

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Uso de cáscara de arroz y paja de frijol para la producción de biocombustibles sólidos

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería en Biosistemas

Presenta

Noemi Hernández Neri

Dirigido por:

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Co-Director:

Dr. Juan Fernando García Trejo

Querétaro, Qro. a 10 de junio de 2020



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería en Biosistemas

**Uso de cáscara de arroz y paja de frijol para la producción
de biocombustibles sólidos**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería en Biosistemas

Presenta:
Noemi Hernández Neri

Dirigido por:
Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Co-Director:
Dr. Juan Fernando García Trejo

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio
Presidente

Dr. Juan Fernando García Trejo
Secretario

Dr. Julio Armando De Lira Flores
Vocal

Dra. Ana Angélica Feregrino Pérez
Suplente

Dr. Efraín Quiroz Pérez
Suplente

Centro Universitario Querétaro, Qro.
Junio de 2020
México

Agradecimientos

Mi agradecimiento a la Universidad Autónoma de Querétaro, institución que me brindó la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría. Agradezco también las enseñanzas brindadas de cada uno de los profesores a lo largo de estos dos años, y en especial a la Dra. Claudia por su dirección, paciencia, entrega, además de ser un modelo a seguir en el ámbito profesional y humano.

A los miembros de mi Comité Tutorial quienes siempre mostraron disposición para apoyarme y dar seguimiento al trabajo de tesis, gracias por formar parte de este sueño.

Agradezco el apoyo económico brindado por el Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través del proyecto 279753.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. ANTECEDENTES.....	16
2.1 Generalidades.....	16
2.2 Proceso de pelletizado.....	17
2.2.1 Pretratamiento.....	18
2.2.1.1 Reducción de tamaño.....	18
2.2.1.2 Secado.....	19
2.2.2 Densificación mecánica.....	19
2.3 Residuos agroindustriales.....	20
2.4 Cáscara de arroz.....	20
2.5 Paja de frijol.....	21
2.6 Estudios previos.....	21
2.7 Parámetros relevantes.....	26
2.7.1 Humedad.....	26
2.7.2 Poder calorífico.....	27
2.7.3 Cenizas.....	27
2.7.4 Compuestos volátiles y contenido de carbono.....	28
2.7.5 Contenido de nitrógeno.....	28
2.8 Gasificación.....	28
3. HIPÓTESIS.....	30
4. OBJETIVOS.....	30
4.1 Objetivo general.....	30
4.2 Objetivos particulares.....	30
5. METODOLOGÍA.....	31
5.1 Materiales.....	31
5.2 Equipos.....	31

5.3	Métodos.....	32
5.3.1	Recolección de biomasas.....	32
5.3.2	Descripción de laboratorio.....	32
5.3.3	Equipo de seguridad.....	32
5.3.4	Molienda de biomasa.....	33
5.3.5	Caracterización de las biomasas y pellets.....	33
5.3.6	Determinación de humedad inicial.....	34
5.3.7	Contenido de compuestos volátiles.....	36
5.3.8	Contenido total de carbono.....	37
5.3.9	Contenido total de nitrógeno.....	37
5.3.10	Contenido proximal de cenizas.....	38
5.3.11	Poder calorífico.....	38
5.3.12	Dimensiones.....	40
5.3.13	Durabilidad mecánica.....	41
5.3.14	Densidad unitaria.....	41
5.3.15	Densidad granel.....	41
5.4	Diseño experimental.....	42
5.5	Elaboración de pellets.....	42
5.6	Diseño de experimentos.....	45
5.7	Simulación del proceso de gasificación.....	46
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
6.1	Caracterización inicial de la materia prima.....	49
6.2.	Pellets obtenidos en los diferentes tratamientos.....	52
6.3	Caracterización de pellets.....	55
6.4	Análisis comparativo con estándar de calidad.....	59
6.4.1	Análisis de pellets en función de humedad.....	59
6.4.2	Análisis de pellets en función de volátiles.....	61
6.4.3	Análisis de pellets en función de cenizas.....	63
6.4.4	Análisis de pellets en función de carbono total.....	64

6.4.5 Análisis de pellets en función de nitrógeno.....	65
6.4.6 Análisis de pellets en función de poder calorífico.....	66
6.4.7 Análisis de pellets en función de diámetro	67
6.4.8 Análisis de pellets en función de longitud.....	68
6.4.9 Análisis de pellets en función de densidad unitaria.....	69
6.4.10 Análisis de pellets en función de densidad a granel.....	70
6.4.11 Análisis de pellets en función de durabilidad.....	71
6.5 Determinación de las proporciones de mezcla para cumplir con estándares de acuerdo a la norma.....	72
6.6 Simulación del proceso de gasificación de la biomasa en estudio.....	73
7. CONCLUSIONES.....	76
8. REFERENCIAS.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales residuos agroindustriales para la producción de biocombustibles sólidos.....	22
Tabla 2. Métodos para caracterización de residuos.....	34
Tabla 3. Tratamientos aleatorizados.....	46
Tabla 4. Resultados de la caracterización de cascarilla de arroz y paja de frijol.....	49
Tabla 5. Caracterización proximal, elemental y energética de pellets de cáscara de arroz y paja de frijol con humedad inicial de 10%.....	55
Tabla 6. Caracterización proximal, elemental y energética de pellets de cáscara de arroz y paja de frijol con humedad inicial de 15%.....	56
Tabla 7. Caracterización proximal, elemental y energética de pellets de cáscara de arroz y paja de frijol con humedad inicial de 20%.....	57
Tabla 8. Resultados obtenidos en el reactor YIELD.....	73
Tabla 9. La composición molar de syngas y LHV para pellets de cáscara de arroz y paja de frijol utilizando el modelo ASPEN Plus.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de proceso de pelletizado.....	18
Figura 2. Muestra de la biomasa de estudio.....	32
Figura 3. Biomosas molidas.....	33
Figura 4. Estufa.....	35
Figura 5. Mufla.....	36
Figura 6. Prensa manual.....	39
Figura 7. Pastilla formada por prensa manual.....	39
Figura 8. Calorímetro.....	40
Figura 9. Vernier.....	40
Figura 10. Higrómetro.....	43
Figura 11. Biomosas molidas a distintas humedades.....	43
Figura 12. Pelletizadora de rodillo y matriz de 8 mm.	44
Figura 13. Pellets obtenidos para su análisis.....	45
Figura 14. Proceso de gasificación.....	47
Figura 15. Esquema Aspen Plus para el proceso de gasificación en lecho fijo....	48
Figura 16. Tratamiento H3P3.....	52
Figura 17. Tratamiento H3P2.....	52
Figura 18. Tratamiento H3P1.....	52
Figura 19. Tratamiento H2P3.....	53
Figura 20. Tratamiento H2P2.....	53
Figura 21. Tratamiento H2P1.....	53
Figura 22. Tratamiento H1P3.....	54
Figura 23. Tratamiento H1P2.....	54
Figura 24. Tratamiento H1P1.....	54
Figura 25. Análisis estadístico en relación a la humedad final de pellets.....	60
Figura 26. Análisis estadístico en relación al porcentaje de volátiles de pellets....	62
Figura 27. Análisis estadístico en relación al porcentaje de cenizas de pellets.....	63
Figura 28. Análisis estadístico en relación al carbono total en pellets.....	64

Figura 29. Análisis estadístico en relación al porcentaje de nitrógeno en pellets...	65
Figura 30. Análisis estadístico en relación al poder calorífico en pellets.....	66
Figura 31. Análisis estadístico en relación al diámetro en pellets.....	67
Figura 32. Análisis estadístico en relación a la longitud en pellets.....	68
Figura 33. Análisis estadístico en relación a la densidad unitaria en pellets.....	69
Figura 34. Análisis estadístico en relación a la densidad a granel en pellets.....	70
Figura 35. Análisis estadístico en relación a durabilidad en pellets.....	71
Figura 36. Diseño de superficie de respuesta.....	72

Dirección General de Bibliotecas UAG

RESUMEN

A nivel mundial la producción de desechos agroindustriales es muy abundante, lo cual representa un serio problema ambiental. Por ello, los residuos han sido estudiados desde diferentes aristas con el objetivo de aprovecharlos como materias primas para generar productos de valor agregado. Dentro de estas aristas se encuentran los biocombustibles, necesarios para la transición energética que posibilite el desarrollo sustentable. De manera particular, en México los residuos agroindustriales derivados del cultivo del arroz y del frijol son poco utilizados para generar productos de valor agregado. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo de investigación es la producción de pellets combustibles a partir de cáscara de arroz y paja de frijol; para ello se determina la proporción de las biomásas y el porcentaje de humedad que permita obtener pellets que cumplan con los estándares de calidad de la norma ISO-17225-6. La densificación se realizó utilizando niveles de humedad inicial de 10.0 %, 15.0 % y 20.0 %, y proporciones de mezcla de 75:25, 50:50 y 25:75 de las biomásas de estudio. Los resultados obtenidos muestran que las mejores condiciones fueron el empleo de 15.0% de humedad inicial y una mezcla de biomasa con 90% paja de frijol y 10% cáscara de arroz; con dichas variables se obtuvieron pellets con un poder calorífico de 3414.59 kcal/kg, 9.50% de cenizas en peso seco, una humedad final de 9.69%, una densidad a granel de 613.89 kg/m³, durabilidad de 99.81%. Los parámetros físicos evaluados cumplieron los estándares de la norma. El porcentaje de material volátil y carbono son similares a los reportados para otras biomásas de estudio.

Palabras claves: pellets combustibles, biomasa, residuos, cáscara de arroz, paja de frijol.

ABSTRACT

Globally, the production of agro-industrial wastes is abundant, which represents a serious environmental problem. Therefore, agroindustrial wastes have been studied from different angles to use them as raw materials to generate other products. In the search for alternatives, biofuels emerge as a promissory option for the energy transition that enables sustainable development. Mainly, in Mexico, agroindustrial residues derived from rice and beans are rarely used to generate other products that could be commercialized. Therefore, the objective of this research is to determine the proportion of biomass and the percentage of humidity that allows obtaining fuel pellets that meet the quality standards of ISO-17225-6. Densification was performed using initial humidity levels of 10.0%, 15.0% and 20.0%, and mixing ratios of 75:25, 50:50 and 25:75 of the study biomasses. The results obtained showed that the best conditions were the use of 15.0% of initial humidity and a mixture of biomass with 90% bean straw, and 10% rice husk; with these variables fuel pellets with a calorific value of 3,414.59 kcal/kg, 9.50% of ashes, a final humidity of 9.69%, a bulk density of 613.89 kg/m³, durability of 99.81% were obtained. The physical parameters met the standards of the standard. Volatile material and carbon are similar to those reported for other study biomass

Keywords: fuel pellets, biomass, waste, rice husk, bean straw.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el mundo está enfrentando el agotamiento progresivo de sus recursos energéticos, los cuales son mayoritariamente combustibles no renovables. Al mismo tiempo, la demanda mundial de energía aumenta a ritmo cada vez más creciente, ocasionando con ello, la dependencia energética y económica de los países productores de petróleo (IEA, 2010; IPCC, 2011). Con las tasas de consumo actuales, el suministro de petróleo, gas natural y carbón solo podrá durar otros 45, 60 y 120 años, respectivamente (IEA, 2013). Además, se han liberado enormes cantidades de gases de efecto invernadero del consumo de combustibles fósiles; dicho uso ha elevado la concentración atmosférica de CO₂ desde el nivel preindustrial de 280 ppm a las actuales de casi 400 ppm, y ha causado desastrosos efectos en los patrones climáticos (IPCC, 2013). Actualmente, se han propuesto diversas estrategias para reducir las emisiones de CO₂, las cuales incluyen el uso de las energías renovables, dentro de las que se encuentran los biocombustibles (Saidur et al., 2011). Los biocombustibles, representan un tipo de bioenergía, se definen como combustibles producidos mediante la transformación de la biomasa (Islas y Martínez, 2010). Los biocombustibles son una alternativa para el desarrollo sustentable de los sectores económicos, mientras se coadyuva a resolver el problema del cambio climático. Los biocombustibles también pueden crear empleos adicionales y mejorar la seguridad energética de los países que importan petróleo y gas. Los biocombustibles pueden producirse en estado líquido, gaseoso o sólido. En particular, los biocombustibles sólidos tienen un elevado potencial para atender los requerimientos energéticos asociados al crecimiento poblacional, ya que su uso permitirá reemplazar a los combustibles fósiles en la producción de energía eléctrica y calorífica. Los residuos agroindustriales pueden emplearse como materia prima para la producción de biocombustibles sólidos; los cuales representan una alternativa para solucionar el problema de contaminación asociado a dichos residuos (García y Masera, 2016). Los residuos agroindustriales son generados en grandes cantidades, millones de toneladas, alrededor del mundo y representan una abundante fuente de biomasa lignocelulósica. Sin embargo, solamente una

pequeña cantidad de estos residuos es empleado como alimento animal y combustible para hogares, una mayor porción es quemada en los campos creando un problema de contaminación ambiental, así como pérdidas de fuentes potenciales de productos de alto valor agregado (Arias y Meneses, 2016).

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 olotes, bagazo de maguey o agave, así como pulpa de café (Saval, 2012). Cabe añadir que, los productos residuales de la industria forestal no tienen una aplicación por la falta de propuestas tecnológicas para un aprovechamiento industrial (Paucar et al., 2008). De manera particular, se producen cerca de 258.40 miles de toneladas de arroz en México. La cáscara constituye aproximadamente 20% en peso del grano (SAGARPA, 2018), y es un residuo agroindustrial cuya generación va en aumento, dado que la demanda de arroz continúa en ascenso. 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 y para la producción de compostaje, principalmente. Por otro lado, la producción del cultivo de frijol asciende a 1,134.65 miles de toneladas; se estima que en 2006 se generaron 1.75 millones de toneladas de residuos en México, dado que el frijol ocupa la segunda mayor cantidad de tierra cultivada en el país. La gran mayoría de la paja generada por cosecha queda sin reusarse, y por tanto es incinerada a campo abierto, causando serios daños ambientales (Valdez-Vazquez et al., 2010). En la actualidad, la generación de dichos residuos agroindustriales va en aumento junto con la demanda de las cosechas, generando material biomásico lignocelulósico que puede convertirse en

materia prima potencial para la producción de biocombustibles. Es entonces de gran interés buscar alternativas de uso, como lo es la producción de biocombustibles sólidos y aumentar la rentabilidad del proceso global.

