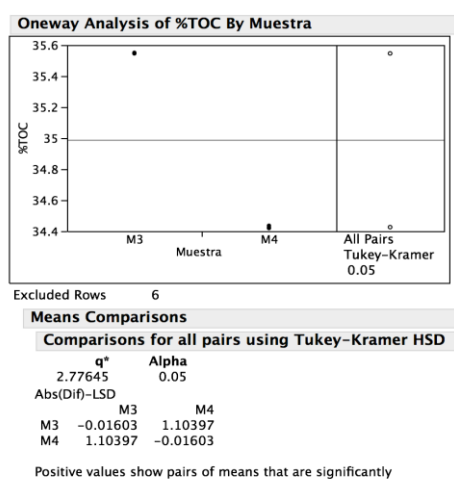
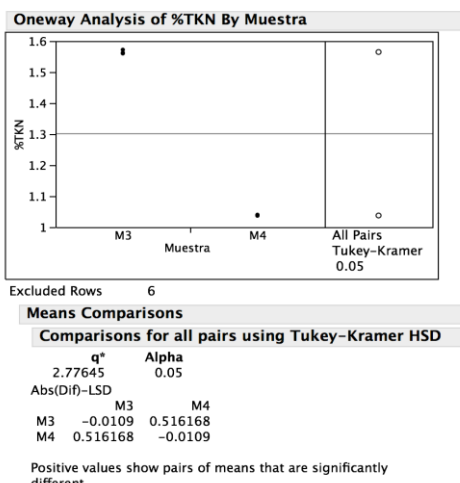


Figura 34c

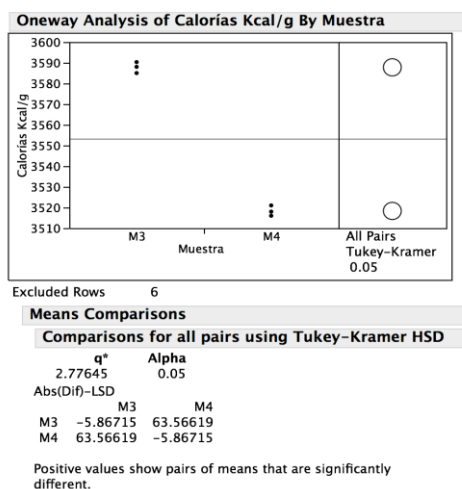


Figura 34e

Figura 34d

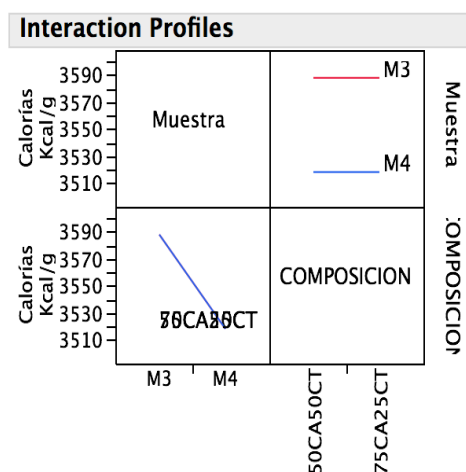


Figura 34f

Figura 34. Análisis estadístico respecto al porcentaje de cenizas, entre la muestra 3 y la muestra 4. Se realizó la Prueba de Tukey-Kramer ($p < 0.05$) entre las muestras evaluadas (M3 y M4)

Como se observa en las figuras las muestras M3 y M4 presentaron diferencias estadísticamente significativas entre todos los parámetros evaluados % cenizas (**Figura 34a**), %TKN (**Figura 34c**), % sólidos totales (**Figura 34b**), %TOC (**Figura 34d**) y poder calorífico (**Figura 34e**). Se evidencia que M3 tiene el mayor poder calorífico, razón por la cual fue seleccionada como la muestra más deseable para el objetivo del proyecto. En el Gráfico de interacciones entre composición y muestras (**Figura 34f**) no se presentaron interacciones entre la composición y muestra, para este tipo de biomasa. Sin embargo, se muestra que, en cuanto al poder calorífico, M3 presenta mayores valores para este parámetro respecto a M4.