Ahora bien, tanto la cascarilla de arroz como la paja de frijol no se utilizan como fuente de energía porque tienen características energéticas deficientes (baja densidad, bajo valor de calentamiento y alto contenido de humedad); dichas características ocasionan costos elevados durante el transporte, la manipulación y el almacenamiento. Algunos de estos inconvenientes podrían superarse si se aplicaran procesos de conversión para mejorar las propiedades físicas y químicas de los residuos de biomasa; por ejemplo, podrían densificarse en pellets para proporcionar más energía por unidad de volumen, para mejorar el transporte y el almacenamiento (Felfli et al., 2005).

Los pellets han recibido cada vez más atención internacional debido a su potencial como fuentes de energía limpias y renovables, especialmente cuando se producen a partir de residuos agrícolas y forestales con un potencial energético elevado (Tauro et al., 2016). Sin embargo, el conocimiento de pellets de biomasa es escaso en México. Los pellets son los biocombustibles sólidos más populares, ya que tienen la ventaja de aprovechar residuos de la madera y pajas de otras plantas. Los pellets pueden producirse mediante extrusión mecánica, pelletizado, obteniendo biocombustibles de baja humedad, alta densidad y uniformidad; los pellets se pueden utilizar en diferentes aplicaciones, incluyendo cocinas domésticas, calderas y centrales eléctricas (Castellano et al., 2015). Cuando la biomasa es densificada en un pellet mejora su valor calorífico por unidad de volumen, lo que facilita su almacenamiento y manejo en distribución (Kusumaningrum y Sofyan-Munawar, 2014); además, la producción de pellets puede tener ventajas como la creación de empleos y mitigación de emisiones de CO₂ (Nishiguchi y Tabata, 2016). Los biocombustibles son una alternativa para la utilización de biomasa, ya que aprovechan la energía almacenada en ella; dado que el CO₂ generado durante su

combustión pertenece al ciclo del carbono natural, sin exceder su concentración en la atmósfera ya que las plantas lo aprovechan durante la fotosíntesis.

Los factores que influyen en el poder calorífico de los biocombustibles sólidos incluyen la humedad, presión, temperatura, así como la cantidad de aglutinante. Debido a que, en ocasiones, los parámetros de presión y temperatura no pueden ser controlados, el estudio de humedad resulta de vital importancia. A su vez el tipo de biomasa determina el potencial para ser utilizado como combustible, por lo que se estudiarán estos dos factores para conocer su efecto en propiedades físicas, químicas y energéticas finales. Debido a ello, la producción de pellets de biocombustibles a partir de cáscara de arroz y paja de frijol es el objetivo de la presente investigación, en la que se determinó la proporción de las biomásas, así como la humedad que permita obtener pellets que cumplan con los estándares de calidad de la norma ISO-17225-6.

2. ANTECEDENTES

2.1 Generalidades

El incremento del precio del petróleo, la naturaleza finita de los combustibles fósiles y la preocupación con respecto al impacto ambiental, especialmente sobre la emisión de gases de efecto invernadero, han establecido la necesidad de buscar nuevas fuentes energéticas (Balat y Balat 2010). La bioenergía es la energía derivada de la biomasa, es decir materia orgánica que se encuentra disponible en una base renovable o recurrente, como las plantas o incluso sus desechos metabólicos (Garrido, 2009). Los biocombustibles se refieren a la biomasa de las plantas y los productos refinados a ser quemados para obtener energía (calor y luz), se clasifican en tres generaciones con base en la biomasa empleada: los de primera generación son aquellos que derivan de una fuente de alimento; los de segunda generación provienen de biomasa no alimentaria, e incluye tanto cultivos como residuos de actividades agrícolas, forestales, ganaderas, agroindustriales y urbanas. Finalmente, los biocombustibles de tercera generación son aquellos derivados de especies no comestibles como las microalgas (Scharlemann, 2008).

Al igual que los combustibles fósiles, los biocombustibles existen en formas sólidas, líquidas y gaseosas (Guo et al., 2015). En particular, los biocombustibles sólidos son aquellos productos derivados de la biomasa sólida, que son susceptibles de utilización directa en los procesos de conversión energética; y que se obtienen mediante transformaciones basadas en compactación, astillado o trituración (Callejas y Quezada, 2009). Las formas más generalizadas de utilización de este tipo de combustibles son astillas, aserrín, pellets y briquetas; los dos últimos suponen un proceso de densificación del material molido previamente. La densificación es un proceso que incrementa la densidad de la biomasa para generar biocombustibles sólidos a través de la aplicación de presión para lograr unir la materia prima; este proceso se puede realizar mediante una pelletizadora, cuyo

fundamento operativo se basa en la presión ejercida por una serie de rodillos sobre los residuos. La compactación se consigue de manera natural o mediante la adición de elementos químicos que no contengan contaminantes durante la combustión (Tojes, 2015). Los pellets se encuentran entre los biocombustibles sólidos procesados más comunes; los pellets son utilizados en todo el mundo, principalmente para calefacción doméstica en pequeñas calderas de biomasa, mientras que en el sector industrial se emplean primordialmente en sistemas combinados de calefacción y energía y calefacción urbana. Los pellets son biocombustibles densificados, elaborados principalmente a partir de aserrín; en la actualidad, se está expandiendo el uso de residuos agroindustriales como materia prima. La elaboración incluye los siguientes procesos: secado, reducción de tamaño y densificado (Bustamante y Cerutti, 2017). Los pellets son cilindros con dimensiones que van de 6 a 8 mm de diámetro y de 25 a 60 mm de longitud; los pellets se obtienen mediante el prensado de diversos materiales tales como aserrín, cascarillas, pajas, entre otras. Los pellets de biomasa residual se producen a partir de un producto de humedad comprendida entre el 8 y 15% (Ortíz, 2008). El peso específico del pellet a granel es de aproximadamente 600 kg/m^3 , mucho más alto que el de otros combustibles no prensados de madera (astillas); el poder calorífico se sitúa entre 4,200 y 4,500 kcal/kg, con una densidad energética de $3,000 - 3,400 \text{ kWh/m}^3$ (Rojas, 2004). Los pellets han recibido cada vez más atención internacional debido a su potencial como fuentes de energía limpias y renovables, especialmente cuando se producen a partir de residuos agrícolas y forestales.

2.2 Proceso de pelletizado

La pelletización es el proceso de transformación de biomasa en pellets con alta densidad energética, bajo contenido de humedad y homogeneidad en forma y tamaño (Hakeem et al., 2015). El proceso consiste en presionar con rodillos la materia prima que se coloca sobre una matriz de acero con orificios variables. La materia prima comprimida atraviesa la matriz con un diámetro característico, y un dispositivo corta los cilindros con la longitud deseada. Las prensas pueden tener

una matriz plana o anular, pero en ambos casos permanecen fijas mientras los rodillos giran (Tumuluru et al., 2011). La pelletización depende de la humedad de la materia prima, su tamaño de partícula, densidad, fuerza de la fibra, características lubricantes y adhesivos naturales de la biomasa (Hakeem et al., 2015). El proceso para la obtención de pellets se muestra en la Figura 1, y se describe a continuación.

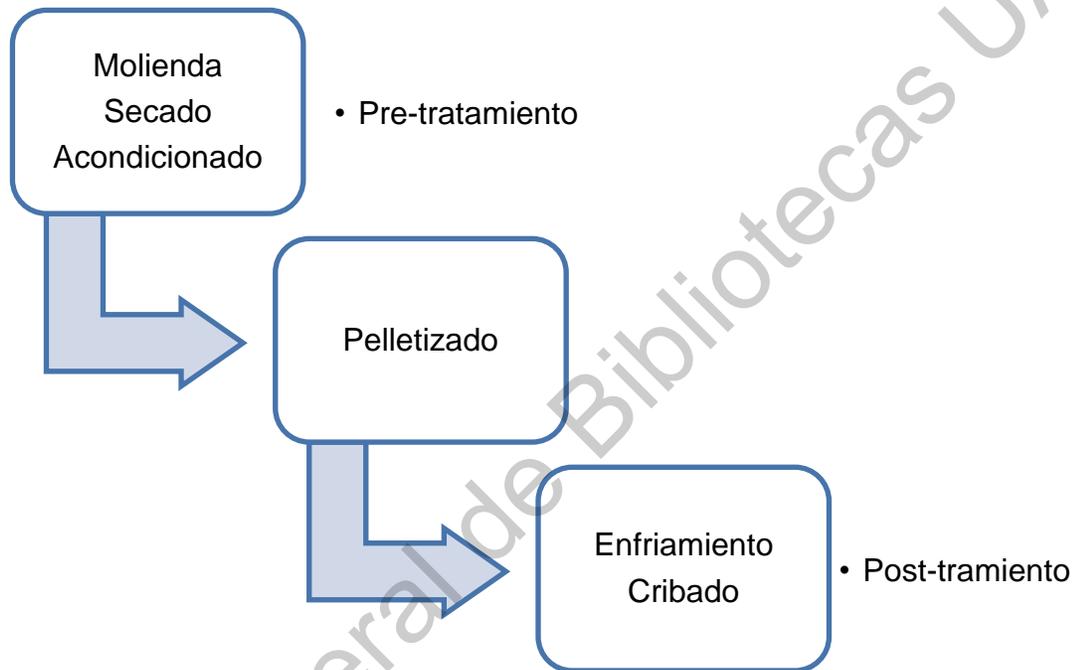


Figura 1. Diagrama de proceso de pelletizado

2.2.1 Pretratamiento

El pretratamiento de la biomasa es una etapa que se puede requerir para facilitar la densificación, y mejorar las propiedades físicas y químicas de la biomasa; ambas acciones (pretratar y densificar), ayudan a reducir el costo de su transporte, manejo y almacenamiento (INL, 2010). Las principales etapas de pretratamiento de biomasa incluyen la reducción de tamaño, secado y adición de agentes aglutinantes.

2.2.1.1 Reducción de tamaño

La molienda consiste en reducir las partículas de la biomasa a un cierto tamaño, rompiendo las fibras, incrementando el área específica del material y mejorando su cohesión (INL, 2010). Los procesos de densificación requieren una molienda o corte de longitud específicos para lograr un menor uso energético durante la densificación, obtener productos más densos y disminuir el quiebre en los productos finales (Clarke y Preto, 2011). El tamaño de las partículas influye las características de cohesión y propiedades mecánicas de los productos finales como las briquetas y pellets. Por ejemplo, una molienda en polvos finos ofrece la ventaja de una mayor cantidad de puntos de contacto, mayor área superficial expuesta y mayor área energética por unidad de masa del material (INL, 2010). Al proceso de reducción de tamaño puede incluirse el tamizado, en el cual se clasifica el residuo por tamaño de partícula para la eliminación de fracciones indeseables (Cancho, 2016).

2.2.1.2 Secado

Los sistemas de conversión de biomasa en energía requieren que la biomasa posea un bajo porcentaje de humedad; es por esto que generalmente los residuos agroindustriales son sometidos a pretratamientos, como lo son el secado de la biomasa. La cantidad de humedad aceptada en la biomasa depende del tipo de tecnología de conversión; por ejemplo, en el caso de la obtención de pellets es necesario que el contenido de humedad de los residuos agroindustriales o lignocelulósicos sea reducido a una cantidad de 10 a 15% aproximadamente (Rojas y Jumo, 2017).

2.2.2 Densificación mecánica

La densificación mecánica es el proceso de aplicación de presión a la biomasa de estudio para incrementar la densidad aparente de un biocombustible sólido (Clarke y Preto, 2011; Hakeem et al., 2014), así como mejorar las características de almacenamiento, logística y transporte de la biomasa (Shibu y Thallada, 2015).

Algunas ventajas de densificar la biomasa para su combustión son la simplificación de su manejo y alimentación mecánica, combustión uniforme en calderas y reducción de la producción de polvo y combustión espontánea durante el almacenamiento (Clarke y Preto, 2011).

2.3 Residuos agroindustriales

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). En México, se producen grandes cantidades de residuos provenientes de diferentes cultivos que corresponden a: residuos primarios, es decir 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; residuos secundarios obtenidos del procesamiento postcosecha, entre los que están bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olotes, bagazo de maguey o agave, cáscara de arroz así como pulpa de café. Como consecuencia de la actividad agrícola, se genera una gran cantidad de residuos algunos de los cuales son eliminados generalmente por medio del fuego en la misma parcela o dando uso de poco valor agregado.

2.3.1 Cáscara de arroz

La cáscara de arroz es un residuo agroindustrial que constituye aproximadamente el 20% de la producción mundial de arroz. La cáscara de arroz es el principal subproducto generado por la industria de la molienda del arroz (Jain y Goss, 2000);

ésta está constituida principalmente por celulosa y sílice, elementos que son muy importantes en la producción de combustibles, ya que posibilitan el incremento en el rendimiento del producto final. La densidad de la cáscara de arroz es baja, por lo cual al apilarse ocupa grandes espacios. El peso específico es de 125 kg/m³, es decir, una tonelada ocupa un espacio de 8 m³ a granel (Varón 2005). Por otra parte, la cáscara de arroz tiene un bajo contenido de humedad que satisface el valor calorífico (Bahillo et al., 2002).

2.3.2 Paja de frijol

La paja de frijol está constituida por residuos de tallo, hoja y vaina que se generan después de su cosecha. Los residuos agrícolas como la paja constituyen una biomasa orgánica con alto contenido de carbono (Dinuccio, 2010), por ello, la paja de frijol es un material lignocelulósico con potencial para ser usado como materia prima para la producción de combustible. En México se producen más de un millón de toneladas de frijol anuales; en consecuencia, es inevitable la generación de residuos, por lo que se tiene una gran cantidad de materia prima para la producción de pellets. No obstante, para poder emplear estos residuos es indispensable conocer sus características fisicoquímicas, así como su composición.

2.4 Estudios previos

En la literatura se ha reportado el uso de diversas materias primas para la producción de combustibles. A continuación, se presenta la revisión del estado del arte.

Respecto de la pelletización de la biomasa para la producción de biocombustibles, se han realizado estudios sobre los efectos de la composición de las materias primas, así como las condiciones de pelletización en la calidad y propiedades de los pellets obtenidos a partir de diferentes tipos de biomasa leñosa y no leñosa (Berastegui, 2017). También se han realizado investigaciones sobre la pelletización de los cultivos herbáceos; también, otros tipos de residuos han sido investigados

como la paja de trigo combinados con residuos de madera y aglutinantes, e inclusive se ha estudiado el uso de rastrojo de maíz de alta humedad. Cabe añadir que los residuos forestales también han sido foco de investigación con el objetivo de lograr su densificación (Holubčík, 2015). Todo el interés que ha despertado el desarrollo 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, como se evidencia en el trabajo de Duarte et al., (2016) en la densificación de la paja de arroz. 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 (Shan et al., 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 pellets.

En la Tabla 1 se muestran los trabajos reportados de los principales residuos agroindustriales para la producción de biocombustibles sólidos.

Tabla 1. Principales residuos agroindustriales para la producción de biocombustibles sólidos

MATERIA PRIMA	RESULTADOS OBTENIDOS	REFERENCIA
Carbón pardo y salvado de arroz	El valor calorífico de los pellets mixtos con 50% de carbón y 50% de salvado de arroz alcanzó 15 MJ/kg, y su dureza fue 98%.	Tsuchiya y Yoshida, 2017.

Paja de arroz	La calidad de pellet más alta, con una durabilidad del 99.31%, se obtuvo con condiciones operativas de 2% de relación de almidón y 17% de contenido de humedad de alimentación.	Said et al., 2015.
Especie forestal (Quercus ilex)	Presentó un poder calorífico con 17.0 MJ/kg y un porcentaje de cenizas de 1.8%.	Fernández et al., 2014.
Tres especies frutales Citrus sinensis (naranja), Olea europea(olivo) Prunus amygdalus (almendro).	Las muestras de biomasa de olivos y almendros poseen un poder calorífico de 16.5 MJ/kg; para la biomasa de naranjos se reportó un valor de 15.4 MJ/kg. En cuanto al porcentaje de cenizas proveniente de los naranjos presentó mayor porcentaje de cenizas, 2.8%, con respecto al que se determinó para la biomasa de olivos y almendros, 2.4% y 1.0% respectivamente.	Fernández et al., 2014.
Residuos lignocelulósicos de café, frente a leña de espino y eucalipto	La cáscara de café posee un poder calorífico que supera ampliamente a la leña convencional. La densificación eleva el poder calorífico a 4,162.31 kcal/kg, y si se tritura el material se alcanzan 4,319.98 kcal/kg; si estos resultados se comparan con los de la leña de eucalipto (2,173.90 kcal/kg) y de espino 2,236.24 kcal/kg existe una diferencia altamente significativa.	Aguas et al., 2016.
Aserrín residual de la madera de las especies Pilón (Hyeronima alchorneoides) y Eucalipto (Eucalytus spp)	El poder calorífico tuvo valores entre los 18,907 kJ/kg y 18,960 kJ/kg, y se determinó un contenido de cenizas del 1.31% en base seca. Finalmente, se determinó que el contenido de nitrógeno, cloro y azufre, presente en la biomasa residual empleada, corresponde a un	Casanova, 2017.

	0.1129%, 0.0592% y 0.0317%, respectivamente.	
Mezcla de pulpa de papa (15, 20 y 25%) con cáscaras de trigo	Los resultados mostraron que aumentar el contenido de pulpa en una mezcla de trigo sarraceno, del 15 al 25%, e incrementar la tasa de flujo másico del flujo de la mezcla, de 50 a 100 kg/h, causó una reducción de la densidad y la durabilidad cinética de los pellets obtenidos; también se observó un aumento significativo de la actividad del agua y el contenido de humedad de los gránulos. Por otra parte, aumentar el contenido de pulpa en la mezcla de 0 a 25% causó una ligera reducción del poder calorífico de 19.44 a 19.09 MJ/kg.	Obidziński, 2014.
Bambú	El valor calorífico bruto de los pellets de bambú también cumplió con el requisito mínimo para fabricar pellets comerciales de acuerdo con DIN 51731 (> 17,500 J/g).	Liu et al., 2014.
Residuos de Jatropha curcas	El contenido de humedad fue de 1.43%, 66.6% de compuestos volátiles, 4.6% de ceniza, y un valor de calentamiento de 17.2 MJ/kg.	Pambudi et al., 2010.
Residuos de la industria de la madera colombiana, cáscaras de coco y cáscaras de aceite de palma	Los pellets elaborados de madera tienen una densidad de 850 kg/m ³ , 12.14% de contenido de humedad, bajo contenido de ceniza con 1.24% y un valor de calentamiento alrededor de 18,497 kJ/kg. Los pellets elaborados de cáscara de coco tienen una densidad de 902.9 kg/m ³ , 12.01% de contenido de humedad, contenido de ceniza de 1.40%, y un valor de calentamiento alrededor de 18,740 kJ/kg. Los pellets elaborados de	Forero et al., 2012.

		cáscara de aceite de palma tienen una densidad de 1023 kg/m ³ , 7.92% de contenido de humedad, contenido de ceniza de 2.68%, y un valor de calentamiento alrededor de 18,561 kJ/kg.	
Mezclas de biomasa lignocelulósicas: residuos de madera y carbón	de	Los resultados obtenidos fueron densidad de 999.33 kg/m ³ , contenido de agua de 10.28%, contenido de ceniza de 2.9%, y un poder calorífico de 24.2 MJ/kg.	Boada y Vargas, 2015.
Residuos lignocelulósicos de café, frente a leña de espino y eucalipto		La densificación logra elevar el poder calorífico a 4,162.31 kcal/kg, y si se mejora su densidad triturando el material se alcanzan 4,319.98 kcal/kg; si estos resultados se comparan con los de la leña de eucalipto (2,173.90 kcal/kg) y de espino 2,236.24 kcal/kg existe una diferencia altamente significativa.	Mera y Villarreal, 2016.
Corteza de pino		El análisis inmediato mostró 11.83% de carbono fijo, 5.13% de cenizas y un poder calorífico de 4,623.85 kcal/kg.	Vesterinen, 2015.

De manera específica, se encuentra reportado que el uso de la cascarilla de arroz presenta condiciones favorables para ser utilizada como combustible sólido en pellets; lo anterior, debido a que este residuo agroindustrial presenta un poder calorífico de 3650 kcal/kg, 39.85% de contenido de carbono, 6.09% de contenido de hidrógeno y 6.41% de humedad (Quiceno y Mosquera 2010). En 2020, se reportó el estudio de pellets a partir de cascarilla de arroz y mezclas de cascarilla de arroz con paja de trigo. Los resultados muestran que los pellets de cáscara de arroz exhibieron menor valor calorífico (3090.64–4049.05 kcal/kg) y mayor contenido de cenizas (12.81–17.51%); lo anterior en comparación a los pellets obtenidos de la mezcla, los cuales obtuvieron un poder calorífico de 4301.10–4573.50 kcal/kg y

11.43–13.06% en el contenido de cenizas (Ríos-Badrán et al., 2020). Por otra parte, recientemente se presentó la pelletización de los residuos del cultivo de frijol en condiciones de humedad inicial de 20.0% y tamaño de partícula de 8.00 mm. Se obtuvieron pellets con poder calorífico de 16.097 MJ/kg (3847.27 kcal/kg) y un contenido de cenizas de 5.3185% (Trejo Zamudio, 2019). Sin embargo, el uso de mezclas de cascarilla de arroz y paja de frijol no se han reportado en la literatura, como se observa en la Tabla 1.

2.7 Parámetros relevantes

La búsqueda de oportunidades de aplicación para los residuos requiere del conocimiento de su composición química y sus propiedades para su máximo aprovechamiento. Las propiedades bioquímicas y fisicoquímicas del residuo biomásico determinan la selección del tipo de aprovechamiento energético; es decir, el aprovechamiento de la biomasa seca depende de factores como el contenido de humedad, el poder calorífico, la concentración de carbono fijo y de volátiles, el contenido de cenizas, entre otros (Barragán, 2015).

2.7.1 Humedad

El contenido de humedad hace referencia a la cantidad de humedad inicial de la materia prima empleada; ésta es considerada una variable de vital importancia, ya que puede beneficiar o perjudicar tanto a la durabilidad del pellet como el poder calorífico final. La humedad ha resultado, en algunos casos, un serio factor de control; se ha encontrado para algunas materias primas que la humedad alta puede provocar baja densidad, y por consecuencia requerir mayor presión para la formación del pellet (Poddar et al., 2014). El alto contenido de humedad que se encuentra típicamente en los combustibles de biomasa puede causar problemas de combustión, influir en el comportamiento de pirólisis de la biomasa (el primer paso de los procesos de gasificación y combustión), y afectar las propiedades físicas y la calidad de los productos (Demirbas, 2004).

2.7.2 Poder calorífico

El contenido calórico por unidad de masa determina la energía disponible en la biomasa. El contenido calórico está directamente relacionado con el contenido en 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 (Demirbas, 2004). El método para determinar el poder calorífico se basa en quemar una muestra en presencia de oxígeno en el interior de un calorímetro, con bomba adiabática en condiciones controladas. El poder calorífico se determina mediante observaciones de temperatura efectuadas antes y después de la combustión. Las principales partes que conforman el calorímetro son (González et al., 2010):

1. Un recipiente (celda), el cual está integrado en un sistema de aislamiento mediante el cual se trata de evitar las pérdidas de calor.
2. Un termómetro para medir los cambios de temperatura.
3. Un calefactor, que es una resistencia eléctrica conectada a una fuente controlable de tensión eléctrica.
4. Escudos, que son los que permitirán operar el calorímetro en condiciones adiabáticas.
5. El sólido cuya capacidad calorífica se determina al colocarlo en el recipiente (celda), equipado con un calefactor y un termómetro.

2.7.3 Cenizas

El contenido de cenizas es otra variable de importancia, ya que representa todo el material que no fue quemado, y que está compuesto por materiales inorgánicos, derivados de potasio, calcio, magnesio y otros (Miranda et al., 2018). 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 directamente en la cantidad de energía disponible en el combustible (López, 2013). Por otra parte, altos contenidos de cenizas requieren

limpieza constante de los equipos de combustión. Altos valores de elementos inorgánicos pueden generar que las partículas se dispersen y se adhieran en el interior de los intercambiadores de calor y plantas de generación de energía; a largo plazo, pueden obstruir el canal de gases de combustión e inducir la corrosión de los hornos, reactores, turbinas y dispositivos de control de emisiones (Oberberger y Thek, 2010).

2.7.4 Compuestos volátiles y contenido de carbono

El contenido de material volátil es de vital importancia en la velocidad de combustión; ya que en un combustible rico en volátiles éstos se desprenden más rápido produciéndose una disminución en su masa y se esperaría una combustión completa (Rincon et al., 2018). El alto contenido de material volátil ayuda a que la llama en el proceso de combustión sea de mayor longitud.

Por otra parte, el contenido de carbono determina la masa que queda después de la liberación de los compuestos volátiles, excluyendo la ceniza y la humedad (González, 2013).

2.7.5 Contenido de nitrógeno

El contenido relativamente alto de nitrógeno es otro factor problemático para determinar el potencial de algún material como biocombustible doméstico; lo anterior debido al aumento de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) que se espera de la combustión de este combustible (Alakangas et al., 2006).

2.8 Gasificación

Una vez que el biocombustible sólido ha sido generado, éste puede ser aprovechado mediante diferentes procesos termoquímicos tales como la combustión, la gasificación y la pirólisis. En particular, la gasificación convierte materiales sólidos como carbón, biomasa y desperdicio orgánico en químicos útiles y energía. Este proceso ha tomado una notable importancia recientemente como un

medio de producción de energía/combustibles renovables; además, se considera como una manera de reducir las emisiones de gases de invernadero. El proceso convierte materiales de carbono en combustible gaseoso usando agentes gasificantes, como aire u oxígeno y vapor de agua. El syngas producido por el gasificador contiene principalmente monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂) con pequeñas cantidades de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y nitrógeno (N₂) así como hidrocarburos ligeros. Este proceso es altamente flexible y el producto final (syngas) puede ser usado para producir electricidad, hidrógeno y combustibles líquidos o químicos (Dhanavath et al., 2018). La materia prima típica para la gasificación es la biomasa celulósica, como astillas de madera, pellets, o subproductos agrícolas como la paja o las cáscaras. Recientemente se han realizado algunas investigaciones para estudiar el uso de pellets de combustible en la gasificación. El uso de pellets de biomasa ha demostrado ser más efectivo que el uso del residuo sin transformación física (Andriani et al., 2019).

3. HIPÓTESIS

La determinación de la humedad y proporción de biomasa en la densificación de mezclas de cáscara de arroz y paja de frijol generarán un combustible sólido que cumpla con los estándares de calidad que indica la norma ISO 17725-6.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Producir pellets a partir de cáscara de arroz y paja de frijol que cumplan con los estándares de calidad de la norma ISO 17225-6 para poder ser utilizados como combustible.

4.2 Objetivos particulares

- Caracterizar química y energéticamente la cáscara de arroz y paja de frijol.
- Caracterizar física, química y energéticamente los pellets elaborados de mezclas de cáscara de arroz y paja de frijol.
- Comparar las variables respuesta de los pellets elaborados a base de cáscara de arroz y paja de frijol con los parámetros establecidos por la norma ISO 17725-6.
- Simular el proceso de gasificación de los biocombustibles sólidos.

5. METODOLOGÍA

5.1 Materiales

- Cascarilla de arroz.
- Paja de frijol.
- Agua.
- Bolsas resellables
- Crisol de porcelana.
- Pinzas metálicas.
- Guantes de látex.
- Mascarilla respiratoria.

5.2 Equipos

- Mufla, modelo FE-361-Felisa.
- Licuadora Oster Xpert Series.
- Licuadora industria LI-12VAM
- 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.
- Medidor de humedad digital H.king Modelo N43.
- TGA, TA Instruments Q500.
- HACH Desecador, Numak.
- Balanza analítica electrónica, UTEST UTW-0620.
- Calorímetro, 6200 Parr.
- Pelletizadora, Pellet Machine.

5.3 Métodos

5.3.1 Recolección de biomásas

La cascarilla de arroz fue recolectada en el municipio de Ezequiel Montes, Querétaro; mientras que la paja de frijol fue obtenida en el Carmen, Hidalgo. Las biomásas de estudio se muestran en la Figura 2.



Figura 2. Muestra de la biomasa de estudio

5.3.2 Descripción del laboratorio

Las pruebas de caracterización de materia prima, producción de pellets y análisis de los mismos se llevarán a cabo en el Laboratorio de Bioingeniería en la Facultad de Ingeniería Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro, ubicado en el municipio El Marqués, Querétaro.

5.3.3 Equipo de seguridad

Como parte de la protección durante el estudio se empleó protección respiratoria para evitar aspirar polvos; a su vez, se utilizó el equipo de seguridad que el Laboratorio de Bioingeniería indica como parte del reglamento en el cual se incluye bata, guantes y zapato cerrado.

5.3.4 Molienda de biomasa

Previo a la densificación, se realizó la molienda para reducir el tamaño de partícula de ambas biomásas. Para ello se empleó una licuadora industrial de volteo con capacidad de 12 litros marca LI-12VAM. Posteriormente se utilizó un tamiz marca ALCON con un tamaño de malla de 0.42 mm para homogeneizar el tamaño de las muestras.