4.8.2 Análisis entre M1 y M3

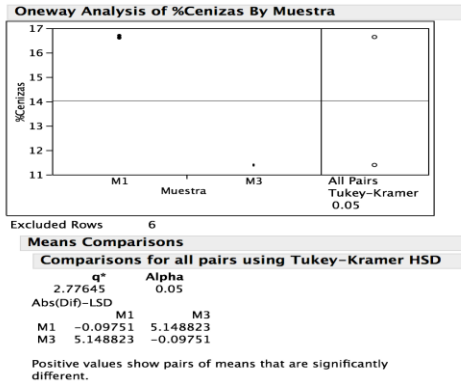


Figura 35a

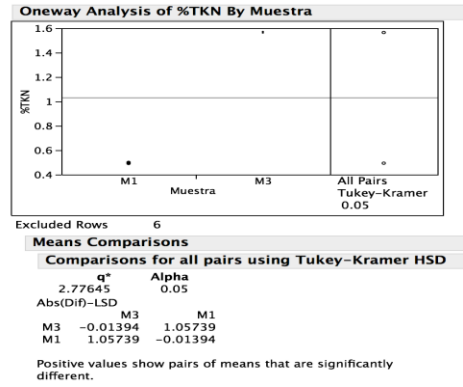


Figura 35b

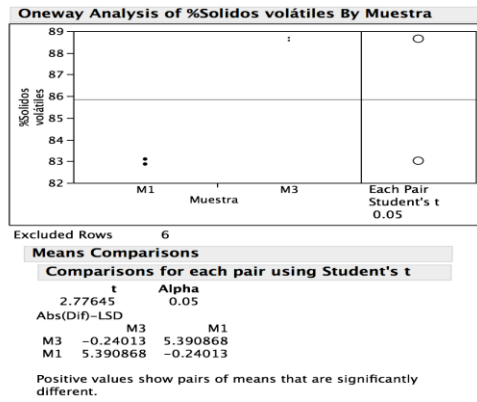


Figura 35c

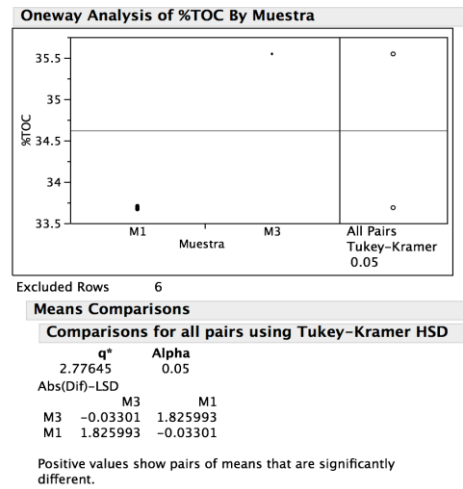


Figura 35d

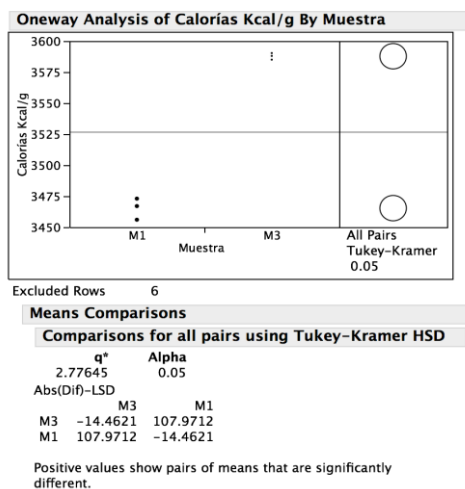


Figura 35e

Figura 35. Análisis estadístico respecto al porcentaje de cenizas, entre la muestra 1 y la muestra 3. Se realizó la Prueba de Tukey-Kramer ($p < 0.05$) entre las muestras evaluadas (M1 y M3)

El análisis estadístico entre las dos muestras reveló que existen diferencias estadísticamente significativas entre M1 y M3 en todos los parámetros, donde, para el poder calorífico, M3 exhibe los valores más altos, razón por la cual es esta muestra la que fue seleccionada como la mejor.