Las muestras se almacenaron en bolsas resellables para evitar su degradación por la humedad y la proliferación de microorganismos hasta su posterior caracterización como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Biomásas molidas

5.3.5 Caracterización de las biomásas y pellets

En esta sección se describen las pruebas de caracterización que se realizaron a ambas biomásas; se describen igualmente las pruebas de caracterización de los pellets con sus diferentes mezclas. Las pruebas de caracterización 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. Los métodos para cada prueba se realizaron mediante los ya establecidos en el laboratorio como se muestra en la Tabla 2, los cuales serán explicados posteriormente.

Tabla 2. Métodos para caracterización de residuos.

Determinación	Método
Humedad	Gravimétrico PROY-NOM-211-SSA-200
Cenizas	Gravimétrico NMX-F-066-S-1978
Sólidos Volátiles	Gravimétrico APHA
Carbono	Gravimétrico
Nitrógeno Total	Digestión y espectrofotometría
Poder calorífico	Calorímetro Isoperibólico

Las pruebas de caracterización de los residuos se realizaron por triplicado para cada uno de los métodos empleados.

5.3.6 Determinación de humedad inicial

Para conocer el valor de humedad de la cáscara de arroz y paja de frijol se emplearon 3 crisoles de porcelana para cada biomasa, los cuales se pesaron en la balanza analítica y se registró su peso; posteriormente, se colocaron en la estufa (ver Figura 4) a 110 °C monitoreando su peso hasta lograr su peso constante.



Figura 4. Estufa

Después se pesaron 5 gramos de biomasa molida y tamizada en cada crisol. Los crisoles con la biomasa se colocaron en la estufa a 110 °C, y se monitoreó pesando cada 30 minutos las muestras hasta llegar a un peso constante; ya que en ese momento se sabrá que toda el agua de la biomasa ha sido extraída. Después se dejaron enfriar en un desecador para evitar que las biomásas ganarán nuevamente humedad, se pesaron en la balanza y se registró su peso. El contenido en agua de la muestra se calcula por diferencia de peso y se expresa en % de humedad como se muestra en la ecuación 1:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(\text{peso crisol+muestra húmeda}) - (\text{peso crisol+muestra seca})}{\text{Peso de la muestra húmeda}} \times 100\% \quad (\text{Ec.1})$$

5.3.7 Contenido de compuestos volátiles

Para la determinación de sólidos volátiles se emplearon 3 crisoles de porcelana para cada biomasa, los cuales se pesaron en la balanza analítica y se registró su peso; posteriormente se colocaron a peso constante en una mufla a 550 °C (ver Figura 5). Se pesaron 5 gramos de biomasa molida y tamizada en cada crisol. Los crisoles con la biomasa se colocaron en la estufa a 103-105 °C, y se monitoreó pesando cada 30 minutos las muestras hasta llegar a un peso constante.



Figura 5. Mufla

La muestra evaporada se colocó 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. El contenido de volátiles se determinó utilizando la ecuación 2.

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

Donde:

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

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

5.3.8 Contenido total de carbono

El carbono orgánico total (COT) se determinará con el método de pérdida por ignición (loss on ignition, LOI), el cual consiste en colocar los crisoles en peso constante en una mufla a 375 °C. Después se pesaron 5 gramos de biomasa y se sometió a calcinación en una mufla a 375 °C durante 16 horas. Transcurrido este tiempo se deja enfriar, se coloca en un desecador y finalmente se pesa. 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, 2014). El contenido de carbono se determinó usando la ecuación 3:

$$\% \text{carbono} = \frac{(A-B)}{1.724 \times A} \times 100\% \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

A= Peso de muestra seca + peso de crisol (g)

B= Peso de muestra incinerada + peso de crisol (g)

5.3.9 Contenido total de nitrógeno

El nitrógeno total se realizó por medio de la técnica de Kjeldahl, a través de digestión para determinar la cantidad de sulfato de amonio por espectrofotometría (Método TKN HACH®, método 8075).

El método está basado en la conversión de nitrógeno contenido en la muestra en sulfato de amonio, por la acción de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno como catalizador utilizando un digestor. Posteriormente, una muestra de la digestión se

colocó en el espectrofotómetro UV-Vis a 460 nm para determinar la concentración del ion amonio.

5.3.10 Contenido proximal de cenizas

La determinación de cenizas se realizó utilizando crisoles colocados a peso constante en una mufla a 950 °C. Posteriormente se pesaron 2 g de cada biomasa en los crisoles que se colocaron en la mufla a una temperatura de 950 °C, y se dejaron por 48 horas; esto para asegurar la completa combustión de muestra. Transcurrido este tiempo se apagó la mufla y los crisoles se dejaron enfriar. A continuación, los crisoles se colocaron en el desecador y se pesaron en la balanza analítica. El contenido de cenizas se calcula por medio de la ecuación 4, y se expresa en porcentaje como se menciona a continuación:

$$\% \text{cenizas} = \frac{(A-B)}{\text{Peso de la muestra (g)}} \times 100\% \quad (\text{Ec.4})$$

donde:

A= Peso del crisol con las cenizas (g)

B= Peso del crisol vacío (g)

5.3.11 Poder calorífico

Para la determinación del poder calorífico se pesa aproximadamente 1 g de muestra molida y tamizada de cada biomasa, para la generación de una pastilla mediante el uso de una prensa manual, ver Figura 6. Las pastillas obtenidas (Figura 7) se introducen al calorímetro.



Figura 6. Prensa manual

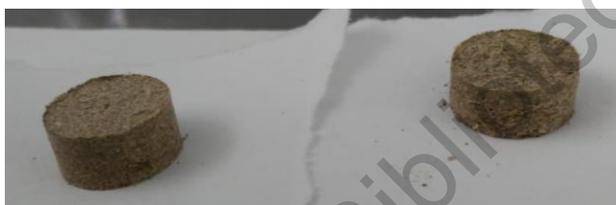


Figura 7. Pastilla formada por prensa manual

Para la operación del calorímetro, los manómetros de los tanques de oxígeno y aire se regulan a 300 kPa y 80 psia, respectivamente. En el calorímetro se colocó un litro de agua proveniente del dispensador automático, el cual mantiene el agua a una temperatura constante de 25 °C aproximadamente. En la pantalla de mando del calorímetro se seleccionará la opción operar calorímetro, posteriormente se seleccionará la opción calentador de bomba 2 en la pantalla de mando del calorímetro. El equipo tardará algunos minutos para que alcance una temperatura de 30 °C. Luego se procederá 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 introducirá la pastilla generada dentro del cuerpo de la bomba de combustión; se cerrará de manera que quedará completamente hermética. La bomba se llena con oxígeno de manera automática para asegurar la combustión total de la muestra, después se coloca dentro del equipo conectando los electrodos en la bomba y se procede a cerrar el equipo. Finalmente, se introducirá el peso de

la muestra en el software del equipo, y se dará inicio a la combustión hasta obtener el valor del poder calorífico (ver Figura 8).



Figura 8. Calorímetro

Los procedimientos anteriormente descritos también se realizarán a los pellets de cascarilla de arroz y paja de frijol; además se realizarán análisis físicos como durabilidad, dimensiones y densidad, los cuales se describen a continuación.

5.3.12 Dimensiones

La determinación del diámetro y la longitud de los pellets se realizará utilizando un vernier de 200 mm, marca Mitutoyo, Figura 9. La medición del diámetro y longitud se realizará con ayuda de las puntas largas en donde se colocarán los pellets. La obtención de las dimensiones se realiza de forma digital.



Figura 9. Vernier

5.3.13 Durabilidad mecánica

Para la determinación de la durabilidad mecánica se utiliza una variación de Standard Test Method for Drop Shatter Test for Coke ASTM D3038 – 93 (2010), ya que este método es más adecuado para simular las cargas a las que serán sometidos los pellets en el proceso de transporte. El método consiste en la medición de masa de un pellet utilizando una balanza analítica, luego se dejará caer el pellet desde una altura de 1.85 m sobre una baldosa plástica. Se tomará el pellet y nuevamente se llevará a la balanza para determinar su masa final. La prueba se realizará por triplicado. Finalmente, se calculará la resistencia al impacto por diferencia de masas.

5.3.14 Densidad unitaria

La densidad unitaria se determina de forma individual, calculando el volumen del pellet mediante las mediciones de diámetro (D) y longitud (L) y pesando el pellet en una balanza para determinar su masa. Para el cálculo de esta variable se usan las ecuaciones 5 y 6:

$$\text{Volumen del pellet} = \frac{\pi D^2}{4} \times L \quad (\text{Ec.5})$$

$$\text{Densidad unitaria} = \frac{\text{masa del pellet (g)}}{\text{volumen del pellet (cm}^3\text{)}} \quad (\text{Ec.6})$$

5.3.15 Densidad a granel

Los pellets son pesados y son colocados en un recipiente de volumen conocido, sus unidades pueden ser g/cm³. Para tal fin se emplea la ecuación 7:

$$\text{Densidad a granel} = \frac{\text{masa granel (g)}}{\text{volumen del recipiente (cm}^3\text{)}} \quad (\text{Ec.7})$$

Este procedimiento se realizó por triplicado para los pellets de mezclas de cascarilla de arroz y paja de frijol.

5.4 Diseño experimental

Con el fin de encontrar las condiciones óptimas para pelletizar las materias primas se seleccionaron dos factores, cada uno de ellos con tres niveles como se presenta a continuación:

- Porcentaje de humedad:
 - 10%
 - 15%
 - 20%

- Proporción de cascarilla de arroz y paja de frijol.
 - Cascarilla de arroz y paja de frijol (75:25).
 - Cascarilla de arroz y paja de frijol (50:50).
 - Cascarilla de arroz y paja de frijol (75:25).

Todos los pellets producidos mediante estas combinaciones se realizarán por triplicado.

5.5 Elaboración de pellets

Para la elaboración de los pellets se mezclarán las materias primas con los tratamientos anteriormente mencionados hasta obtener una textura homogénea; luego con la ayuda del higrómetro, mostrado en la Figura 10, se obtendrá la medida de la humedad de cada una de éstas (Figura 11) y se procederá a pelletizar. Los pellets se producirán en una pelletizadora de rodillos de potencia con una matriz de 8 mm de diámetro, ver Figura 12.



Figura 10. Higrómetro



Figura 11a. Biomosas con 20% de humedad inicial



Figura 11b. Biomosas con 15% de humedad inicial



Figura 11c. Biomosas con 10% de humedad inicial

La pelletizadora utilizada permite el ajuste de presión por medio de tornillos; sin embargo, no es posible conocer la presión real a la que se están formando los pellets ni permite controlar la temperatura de formación.



Figura 12. Pelletizadora de rodillo y matriz de 8 mm.

Los pellets resultantes se guardarán en bolsas resellables (Figura 13), y serán caracterizados de acuerdo a los análisis descritos anteriormente.



Figura 13. Pellets obtenidos para su análisis

5.6 Diseño de experimentos

Debido a que se trabaja con dos variables (humedad y proporción de biomásas) y tres niveles para cada uno de ellos se estableció un diseño de experimento de 3^2 , es decir de dos factores y tres niveles. Con ayuda del programa JMP se diseñó el experimento de forma aleatorizada. Los tratamientos se realizaron por triplicado como lo muestra la Tabla 3.

En cuanto a las variables de respuesta se establecieron las siguientes:

- Químicas: humedad final (%), cenizas, (%), contenido total de carbono (%), compuestos volátiles (%) y nitrógeno total.

- Físicas: longitud (mm), diámetro (mm), densidad individual (g/cm^3), la densidad a granel (g/cm^3).
- Energética: poder calorífico (MJ/kg).

Tabla 3. Tratamientos aleatorizados

Humedad	Proporción	Cáscara de arroz-paja de frijol		
		25-75	50-50	75-25
10%		H1P1	H1P2	H1P3
15%		H2P1	H2P2	H2P3
20%		H3P1	H3P2	H3P3

5.7 Simulación del proceso de gasificación

Con base en los resultados de la caracterización y producción de los pellets se llevará a cabo el modelado de la gasificación de los mismos utilizando el simulador Aspen Plus. Para ello se empleará el trabajo reportado por Dhanavath et al. (2018). En dicho trabajo se modela el reactor de gasificación empleando dos módulos de reacción; un reactor YIELD (reactor de rendimiento) utilizado para descomponer la alimentación de biomasa en sus compuestos elementales (C, H_2 , O_2 , N_2), es decir, convierte los elementos no convencionales de la alimentación a convencionales. Posteriormente se realiza el proceso de gasificación, el cual se modela como un reactor de Gibbs. El reactor de Gibbs se usó para predecir la composición de equilibrio del gas de síntesis producido por el reactor de lecho fijo. Ambos reactores representan el reactor de gasificación funcionan como uno mismo en el proceso de gasificación como se muestra en la Figura 14.

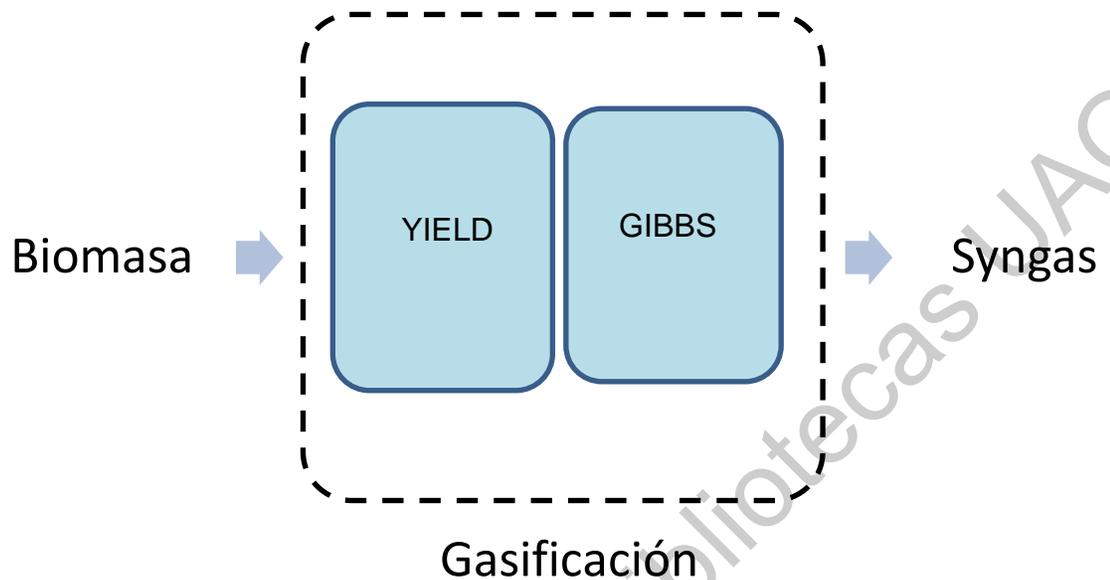


Figura 14. Proceso de gasificación

Se seleccionará la ecuación de estado de Peng-Robinson para el modelado termodinámico, ya que proporciona una buena precisión para la simulación del proceso de gasificación (Adnan y Hossain, 2018); la biomasa se ingresará como material no-convencional en el reactor Yield. Se considerará que el proceso se llevará a cabo a presión atmosférica. Los agentes gasificantes que se usan en el reactor RGIBBS son O_2 /aire y vapor, que participan en las reacciones de oxidación parcial y gasificación que ocurren en el reactor. Se considera que el proceso se llevará a cabo a presión atmosférica, en un rango de temperatura de 700 a 1000°C para determinar la condición a la que se obtenga syngas con máximo poder calorífico.

Las propiedades no convencionales de la alimentación y cenizas se estimarán usando HCOALGEN y DCOALIGT.

El calor generado por la descomposición de la biomasa Q-DEC es utilizado para calentar los gases producidos por el proceso utilizando la corriente Q-GASFY .Por

lo tanto, se desarrollará un modelo de simulación utilizando Aspen Plus como se muestra en la Figura 15.

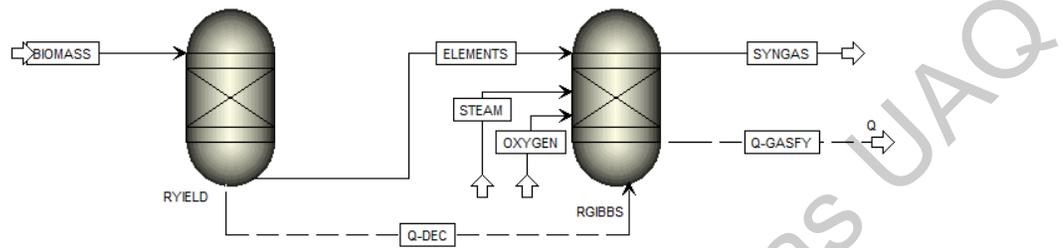


Figura 15. Esquema de Aspen Plus para el proceso de gasificación en lecho fijo.

El syngas obtenido será aprovechado para la generación de energía térmica mediante agua de calentamiento. Cabe mencionar que el syngas puede ser empleado para producir otros biocombustibles; no obstante, dicha alternativa queda fuera del alcance del presente proyecto.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Caracterización inicial de la materia prima

Los resultados obtenidos de la caracterización de los residuos de la cascarilla de arroz y la paja de frijol se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la caracterización de cascarilla de arroz y paja de frijol

	Cáscara de arroz	Paja de frijol
% Humedad	5.58±0.11	6.45±0.14
% Cenizas	18.99±0.12	6.59±0.21
% Sólidos volátiles	74.42±0.05	86.18±0.09
% Carbono	46.93±0.03	54.27±0.02
% Nitrógeno total	0.41±0.03	0.57±0.04
Poder calorífico (MJ/kg)	13.51±0.99	16.89±0.26

El contenido de humedad hace referencia a la cantidad de humedad inicial de la materia prima empleada; ésta es considerada una variable de vital importancia, ya que puede beneficiar o perjudicar tanto a la durabilidad del pellet como el poder calorífico final. La humedad ha resultado, en algunos casos, un serio factor de control; se ha encontrado para algunas materias primas que la humedad alta puede provocar baja densidad, y por consiguiente requerir mayor presión para la formación del pellet (Poddar et al.,2014). Los pellets con alta humedad generan problemas en los equipos donde la presión de formación no puede ser controlada. En estudios previos se han reportado valores que van entre del 13% al 20% para residuos como el arroz (Ishii y Furuchi, 2014), 6.88% para fibra de cáñamo (Streikus,2016) y del

10% para el tallo de sorgo, caña de maíz, paja de trigo, y el tallo azul (Theerarattananoon et al., 2011); por lo que la humedad depende de la materia prima a emplear, y se observa que se consideran humedades cercanas al 10%. Una baja humedad como se ha determinado en cascarilla de arroz y paja de frijol con 5.99% y 6.45%, respectivamente, revela que los pellets tendrán una rápida combustión; por lo que su poder calorífico será alto, ya que no se desperdiciará tanta energía en la evaporación del agua.

El contenido de cenizas es otra variable de importancia, ya que representa todo el material que no fue quemado, y que está compuesto por materiales inorgánicos, derivados de potasio, calcio, magnesio y otros (Miranda et al., 2018). Un contenido bajo de cenizas indica menos costos por limpieza de los equipos donde se queme el pellet, y menos problemas por la disposición final de éstas. La cantidad de cenizas depende de la biomasa, siendo mayor en las herbáceas que en las maderas (Crawford et al., 2015); una cantidad mayor de cenizas en la biomasa afecta negativamente el poder calorífico (Rambo et al., 2015). Es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues en algunos casos ésta puede ser utilizada como aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado (Valverde et al., 2007). En este trabajo, la cascarilla de arroz mostró un alto contenido de cenizas (18.99%), a diferencia de la paja de frijol donde se obtuvo 6.59%; por lo que la mezcla de ambas biomásas en la producción de pellets aumentaría el potencial de la cascarilla de arroz para ser utilizado como biocombustible.

Por otra parte, el contenido de material volátil es de vital importancia en la velocidad de combustión; ya que en un combustible rico en volátiles éstos se desprenden más rápido produciéndose una disminución en su masa, por lo que se esperaría una combustión completa (Rincón et al., 2018). El alto contenido de material volátil ayuda a que la llama en el proceso de combustión sea de mayor longitud. Un alto porcentaje de volatilidad (> 50%), como las biomásas en estudio, las cuales obtuvieron 74.42% y 86.18% para la cascarilla de arroz y paja de frijol

respectivamente, demuestra que éstos arden con gran facilidad; además que la llama en el proceso de combustión será de muy buena calidad.

El contenido de carbono determina la masa que queda después de la liberación de los compuestos volátiles, excluyendo la ceniza y la humedad (González, 2013). El contenido de carbono en cascarilla de arroz fue de 46.93%, mientras que para la paja de frijol fue de 54.27%. Estos valores son similares a los que se han descrito anteriormente en bibliografía donde se reporta 50.2% en el contenido de carbono de gramíneas como el trigo, 50.9% en residuos de madera como el pino (Kijokelczkowska, 2016), y 47.71% en bambú (Liu et al., 2016); a mayor contenido de carbono en el biocombustible mayor poder calorífico se puede tener. En contraparte, un alto contenido de nitrógeno es perjudicial, ya que se producirían emisiones de NO_x; dichas emisiones son de gran preocupación por las medidas ambientales que se están tomando en la evaluación de nuevos combustibles (Boada y Vargas, 2015). El contenido de nitrógeno total en cascarilla de arroz fue 0.41%, el cual está dentro de los rangos reportados en diferentes países con valores entre 0.38 y 1.88 (Valverde et al., 2007). El contenido de nitrógeno en paja de trigo se encontró entre 0.69 y 0.77 (Toscano, 2015), en biomasa de colza se reportaron límites de 0.7 a 1.1% (Llorente, 2006); el contenido de nitrógeno en paja de frijol (0.57%) se encontró por debajo de los valores reportados para otras biomásas.

El poder calorífico es una de las características más importantes para la comercialización de un pellet (Esteban, 2014); esto se debe a que el poder calorífico es la cantidad de energía, en forma de calor, que el pellet puede liberar por unidad de masa su combustión o quema, y depende también directamente de la cantidad de carbono total de la biomasa. En trabajos reportados se han obtenido valores de 16.5 MJ/kg para biomasa de olivos y 15.4 MJ/kg para naranjo (Fernández et al., 2014); 13-16 MJ/Kg para cáscara de cacao, tallos de maíz con un poder calorífico de 13-15 MJ/Kg (Núñez et al., 2012). Los resultados obtenidos para cáscara de arroz y paja de frijol presentan mayor poder calorífico con respecto a otros residuos agrícolas, indicando que éstos son una fuente potencial de energía.

6.2. Pellets obtenidos en los diferentes tratamientos

En la Figura 16 se muestran los pellets con 20% humedad inicial y cáscara de arroz: paja de frijol (75:25).



Figura 16. Tratamiento H3P3

En la Figura 17 se muestran los pellets con 20% humedad inicial y cáscara de arroz: paja de frijol (50:50).



Figura 17. Tratamiento H3P2

En la Figura 18 se muestran los pellets con 20% humedad inicial y cáscara de arroz: paja de frijol (25:75).



Figura 18. Tratamiento H3P1

En la Figura 19 se muestran los pellets con 15% humedad inicial y cáscara de arroz: paja de frijol (75:25)



Figura 19. Tratamiento H2P3

En la Figura 20 se muestran los pellets con 15% humedad inicial y cáscara de arroz: paja de frijol (50:50).



Figura 20. Tratamiento H2P2

En la Figura 21 se muestran los pellets con 15% humedad inicial y cáscara de arroz: paja de frijol (25:75).



Figura 21. Tratamiento H2P1

En la Figura 22 se muestran los pellets con 10% humedad inicial y cáscara de arroz: paja de frijol (75: 25).



Figura 22. Tratamiento H1P3.

En la Figura 23 se muestran los pellets con 10% humedad inicial y cáscara de arroz: paja de frijol (50:50).



Figura 23. Tratamiento H1P2.

En la Figura 24 se muestran los pellets con 10% humedad inicial y cáscara de arroz: paja de frijol (25:75).



Figura 24. Tratamiento H1P1.

6.3 Caracterización de pellets

La determinación de las pruebas químicas, físicas y energéticas para la caracterización de los pellets con humedad inicial de 10%, 15% y 20% se presentan en las Tablas 5, 6 y 7, respectivamente. A continuación se llevará a cabo el análisis de resultados para cada una de las variables de interés.

Tabla 5. Caracterización proximal, elemental y energética de pellets de cáscara de arroz y paja de frijol con humedad inicial de 10%.

Proporción	75:25	50:50	25:75
cáscara de arroz:			
paja de frijol			
Caracterización proximal y elemental			
Humedad (%)	7.76±0.65a	7.45±0.51a	8.07±0.84a
Volátiles (%)	75.06±0.58c	81.31±0.87b	86.14±1.03a
Cenizas (%)	16.05±0.90a	12.99±0.26b	10.94±0.32c
CTO (%)	42.50±0.65c	45.26±0.09b	46.86±0.05a
CNT (%)	0.45±0.01c	0.49±0.01b	0.54±0.01a
Caracterización energética			
Poder calorífico (MJ/kg)	14.36±0.08a	14.48±0.47a	14.57±0.10a
Determinaciones físicas			
Diámetro (mm)	8.05±0.03a	8.01±0.03a	7.91±0.19a
Longitud (mm)	15.03±1.59a	14.38±2.82a	11.84±1.43a

Densidad individual (g/cm³)	0.80±0.03a	0.89±0.08a	0.76±0.04a
Densidad a granel (kg/m³)	625.28±5.91a	621.33±3.53a	622.73±9.63a
Durabilidad (%)	66.87±4.75b	79.43±6.32a	71.68±4.14b

CTO: carbono total orgánico; CNT: Contenido de nitrógeno total
 Los valores se expresan como medias ± desviación estándar. Diferentes letras expresan diferencias significativas ($p < 0.05$) por columna usando la prueba de Tukey-Kramer.

Tabla 6. Caracterización proximal, elemental y energética de pellets de cáscara de arroz y paja de frijol con humedad inicial de 15%.

Proporción	75:25	50:50	25:75
cáscara de arroz:			
paja de frijol			
Caracterización proximal y elemental			
Humedad (%)	9.66±0.59a	9.99±0.76a	10.3±0.65a
Volátiles (%)	77.12±0.92c	79.14±0.63b	83.00±0.30a
Cenizas (%)	16.08±0.32a	12.85±0.15b	9.78±0.29c
CTO (%)	42.76±0.04c	45.08±0.09b	47.24±0.69a
CNT (%)	0.47±0.01b	0.50±0.01ab	0.51±0.01a

Caracterización energética			
Poder calorífico (MJ/kg)	14.08±0.28a	13.91±0.25a	14.07±0.20a
Determinaciones físicas			
Diámetro (mm)	8.01±0.01a	7.99±0.04a	7.97±0.11a
Longitud (mm)	24.59±0.67a	25.04±0.78a	24.12±1.59a
Densidad individual (g/cm³)	1.15±0.07a	1.21±0.05a	1.18±0.03a
Densidad a granel (kg/m³)	610.14±3.70a	610.10±5.35a	613.27±4.09a
Durabilidad (%)	99.53±0.41a	99.74±0.08a	99.75±0.05a

CTO: carbono total orgánico; CNT: Contenido de nitrógeno total.

Los valores se expresan como medias ± desviación estándar. Diferentes letras expresan diferencias significativas ($p < 0.05$) por columna usando la prueba de Tukey-Kramer.

Tabla 7. Caracterización proximal, elemental y energética de pellets de cáscara de arroz y paja de frijol con humedad inicial de 20%

Proporción	75:25	50:50	25:75
cáscara de arroz:			
paja de frijol			
Caracterización proximal y elemental			
Humedad (%)	12.43±0.56a	14.02±0.87a	13.60±1.14a
Volátiles (%)	76.12±3.03b	81.01±0.58a	85.02±0.42a

Cenizas (%)	16.54±0.36a	12.39±0.38b	8.79±0.14c
CTO (%)	42.37±0.38c	45.85±0.02b	48.08±0.64a
CNT (%)	0.44±0.01b	0.49± 0.01a	0.52±0.01a

Caracterización energética

Poder calorífico (MJ/kg)	12.89±0.17a	12.63±0.01a	12.41±0.29b
---------------------------------	-------------	-------------	-------------

Determinaciones físicas

Diámetro (mm)	8.02±0.06a	8.06±0.01a	8.00±0.02a
Longitud (mm)	26.56±2.57a	25.65±2.10a	24.75±1.59a
Densidad individual (g/cm³)	1.24±0.06a	1.26±0.04a	1.24 ±0.03a
Densidad a granel (kg/m³)	577.99±6.22 b	588.37±7.99ab	600.54±6.19a
Durabilidad (%)	99.91±0.08a	99.74±0.12a	99.55±0.04a

CTO: carbono total orgánico; CNT: Contenido de nitrógeno total. Los valores se expresan como medias ± desviación estándar. Diferentes letras expresan diferencias significativas ($p < 0.05$) por columna usando la prueba de Tukey-Kramer.