Estos resultados anteriores nos permiten construir la siguiente tabla de resultados con el correspondiente análisis estadístico:

Tabla 21. Contenido de cenizas (%), nitrógeno total Kjeldahl (%TKN), sólidos totales (%), carbono total (%) y calorías totales (kcal) de las muestras evaluadas

| Muestra | Materia Prima | Humedad | Cenizas (%) | TKN (%) | Sólidos totales (%) | TOC (%) | Calorías Totales (Kcal) |
|---------|---------------|---------|---------------------------|---------|---------------------------|---------|------------------------------|
| M1 | 100CA | 21 | 16.64 ^a ± 0.05 | 0.005 | 83.02 ^a ± 0.13 | 0.02 | 3465.33 ^a ± 8.62 |
| M2 | 100CA | 23 | 0.04 | 0.01 | 83.13 ^a ± 0.15 | 0.14 | 3268.67 ^b ± 13.01 |
| M3 | 50CA50CT | 21 | 0.03 | 0.006 | 88.65 ^a ± 0.07 | 0.004 | 3587.77 ^a ± 2.66 |
| M4 | 75CA25CT | 21 | 0.004 | 0.002 | 86.08 ^b ± 0.11 | 0.01 | 3518.33 ^b ± 2.52 |

Los resultados han sido expresados como la media \pm DE. Letras diferentes por columnas expresan diferencias estadísticamente significativas por la prueba de Tukey-Kramer ($p < 0.05$). El análisis ha sido realizado por el software estadístico JMP v. 8.0

5. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio para la producción y caracterización de pellets elaborados a partir de cascarilla de arroz, así como de sus mezclas con paja de trigo. En México, ambos residuos son utilizados en aplicaciones de poco valor agregado, por lo que su densificación para la producción de biocombustibles sólidos representa una alternativa interesante.

La forma y tamaño de la cascarilla de arroz indican que se necesita un acondicionamiento previo a ser utilizado en la tecnología de pelletizado, con la finalidad de obtener mejores resultados en la densificación. Los pellets de cascarilla de arroz tienen un poder calorífico por debajo del valor establecido en la Norma Francesa; esto indica que no es posible producir los pellets de cascarilla de arroz para uso comercial cuando la humedad de la biomasa es $\geq 23\%$ de humedad. El resto de los parámetros evaluados en la norma se cumplieron; dichos parámetros son longitud, diámetro, densidad a granel, durabilidad, material volátil, carbón y nitrógeno. Por otra parte, dado el alto contenido de cenizas es probable que se presenten problemas de ensuciamiento en las calderas. Cabe mencionar que la mezcla de cascarilla de arroz/paja de trigo para la formación de un combustible sólido tiene ventajas en cuanto al aumento del poder calorífico por unidad volumétrica y la densidad a granel. El hecho de usar estas mezclas reduce el contenido de azufre, cenizas y nitrógeno respecto a si se usara sólo una biomasa. El control de estos parámetros es de gran importancia por el impacto ambiental, y por el manejo de los productos de la combustión.

6. BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. (20 de Febrero de 2011). Biocombustibles Sólidos. *Asociación española de Normalización y Certificación*, 1-60. Obtenido de Determinación del Poder Calorífico.
- Alzate, C. A. (12 de Junio de 2009). *Perspectivas de la producción de biocombustibles en Colombia: contextos latinoamericano y mundial*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932009000100014
- Baettig, R., Yáñez, M., & Albornoz, M. (2010). Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte. *Redalyc*, 89-99.
- Bautista, E. P. (10 de Abril de 2013). *Alternativas Energéticas Internacionales: el caso del Etanol en Brasil*. Obtenido de La Crisis del Petróleo 1990: <http://132.248.9.195/ptd2013/abril/301062372/301062372.pdf>
- Boada, L. E., & Vargas, F. E. (2015). Atesta; Sierra. Caracterización Físico - Química de Pellets producidos a partir de mezclas 50/50 Carbón Bituminoso/Madera Residual. *Informador Técnico*, 18-25.
- Brennan, A., Purshouse, R. C., Meier, P. S., Taylor, K. B., & Rafia, R. (2010). Estimated effect of alcohol pricing policies on health and health economic outcomes in England: an epidemiological model. *The Lancet*, 1355-1364.
- BUN-CA. (10 de Diciembre de 2002). *Manuales sobre energía renovable: Biomasa*. Obtenido de <http://www.enersilva.org/libros/manual%20biomasa.pdf>
- Callejas, E. S., & Quesada, V. G. (2009). Los Biocombustibles. *El Cotidiano* núm. 157, 75-82.
- Castellano, J., Gómez, M., Fernández, M., Esteban, L., & Carrasco, J. (2015). Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. *ELSEVIER*, 629-636.
- Castaño Tostado, E. (2010). Planeación de un diseño experimental. En E. Castaño Tostado, & J. Domínguez Domínguez, *Diseño de Experimentos: Estrategias y Análisis en Ciencias y*

- Tecnología (Primera ed., págs. 1-20). Santiago de Querétaro, Querétaro de Arteaga, México: Editorial de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ).
- Cedron, J. C., Landa, V., Robles, J., & Sakiyama, D. (20 de Enero de 2017). *Cálculo de calor de reacción: Calorimetría*. Obtenido de Calorimetría: <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/144-calculo-de-calor-de-reaccion-calorimetria.html>
- Cedron, J. C., Landa, V., Robles, J., & Sakiyama, D. (20 de Enero de 2017). *Química General*. Obtenido de Calor Específico y Capacidad Calorífica: <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/131-calor-especifico-y-capacidad-calorifica.html>
- Cerdá, E. (20 de 05 de 2016). *Energía obtenida a partir de biomasa*. Obtenido de http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE_83_117-140__78E2E154C2BB213409D09C083013930C.pdf
- Cerquera, D., & Galindo, O. (2006). Estudio de la eficiencia energética del proceso de secado de arroz del Molino Roa S.A. *Universidad de Ibagué*, 17-35.
- CONACYT. (10 de Noviembre de 2015). *INSTALACION DE UNA PLANTA PILOTO EXPERIMENTAL PARA LA ESTANDARIZACION DE PELETS DE RASTROJO DE MAIZ PARA SU USO COMO COMBUSTIBLE*. Obtenido de <http://conacyt.gob.mx/index.php/resultados-extranjero/fichas/fichas-publicas-2015/11392-ficha-publica-220345/file>
- Crawford, N. C., Ray, A. E., Yancey, N. A., & Nagle, N. (2015). Evaluating the pelletization of “pure” and blended lignocellulosic biomass feedstocks. *ELSEVIER*, 46-56.
- Domínguez, J. D., Valadez, M. G., & Hernández, G. M. (2002). Una estrategia para optimizar el proceso de densificación mecánica de residuos agrícolas y agroindustriales. *Agrociencia*, 593-604.
- Donghui Lu, L. G. (2013). *Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders*. Canada: ELSEVIER.
- ECOticias.com. (20 de 12 de 2013). *Lo que debemos saber antes de cambiar de una caldera de gasoil a una de biomasa*. Obtenido de