6.4 Análisis comparativo con estándar de calidad

En esta sección se presentará el análisis comparativo de cada una de las variables respuesta contra el estándar ISO 17225-6; dicho estándar determina las especificaciones de los pellets no leñosos provenientes de biomasa herbácea (incluye cultivos de granos o semillas de la industria de producción o procesamiento y sus subproductos como los cereales), biomasa de frutas, biomasa acuática, y mezclas.

El resultado de los análisis de los pellets se comparó con los estándares indicados en la norma como se muestra en las siguientes secciones. Los valores de las gráficas se expresan como medias \pm desviación estándar. Diferentes letras minúsculas expresan diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos con distinta humedad, pero misma proporción de mezcla. Diferentes letras mayúsculas expresan diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos con distinta proporción de mezcla.

6.4.1 Análisis de pellets en función de humedad

Para el análisis de humedad final de los pellets se determinó el efecto de la humedad inicial, y posteriormente se analizó el efecto de las proporciones de biomasa en la mezcla. El contenido de humedad mostró diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre los diferentes tipos de humedades, mientras que no hubo diferencias estadísticas entre las diferentes mezclas (Figura 25).

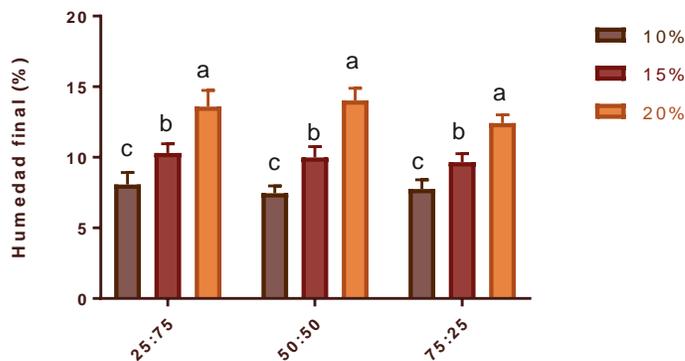


Figura 25. Análisis estadístico en relación a la humedad final de pellets.

Se mostró mayor diferencia entre tratamientos con humedad inicial de 20.0%, lo cual originó que los pellets tuvieran una humedad final de 13.35%; dicho porcentaje de humedad en el pellet es mayor de acuerdo a las especificaciones de la norma ISO 17225-6 para pellets de biomasa de origen no leñoso que indica un valor <10%. Los pellets obtenidos, con humedades del 20%, mostraron un valor superior al reportados a partir de otras biomásas como la cáscara de coco con 12.01% de humedad (Forero et al., 2012).

Los valores promedio de los pellets con humedad inicial de 15% fue de 9.98% y 7.76% con 10% de humedad inicial. Los pellets obtenidos mostraron contenidos de humedad inferiores al 10% como lo indica la norma. Los pellets para ambos tratamientos mostraron valores inferiores a los reportados a partir de tallos de quinoa y hojas de eucalipto con 10.5% (Baltazar, 2016), así como en la fabricación de pellets a partir de material lignocelulósico proveniente de palma de aceite con un 10% de humedad (Rincon et al., 2018).

El contenido de humedad es uno de los parámetros más importantes para la durabilidad mecánica de los pellets (Whittaker y Shield, 2017). El contenido de

humedad de la materia prima siempre es mayor que el de los pellets fabricados, lo que se debe a la evaporación producida por el calentamiento de la matriz en el proceso de granulación (Archadi et al., 2008). Por otro lado, el contenido de humedad tiene diferentes efectos: si el contenido de humedad es demasiado bajo, la fricción entre la biomasa y la matriz será alta, lo que aumentará el consumo de energía. Además, la materia prima en la matriz podría quemarse y los agujeros en la matriz podrían estar obstruidos, o podría producirse un aislamiento térmico, lo que impediría la transferencia de calor (Relova et al., 2009). Por el contrario, si el contenido de humedad es alto, aumentará los costos y el tiempo de secado (cuando se hace al aire libre). Además, la materia prima se vuelve resbaladiza y no se puede compactar fácilmente (Lehtikangas, 2001). Es por ello que el contenido de humedad de las biomásas es una variable que puede y debe optimizarse para obtener características deseables en el biocombustible final, así como mejorar las condiciones de operación.

6.4.2 Análisis de pellets en función de volátiles

El contenido de materia volátil no mostró diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) entre los diferentes valores de humedad; sin embargo, hubo diferencias entre las diferentes proporciones de mezclas (Figura 26).

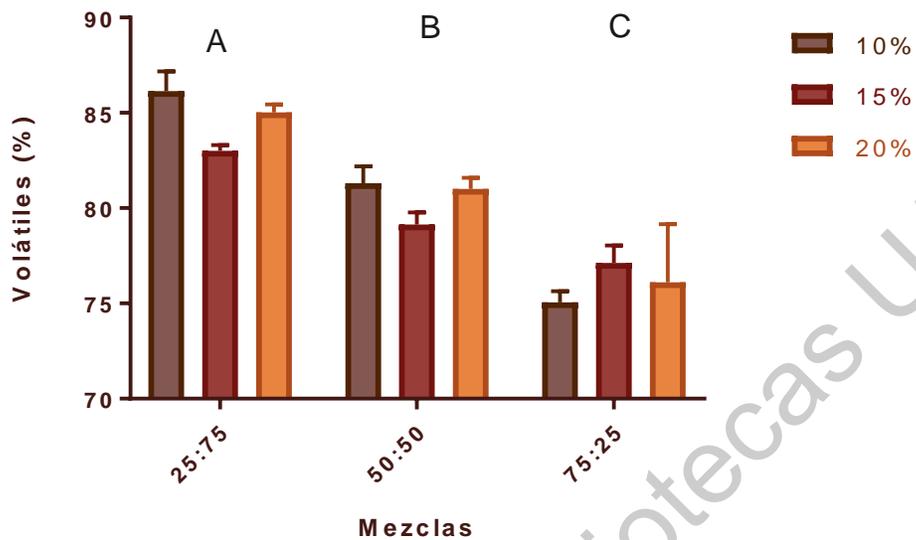


Figura 26. Análisis estadístico en relación al porcentaje de volátiles de pellets.

El contenido del material volátil de las muestras fue de 84.72% (25:75); 80.49% (50:50) y 76.10% (75:25); aunque no hay parámetro de comparación en la norma se sabe que la materia volátil participa en el proceso de combustión de la biomasa, afectando directamente el rendimiento y la estabilidad física (Tauro et al., 2018). Por lo tanto, un alto contenido de materia volátil implicaría una rápida ignición del biocombustible, pero también su conversión en polvo, lo cual es una desventaja (García et al., 2015). Por otro lado, valores más bajos de materia volátil crearán dificultades en el proceso de ignición del biocombustible.

La evaluación de algunos residuos sólidos agroindustriales brasileños procedentes del tratamiento fisicoquímico de aguas residuales de procesamiento de carne, mezclas de estos residuos sólidos orgánicos con aserrín, residuos de zumo de manzana (bagazo de manzana), residuos de jugo de naranja, bagazo de caña de azúcar, granos de açai (*Euterpe oleracea*) y cáscara de arroz presentaron pellets con un contenido de materia volátil variando entre 70.57% 85.36%. Los obtenidos a partir de cáscara de arroz y paja de frijol se encuentran en este rango.

6.4.3 Análisis de pellets en función de cenizas

El contenido de cenizas mostró diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre las diferentes proporciones de biomasa en la mezcla; mientras que no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los diferentes contenidos de humedad (Figura 27).

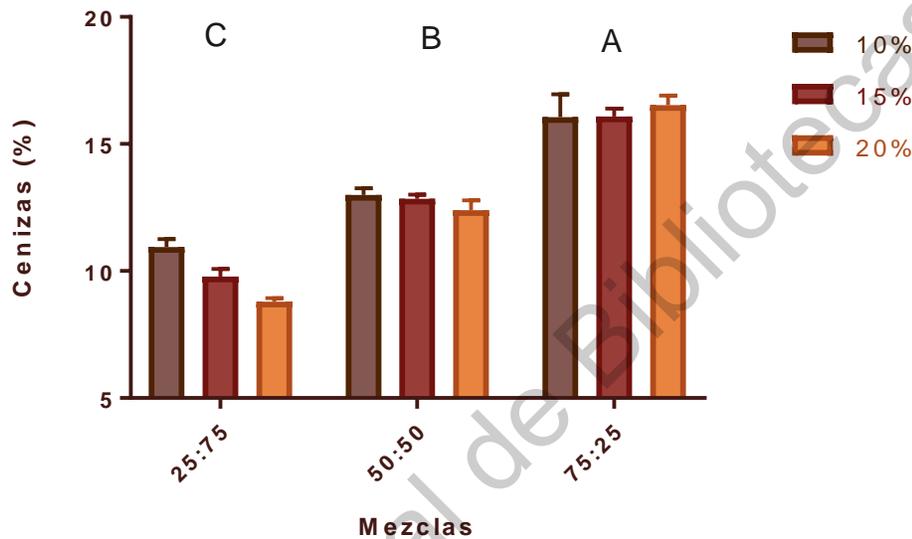


Figura 27. Análisis estadístico en relación al porcentaje de cenizas de pellets.

La norma ISO 17225-6 especifica un contenido máximo de cenizas de 6.0 % en peso seco para los pellets de biomasa herbácea de la clase A y de 10.0 % para la clase B. El contenido de ceniza de las muestras es: 9.84% (25:75), 12.74% (50:50) y 16.22% (75:25); este último tiene mayor contenido de cenizas, debido al contenido de silicio procedente de la cáscara de arroz. Los valores sugieren que no pueden ser clasificados dentro de la clase A.

El contenido de ceniza de las muestras está por encima del valor de la norma. Debe tenerse en cuenta que entre mayor sea la cantidad de ceniza en el carbón o combustible sólido, menor será el calor obtenido; lo anterior aumenta los problemas

de manejo y disposición de las grandes cantidades de ceniza producidas (Uribe, 1986).

6.4.4 Análisis de pellets en función de carbono total

No hubo diferencias significativas ($p>0.05$) en el contenido de carbono entre diferentes contenidos de humedad. Sin embargo, hubo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos de diferentes proporciones de biomasa (Figura 28).

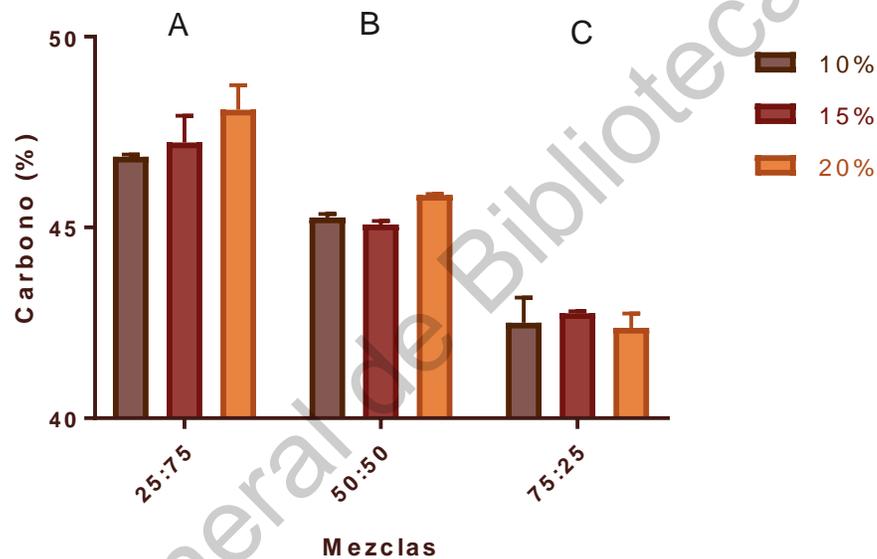


Figura 28. Análisis estadístico en relación al carbono total en pellets.

Los pellets elaborados con cáscara de arroz y paja de frijol en proporción 25:75 mostraron un mayor contenido de carbono con 47.39%, mientras que la proporción 75:25 obtuvo 42.54% de carbono total. La importancia de este parámetro radica en que es el más importante en términos de energía potencial, ya que altos contenidos de carbono fijo son asociados a altos poderes calóricos (Forero-Nuñez et al., 2015). Por otro lado, altos contenidos de cenizas resultan en un menor valor de calentamiento del biocombustible el cual implica un bajo contenido de carbono (Amirita et al., 2018).

El contenido de carbono no se encuentra establecido en la norma, por tanto, como referencia se encuentra que el contenido de carbono final en pellets elaborados de bambú fue de 49.71 % (Liu et al., 2016).

6.4.5 Análisis de pellets en función de nitrógeno

No hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) en el contenido de nitrógeno entre diferentes contenidos de humedad en los tratamientos; sin embargo, hubo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos de diferentes proporciones de biomasa (Figura 29).

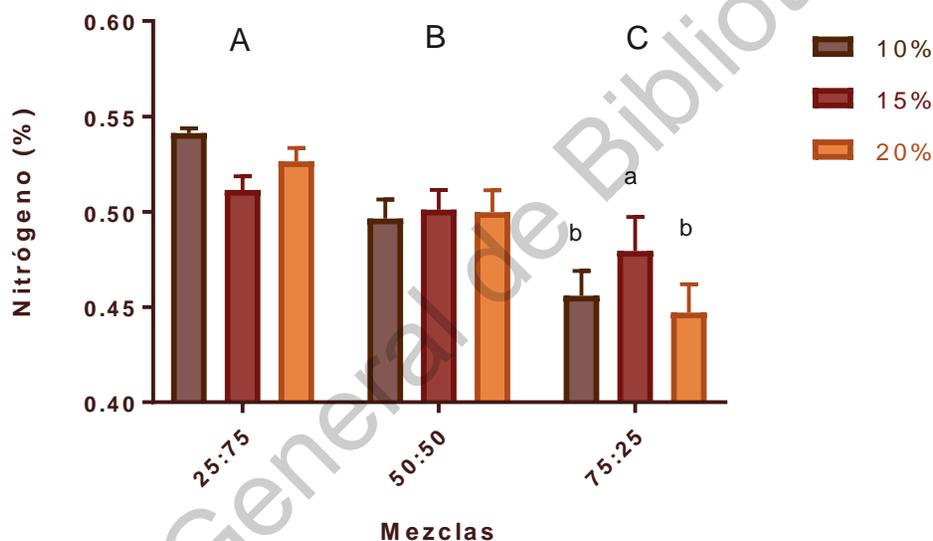


Figura 29. Análisis estadístico en relación al porcentaje de nitrógeno en pellets.

Los pellets elaborados con cáscara de arroz y paja de frijol en proporción 25:75 mostraron un mayor contenido de nitrógeno con 0.52%, mientras que la proporción 75:25 obtuvo 0.46%. La norma ISO 17225-6 especifica un contenido ≤ 0.7 , por lo que los diferentes tratamientos se encuentran dentro de lo establecido.

6.4.6 Análisis de pellets en función de poder calorífico

El contenido de humedad mostró diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre los diferentes tipos de humedades, mientras que no hubo diferencias estadísticas entre las diferentes mezclas (Figura 30).

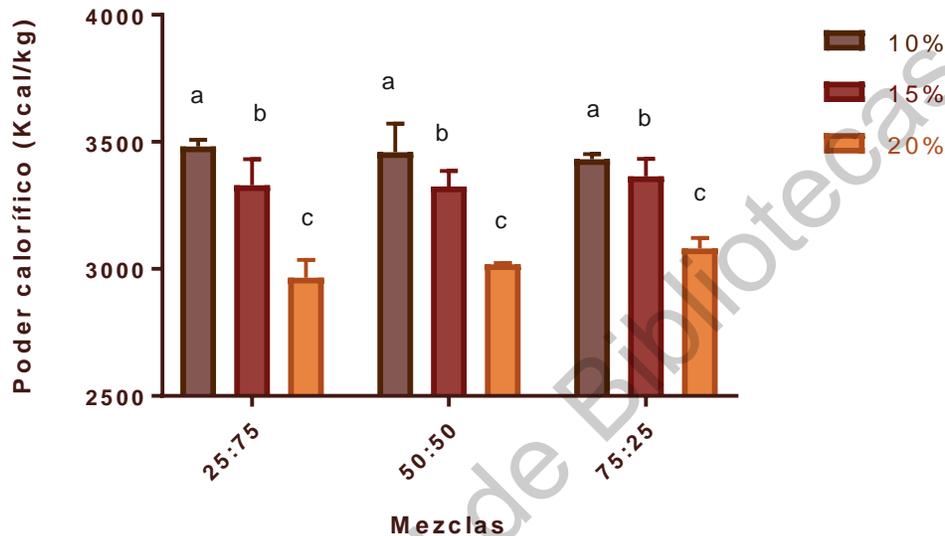


Figura 30. Análisis estadístico en relación al poder calorífico en pellets.

El efecto de la humedad fue claro debido a que al aumentar la cantidad de humedad inicial en la biomasa se tiene una reducción en el poder calorífico; lo anterior es debido a que al tener altos valores de humedad implicaría que parte del calor es inicialmente consumido en la evaporación del agua, por lo que los pellets deben contener la menor cantidad de humedad final posible (Miranda et al., 2018). En esta investigación la humedad de 20.0 % fue la que obtuvo los resultados más bajos de contenido energético con una media de 3021.51 kcal/kg. Con la humedad de 10.0% fue posible obtener valores de poder calorífico de hasta 3475.26 Kcal/ kg. El pellet de mayor humedad quedó por debajo del valor de referencia de la norma que indica un rango de 3511-4538 Kcal/Kg, mostrando la influencia negativa de la humedad en el poder calorífico.

6.4.7 Análisis de pellets en función de diámetro

No hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) en diámetro entre diferentes contenidos de humedad ni entre tratamientos de diferentes proporciones de biomasa (Figura 31).

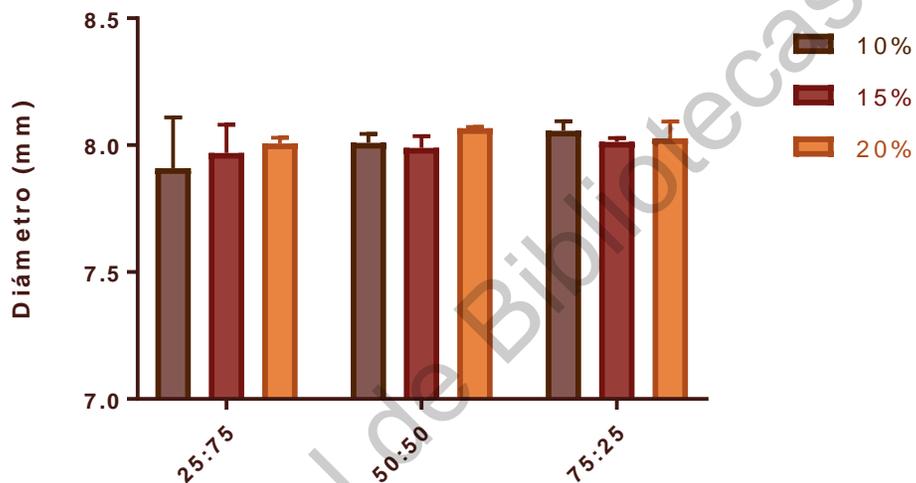


Figura 31. Análisis estadístico en relación al diámetro en pellets.

Comparando los resultados obtenidos con las especificaciones de la norma se observa que los pellets cumplen con el rango establecido por la norma de 6-8 mm; ya que el valor medio para los pellets elaborados de cáscara de arroz y paja de frijol es de 7.99 mm, el cual es similar a la matriz de formado utilizada con diámetro de 8 mm.

6.4.8 Análisis de pellets en función de longitud

La longitud de los pellets mostró diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre los diferentes tipos de humedades, mientras que no hubo diferencias estadísticas entre las diferentes mezclas (Figura 32).

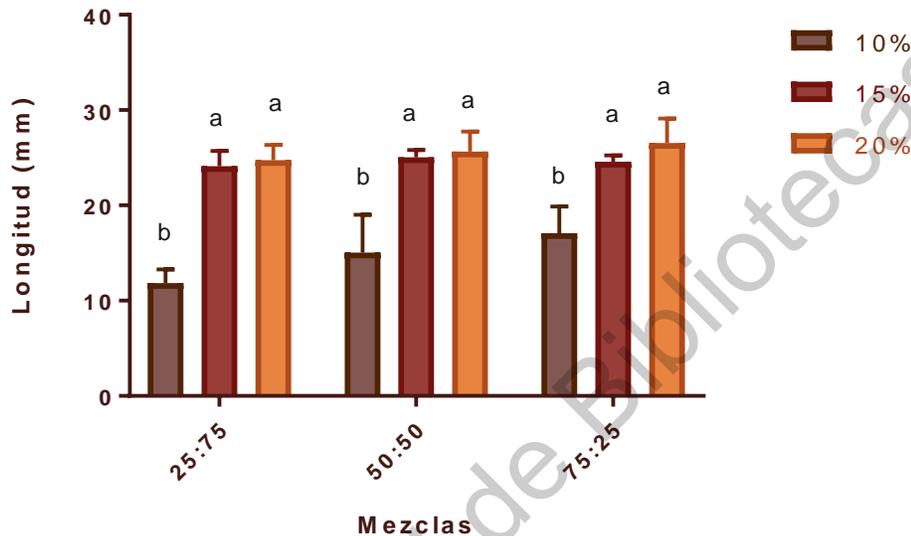


Figura 32. Análisis estadístico en relación a la longitud en pellets.

Se observa que al aumentar la humedad se tiene un incremento en la longitud, ya que la presencia de humedad aumenta las fuerzas de van der Waals, lo que aumenta la atracción entre las partículas de biomasa (Mani, 2003). Las longitudes no mostraron diferencias significativas en los diferentes tratamientos de 15% y 20% de humedad, donde se observaron longitudes en un intervalo de 23.01 mm a 28.05 mm, cumpliendo ambas humedades con especificaciones de la norma ISO 17225-6 que determina longitudes entre 15 mm y 40 mm. Para las humedades de 10% se determinó un valor medio de 14.65 mm por lo tanto no cumple con lo establecido.

6.4.9 Análisis de pellets en función de densidad unitaria

La densidad unitaria de los pellets mostró diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre los diferentes tipos de humedades, mientras que no hubo diferencias estadísticas entre las diferentes mezclas (Figura 33).

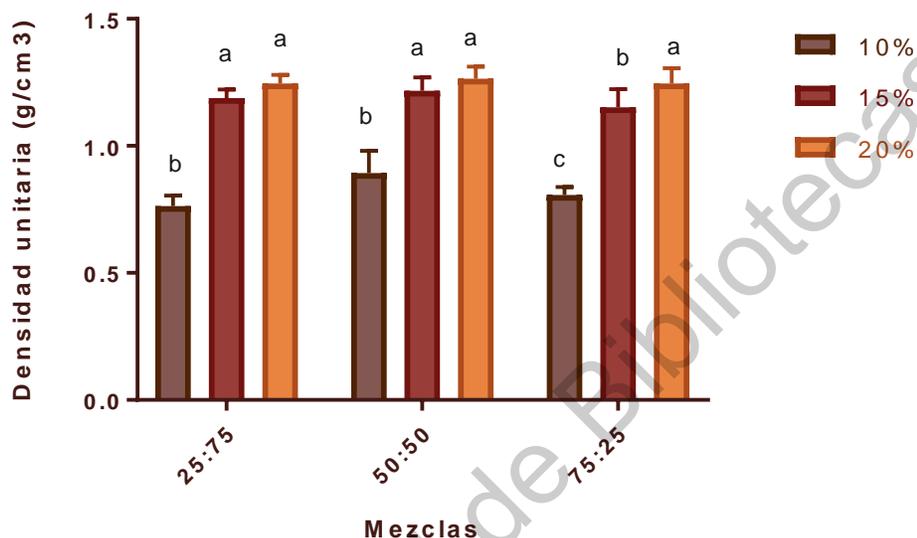


Figura 33. Análisis estadístico en relación a la densidad unitaria en pellets.

Se observa que al aumentar la humedad de los pellets se tiene una mayor densidad, y esto se explica por la presencia de agua; ya que el agua tiene una mayor densidad que la biomasa seca, entonces entre mayor presencia de agua exista en el pellet mayor será la densidad del pellet. A pesar de que se evapora parte del agua por la acción de la presión y temperatura en el equipo de densificado, siempre queda parte de ella en el pellet; entre más agua se tenga al inicio más difícil será eliminarla, por ello a mayor humedad inicial mayor densidad.

6.4.10 Análisis de pellets en función de densidad a granel

La densidad a granel de los pellets mostró diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre los diferentes tipos de humedades, mientras que no hubo diferencias estadísticas entre las diferentes mezclas (Figura 34).

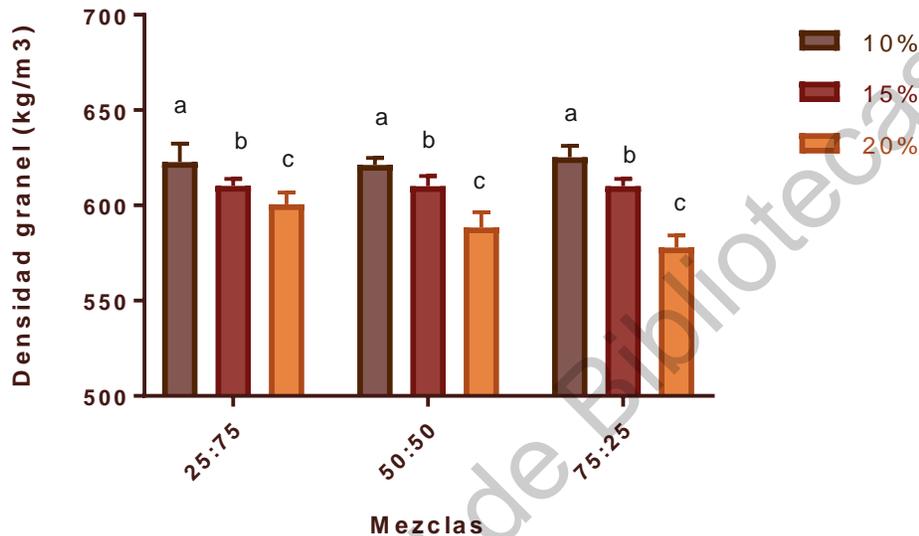


Figura 34. Análisis estadístico en relación a la densidad a granel en pellets.

La norma ISO 17225-6 se especifica que la densidad a granel debe ser por lo menos de 600 kg/m^3 , por lo que los tratamientos con humedad inicial de 10% y 15% se encuentran dentro de lo establecido por la norma con 623.11 kg/m^3 y 610.17 kg/m^3 , respectivamente. Se observa que a humedades altas disminuye la densidad a granel de los pellets. Con un valor de humedad de 20.0% se obtuvieron menores densidades a granel con un valor medio de 588.97 kg/m^3 . La longitud de estos pellets fue mayor, lo que provocó que fueran menos pellets los que ocuparan el espacio del contenedor; y por lo tanto quedaron espacios vacíos que no pudieron ser ocupados, ocasionando las bajas densidades. También hay que considerar que la humedad favorece a la expansión volumétrica, lo que disminuye la densidad a granel o aparente (Theerarattananon et al., 2011; McKeown et al., 2016).

6.4.11 Análisis de pellets en función de durabilidad

La durabilidad de los pellets mostró diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre los diferentes tipos de humedades, mientras que no hubo diferencias estadísticas entre las diferentes mezclas (Figura 35).

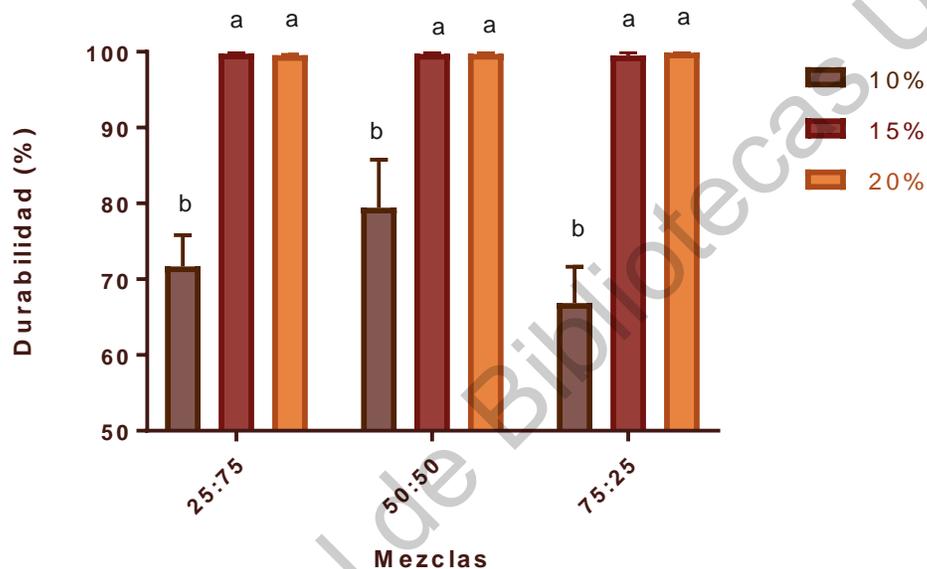


Figura 35. Análisis estadístico en relación a durabilidad en pellets.