- <http://www.ecoticias.com/biocombustibles/87059/noticia-medio-ambiente-debemos-cambiar-caldera-gasoil-biomasa>
- Esteban, L. S., & Fernández, M. J. (2012). Optimisation of pelletisation conditions for poplar energy crop. *ELSEVIER*, 7-15.
- Esteban, L., & Fernández, M. (10 de Diciembre de 2012). Optimisation of pelletisation conditions for poplar energy crop. *ELSEVIER*, 7-15.
- Expansión, C. (04 de Enero de 2014). *El alimento mas consumido del mundo*. Obtenido de <http://expansion.mx/especiales/2013/12/18/arroz-la-comida-mas-consumida-del-mundo>
- Fernandez, J. F. (20 de Enero de 2017). *Poder Calorífico*. Obtenido de Poder Calorífico Superior PCS y Poder Calorífico Inferior PCI: http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf
- Flóres, Á. M. (2009). Biocombustibles: ¿son realmente amigables con el medio ambiente? *Revista colombiana de Bioética*, 89-111.
- García-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for pellet quality. *ELSEVIER*, 3537-3540.
- Gilbert, P., Ryu, C., Sharifi, V., & Swithenbank, J. (2009). Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. *ELSEVIER*, 1491-1497.
- Govinda R. Timilsina, A. S. (2010). *Biofuels Markets, Targets and Impacts*. Washington DC: Policy Research Working Paper.
- Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2014). *Bioenergy and biofuels:History,status,andperspective*. New Jersey: ELSEVIER.
- Gutierrez, D. Q. (05 de 12 de 2010). *Alternativas Tecnológicas para el uso de la Cascarilla de Arroz como Combustible*. Obtenido de <http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/1327/1/TME00462.pdf>
- Hernández, H. E., Prada, J. O., Lesmes, H. J., Ruiz, M. C., & Ortega, M. D. (2010). Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. *División de Publicaciones*, 1-34.
- Hernández, L. A., Forero, P. A., & Alfonso, J. P. (2014). *Proyecto de Investigación: Produccion de Biogas a partir de residuos agricolas*. Obtenido de https://www.academia.edu/10345310/PROYECTO_DE_INVESTIGACION

_Producci%C3%B3n_de_Biog%C3%A1s_a_partir_de_residuos_agr%C3%ADcola
s_

- IDAE. (26 de Enero de 2012). *Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía*. Obtenido de Área Tecnológica: Biomasa y Residuos: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Calor_y_Frio_Renovables_Biomasa_11012012_global_v2_09570f12.pdf
- Ishii, K. (08 de Agosto de 2014). *Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets*. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X14003638?np=y>
- Karkania, V., Fanara, E., & Zabaniotou, A. (2012). Review of sustainable biomass pellets production – A study for agricultural residues pellets’ market in Greece. *ELSEVIER*, 1426-1436.
- Kumar, L., Koukoulas, A. A., Mani, S., & Satyavolu, J. (2016). Integrating Torrefaction in the Wood Pellet Industry: A Critical Review. *Energy & Fuels Just Accepted Manuscript*, DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b02803.
- Laiz-Saldaña, J. C., Tovar-Miranda, R., Durán-de-Bazúa, M. C., & Solís-Fuentes, J. A. (2009). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Producción de biodiesel por transesterificación. *Sistema de Información Científica*, 10.
- López, D. (10 de Julio de 2013). *Valorización de biomasa de origen vegetal mediante procesos térmicos y termoquímicos*. Obtenido de <https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/3393/TESIS%20L%C3%B3pez%20Gonz%C3%A1lez.pdf?sequence=1>
- López, J. H. (12 de Noviembre de 2008). *GEOPOLÍTICA DEL PETRÓLEO Y CRISIS MUNDIAL*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/496/49612071001.pdf>
- Lu, D., Tabil, L. G., Wang, D., Wang, G., & Emami, S. (2013). *Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders*. Canada: ELSEVIER.
- Lu, D., Tabil, L. G., Wang, D., Wang, G., & Emami, S. (2014). Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders. *ELSEVIER*, 287-296.
- Lydia Toscano Palomar, A. G. (2015). Determinación simplificada del contenido de lignina en paja de trigo por método volumétrico y su caracterización química. *Ciencia y Tecnología*, 113-124.

- Martinez, A. M., Ramirez, G. d., & Soto, J. A. (07 de 06 de 2012). *Material compuesto a base de cascarilla de arroz y aglutinante modificado con nanoestructuras de carbono*. Obtenido de <http://www.google.com/patents/WO2012074350A1?cl=es>
- McKendry, P. (2001). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 37-46.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 47-54.
- Melissari, B. (Mayo 2012). Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, 1-14.
- Miguel, G. S., & Gutiérrez, F. (2015). *Tecnologías para el uso y la Transformación de Biomasa en Energía*. Madrid (España): Ediciones Mundi-Prensa.
- Mingxin Guo, W. S. (2014). *Bioenergy and biofuels:History,status,andperspective*. New Jersey: ELSEVIER.
- Miranda, M., Arranz, J., Rojas, S., & Montero, I. (2009). Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest. *ELSEVIER*, 2106-2012.
- Moya-Roque, R., Rodríguez-Zúñiga, A., Tenorio, C., Valdez, J., & Valaert, J. (2015). Evaluación de la combustión de comprimidos cilíndricos fabricados con cultivos forestales y agrícolas en Costa Rica utilizando un quemador doméstico. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 33-42.
- Nogués, F. S., & Galindo, D. G. (2010). *Energía de la biomasa (Volumen 1)*. Zaragoza: Servicio de Publicaciones. Univesidad de Zaragoza.
- Núñez, C. A., Fajardo, C. A., & Vargas, F. E. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación . *ITECKNE*, 21-30.
- Observatorio Tecnológico de la Energía. (26 de 01 de 2012). *Área Tecnológica: Biomasa y Residuos*. Obtenido de Mapa Tecnológico: Calor y Frío Renovables: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Calor_y_Frio_Renovables_Biomasa_11012012_global_v2_09570f12.pdf
- Ortiz torres, I. t. (1995). *ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE*. España: Ayuntamiento de vigo.

- Patiño, D. P. (2008). SEGURIDAD ENERGÉTICA Y BIOCOMBUSTIBLE. Un acercamiento a sus implicaciones. *Prolegómenos*, 109-117.
- Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. (2004). *Biomass and Bioenergy*, 653-669.
- Purshouse, M. T. (2010). Estimated effect of alcohol pricing policies on health and health economic outcomes in England: an epidemiological model. *ScienceDirect*, 1355-1364.
- Purshouse, R. C., Meier, P. S., Brennan, A., Taylor, K. B., & Rafia, R. (2010). Estimated effect of alcohol pricing policies on health and health economic outcomes in England: an epidemiological model. *The Lancet. Lancet*, 1355-1364.
- Ramírez, I. E., Vela, N. A., & Rincón, J. J. (2012). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia Vol. 20, núm. 55*, 62-70.
- Robles-Gil, S. (01 de Agosto de 2001). *Información Climatológica para la Aplicación de la Energía de la Biomasa*. Obtenido de <http://uniciencia.ambientalex.info/infoCT/Infcliaplnebiomx.pdf>
- Ruíz, J. A. (2013). Análisis de la problemática e investigación de aspectos avanzados de la generación eléctrica con biomasa. *Tesis doctoral, Universidad de la Rioja, Logroño, La Rioja (España)*.
- Sáez, A., & Urdaneta, G. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 121-135.
- SAGARPA. (2014). *Produccion Agricola*. Obtenido de <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>
- Saval, S. (12 de Julio de 2012). *Aprovechamiento de residuos Agroindustriales: Pasado, presente y futuro*. Obtenido de http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2012_2/Saval_Residuosagroindustriales.pdf
- Secretaría de Energía. (21 de Mayo de 2008). *Energía de Biomasa*. Obtenido de Secretaría de Energía: http://www.inti.gob.ar/e-renova/erTO/pdf/libro_energia_biomasa.pdf
- Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., & Portero, H. (2010). *Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets*. Ciudad Real, España: ELSEVIER.

- Shan, M., Li, D., Jiang, Y., & Yang, X. (2016). Re-thinking china's densified biomass fuel policies: Large or small. *ELSEVIER*, 119-126.
- Steiner, R. (21 de Abril de 2006). *Utilización energética de residuos orgánicos en la industria bananera, cafetalera y azucarera en Costa Rica Considerando el Mecanismo de Desarrollo Limpio*. Obtenido de Trabajo de Tesis, Postgrado en Ingeniería Ambiental, Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Life Sciences.:
http://www.fiaes.org.sv/library/UTIL_ENERGET_RESIDUOS_ORGANICOS_CR.pdf
- Suárez, A. G., & Río, J. c. (2010). Composicion Quimica de Diversos Materiales Lignocelulósicos de Interés Industrial y Análisis Estructural de sus Ligninas. *Universidad de Sevilla*, 1-92.
- Tabarés, J. L. (2012). *Procesos Termoquímicos para la obtención de energía a partir de la Fitomasa Residual*. Obtenido de <https://procesosbio.wikispaces.com/file/view/PROCESOS+TERMOQU%C3%8DMICOS+PARA+OBTENCION+DE+BIOMASA.pdf>
- Tena, E. C. (2012). *cuaderno económico de ICE* . España: Ministerio de economía y competitividad.
- Tena, E. c., Gass, A. C., & Pol, P. O. (2008). *Bioenergía en la Unión Europea*. España: ekonomiaz.
- Tsuchiya, Y., & Yoshida, T. (2017). Pelletization of brown coal and rice bran in Indonesia: Characteristics of the mixture pellets including safety during transportation. *ELSEVIER*, 68-71.
- Tumuluru, J. S. (2014). *Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover*. USA: ELSEVIER.
- Valverde, A., Serria, B., & Monteagudo, J. (2007). ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ. *Universidad Tecnológica de Pereira*, 255-260.
- Velázquez, Á. G., Moreno, M. G., Ramírez, H. E., Páez, R. A., & Palomar, L. T. (2013). Madera plástica con paja de trigo y matriz polimérica. *Tecnología en Marcha*, 26-37.

- Weng Hui Liew, M. H. (2014). *REVIEW OF EVOLUTION, TECHNOLOGY AND SUSTAINABILITY ASSESSMENTS OF BIOFUEL PRODUCTION*. Selangor: Department of Chemical and Environmental Engineering.
- Yang Yu, Y. Y., Cheng, Z., Blanco, P. H., Liu, R., Bridgwater, A. V., & Ca, J. (2016). Pyrolysis of Rice Husk and Corn Stalk in Auger Reactor. 1. Characterization of Char and Gas at Various Temperatures. *American Chemical Society*, DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b02276.
- Zhijia Liu, X. L. (2013). *The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw*. China: ELSEVIER.

**ANEXO 1. ESTADO FÍSICO DE
LA CASCARILLA DE ARROZ Y
PAJA DE TRIGO CON
DIFERENTES HUMEDADES**



Figura A.1. Polvo de cascarilla de arroz con 17.5% de humedad

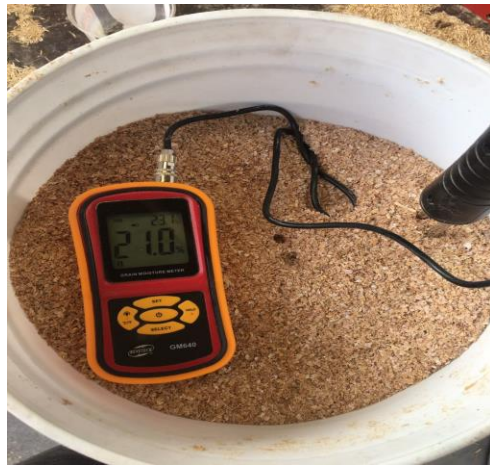


Figura A.2. Cascarilla de arroz con 21% de humedad



Figura A.3. Cascarilla de arroz con 23% de humedad



Figura A.4. Cascarilla de arroz con 27% de humedad

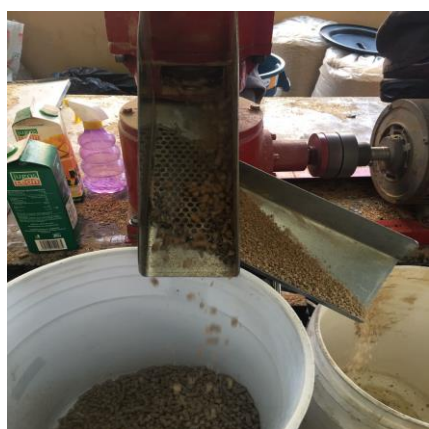


Figura A.5. Pellets de cascarilla de arroz



Figura A.6. Pellets elaborados con el mezclado de cascarilla de arroz y paja de trigo