La norma ISO 17225-6 especifica que la durabilidad mecánica debe ser ≥ 97.5 . La durabilidad promedio para humedades de 15% y 20% fue de 99.67 y 99.73, respectivamente; por lo que ambos tratamientos se encuentran dentro de lo establecido por la norma. 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. Para pellets elaborados con humedades de 10% se obtuvo 72.66% de durabilidad.

6.5 Determinación de las proporciones de mezcla para cumplir con estándares de acuerdo a la norma

La Metodología de la Superficie de Respuesta es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para modelar y analizar problemas en los que una variable de interés es influenciada por otras; y donde el objetivo generalmente es el de optimizar (maximizar, minimizar u obtener un punto de silla) esa respuesta (Chacin, 2000). El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta. Esto se logra al determinar las condiciones óptimas de operación del sistema.

Utilizando el Software JMP para realizar el análisis de superficie de respuesta se obtuvo el modelo de la superficie de repuesta que se muestra en la Figura 36.

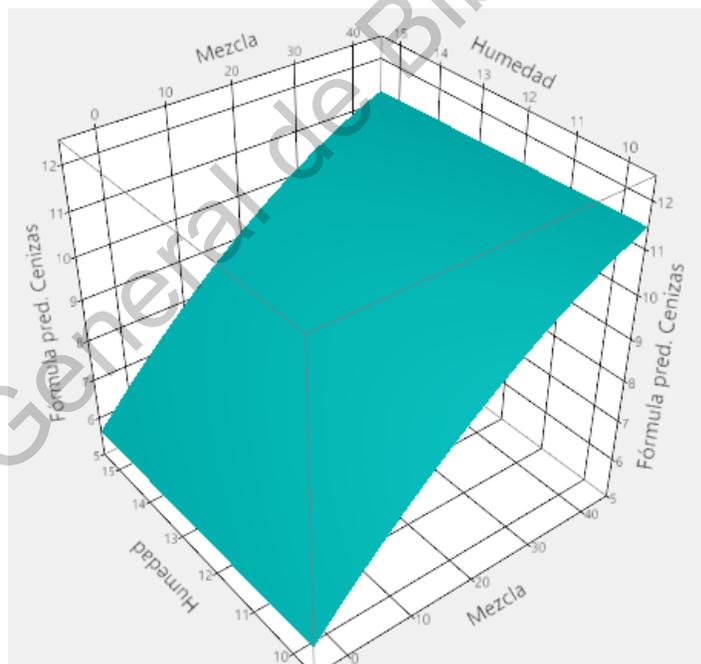


Figura 36. Diseño de superficie de respuesta

El análisis se realizó principalmente de cenizas y poder calorífico, ya que esos mostraron valores fuera de lo establecido de acuerdo a la norma. Se determinó que

el empleo de materia prima con 14-15.0% de humedad inicial y una mezcla de biomasa con 90% paja de frijol y 10% cáscara de arroz permitiría obtener pellets con un poder calorífico de 3645.78 kcal/kg, 6.98-7% de cenizas, humedad final de 9.76%, densidad a granel de 610.78 kg/m³, durabilidad de 99.51%. El resto de los parámetros evaluados en la norma se cumplirán; dichos parámetros son longitud, diámetro, y nitrógeno. El porcentaje de material volátil y carbono son similares a los reportados para otras biomásas de estudio.

6.5 Simulación del proceso de gasificación de los pellets

En la Tabla 8 se muestran las fracciones obtenidas de cada elemento, mismas que serán ingresadas al siguiente reactor para continuar con el proceso de gasificación.

Tabla 8. Resultados obtenidos en el reactor YIELD.

Componente	Fracción molar
H₂	0.065
O₂	0.42
C	0.472
N₂	0.043

En la Tabla 9 se observan las fracciones másicas obtenidas en el syngas producido en el reactor de Gibbs, donde se observa que a mayor temperatura hay un mayor contenido de monóxido de carbono, así como de hidrógeno; los datos obtenidos coinciden con lo reportado por autores como Skoulou et al., 2008 quienes mencionan que un incremento en la temperatura hace factibles reacciones que promueven la producción de los compuestos antes mencionados.

Tabla 9. Composición molar de syngas y LHV para pellets de cáscara de arroz y paja de frijol utilizando el modelo ASPEN Plus.

Composición syngas, fracciones molares					
Temperatura °C	CO	H₂	CO₂	CH₄	LHV (MJ/Nm³)
700	0.3532	0.4669	0.1534	0.0227	10.6724
800	0.3792	0.4883	0.1272	0.0017	10.49955
900	0.3811	0.4899	0.1252	0.0001	10.484855
1000	0.3813	0.4901	0.1250	1.8692E ⁻⁰⁵	10.484892

A partir de las fracciones molares de la composición del syngas se calculó el valor mínimo de calor (LHV) a varias temperaturas donde se observa un rango de 10.48 a 10.67 MJ/Nm³; dichos valores no tienen diferencia significativa entre ellas, por lo que la temperatura que se propone para llevar a cabo la gasificación de biomasa es a 700°C ya que se obtienen resultados similares con menor gasto energético.

De acuerdo al poder calorífico final del syngas será el uso que se le pueda dar; ya que, si el poder calorífico del syngas se encuentra en 5 MJ/Nm³, éste se usa para motores de combustión interna convencionales; por otro lado, si su poder calorífico es de 30 MJ/Mn³ puede sustituir al gas natural. Como resultado de la simulación, se encontró syngas con un poder calorífico de 10.67 MJ/Mn³, el cual puede ser utilizado en producción de metanol y gasolina sintética.

Por otro lado, la energía excedente del proceso representada como Q-GASFY puede ser aprovechada en forma de calor sensible, el cual se calcula mediante la ecuación 8:

$$Q = mC_e(T_2 - T_1) \quad (\text{Ec.8})$$

Donde:

Q= cantidad de calor expresado en MJ/hr

m= flujo másico expresado en kg/hr

C_e = capacidad calorífica a presión constante expresado en MJ/kg°C

T_2 = Temperatura de saturación del agua en °C a 0.80 atm de presión

T_1 = Temperatura a 25°C

Al despejar m de la ecuación 8 y sustituyendo Q del valor obtenido de la simulación de pellets se obtiene:

$$m = \frac{4.102 \text{ MJ/hr}}{0.004186 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \text{C} (94^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})} = 14.20 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

Es decir, es posible calentar 14.20 kg/hr de agua saturada con el calor contenido en la corriente de syngas. Como se mencionó en la metodología, el syngas puede ser empleado para producir otros biocombustibles; no obstante, esta alternativa queda fuera del alcance del presente proyecto.

7. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio para determinar el uso potencial de cáscara de arroz y paja de frijol en la producción de pellets como biocombustible; para tal fin se establecieron dos factores de control: porcentaje de humedad y proporción de biomasa.

Los pellets elaborados con 25% de cáscara de arroz y 75% de paja de frijol al 15% de humedad mostraron: 9.98% de humedad final; 83% de compuestos volátiles; 9.84% de cenizas; 47.39% de carbono; 0.52% de nitrógeno; 14.07 MJ/kg; 7.97 mm de diámetro; 24.12 mm de longitud; 613.27 kg/m³ y 99.75% de durabilidad. Aunque algunos parámetros cumplen con la norma, el contenido de cenizas y el poder calorífico se encuentran fuera de los valores establecidos.

De acuerdo al análisis mediante el programa JMP se determinó que las mejores condiciones fueron el empleo de 15.0% de humedad inicial y una mezcla de biomasa con 90% paja de frijol y 10% cáscara de arroz; con dichas variables se obtuvieron pellets con un poder calorífico de 3414.59 kcal/kg, 9.50% de cenizas en peso seco, una humedad final de 9.69%, una densidad a granel de 613.89 kg/m³, durabilidad de 99.81%. El resto de los parámetros evaluados en la norma se cumplieron, los cuales incluyen longitud, diámetro, y nitrógeno. El porcentaje de material volátil y carbono son similares a los reportados para otras biomásas de estudio. Dado el alto contenido de cenizas es probable que se presenten problemas de disposición de residuos. El hecho de usar las mezclas reduce el contenido de cenizas y nitrógeno, y aumenta el poder calorífico respecto a si se usara sólo una biomasa.

Finalmente, se llevó a cabo la simulación del proceso de gasificación utilizando el Software Aspen Plus para determinar el potencial de utilizar los pellets obtenidos para la generación de syngas. Los resultados mostraron que a una temperatura de 700°C es posible obtener syngas con un valor mínimo de calor de 10.6724 MJ/Nm³.

La energía excedente del proceso de gasificación permite generar 13.81 kg/hr de vapor al suministrar 4.102 MJ/hr de calor.

Trabajo futuro

- Realizar el análisis del efecto de presión y la temperatura en las características finales del pellet.
- Determinar la influencia del uso de un aglutinante en el poder calorífico y durabilidad.
- Usar distintas mezclas de biomásas para determinar aquellas que cumplen con los estándares establecidos por la norma. A su vez realizar el modelado de gasificación con dichas mezclas.

8. REFERENCIAS

- Adnan, M. A., & Hossain, M. M. 2018. Gasification performance of various microalgae biomass—A thermodynamic study by considering tar formation using Aspen plus. *Energy conversion and management*, 165, 783-793.
- Aguas, M. C. M., Villarreal, E. A. S. 2016. Evaluación De La Capacidad Calorífica De Biocombustible Sólido A Partir De Residuos Lignocelulósicos De Café (*Coffea Spp*) Frente A Leña De Espino (*Vachellia Macracantha*) Y Eucalipto (*Eucalyptus Globulus Labill*). *Revista científica axioma*, (15), 35-41.
- Alakangas, E., Valtanen, J., Levlin, J. E. 2006. CEN technical specification for solid biofuels—Fuel specification and classes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 908-914.
- Amirta, R., Anwar, T., Suwinarti, W. 2018, April. Trial production of fuel pellet from *Acacia mangium* bark waste biomass. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 144, No. 1, p. 012040). IOP Publishing.
- Andriani, D., Atmaja, T. D., Arifin, M., & Rajani, A. (2019, June). A review: Biomass-based fuel pellet usage in biomass gasifier-an optimization on non-wood material. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 293, No. 1, p. 012010). IOP Publishing.
- APHA. 1999. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. En: American Public Health Association, Washington DC.
- Arias Ortíz, R. A., Meneses Cruz, J. D. 2016. Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol, Laboratorios de Química UNAN-Managua I-II semestre 2016 (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua).

Arshadi, M., Gref, R., Geladi, P., Dahlqvist, S. A., Lestander, T. 2008. The influence of raw material characteristics on the industrial pelletizing process and pellet quality. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1442-1447.

Balat, M., Balat, H. 2010. Progress in biodiesel processing. *Applied energy*, 87(6), 1815-1835.

Baltazar Laura, A. 2016. Obtención de biocombustible sólido de segunda generación a partir de tallos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) y hojas de eucalipto (*Eucaliptus globulus* Labill), con máxima potencia calorífica.

Barragán, B. A. Téllez, A. Laguna. 2008. "Utilización de residuos agroindustriales," *Revista Sistemas Ambientales*, vol. 2, no. 1, 2008, pp. 44-50.

Berastegui Barranco, C., Ortega Rodríguez, J. P., Mendoza Fandiño, J. M., González Doria, Y. E., Gómez Vasquez, R. D. 2017. Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tusa de maíz, bioaglomerante de yuca y carbón mineral del departamento de Córdoba. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 25(4), 643-653.

Boada, L. E. A., Vargas, F. E. S. 2015. Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual. *Informador técnico*, 79(1), 18-25.

Bustamante, C. A. G., Cerutti, O. M. 2017. Estado del arte de la bioenergía en México.

Callejas, E. S., Quezada, V. G. 2009. Los biocombustibles. *El cotidiano*, (157), 75-82.

Cancho Franco, D. 2016. Estudio de los parámetros de pelletizado de residuos biomásicos en pelletizadora semi-industrial . Tesis de Licenciatura.

Castellano, J. M., Gómez, M., Fernández, M., Esteban, L. S., Carrasco, J. E. 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. *Fuel*, 139, 629-636.

Clarke, S., Preto, F. 2011. Biomass Densification for Energy Production. Recuperado el 09 de 2016, de <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/11-035.htm>

Dhanavath, K. N., Shah, K., Bhargava, S. K., Bankupalli, S., Parthasarathy, R. 2018. Oxygen–steam gasification of karanja press seed cake: Fixed bed experiments, ASPEN Plus process model development and benchmarking with saw dust, rice husk and sunflower husk. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 3061-3069.

Demirbas, A. 2004. Effect of initial moisture content on the yields of oily products from pyrolysis of biomass. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 71(2), 803-815.

Duarte, Á. T., Borges, A. R., Zmozinski, A. V., Dessuy, M. B., Welz, B., de Andrade, J. B., Vale, M. G. R. (2016). Determination of lead in biomass and products of the pyrolysis process by direct solid or liquid sample analysis using HR-CS GF AAS. *Talanta*, 146, 166-174.

E.A. 2010. 30 key Energy Trend in the IEA and worldwide. Paris. IEA. 35.

Felfli, F. F., Luengo, C. A., Suárez, J. A., Beatón, P. A. 2005. Wood briquette torrefaction. *Energy for sustainable development*, 9(3), 19-22.

Fernández-Puratich, H., Oliver-Villanueva, J. V., Valiente, M., Verdú, S., Albert, N. 2014. Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. *Madera y bosques*, 20(3), 97-111.

Forero Nunez, C. A., Jochum, J., Sierra Vargas, F. E. 2012. Characterization and feasibility of biomass fuel pellets made of Colombian timber, coconut and oil palm residues regarding European standards. *Environmental biotechnology*, 8.

Forero-Nuñez, C. A., Jochum, J., Sierra, F. E. 2015. Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets. *Ingeniería e Investigación*, 35(1), 17-23.

García Bustamante C. A., Masera Cerutti Omar. 2016. Estado del arte de la Bioenergía en México. Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt.

García-Maraver, A., Rodríguez, M. L., Serrano-Bernardo, F., Díaz, L. F., Zamorano, M. 2015. Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees. *Fuel processing technology*, 129, 1-7.

Garrido, S. G. 2009. Centrales termoeléctricas de biomasa, Madrid, Renovetec.

González E. José, Cortés Lira Leonel, Sánchez Rodríguez Álvaro. 2010. Calorimetría adiabática y sus aplicaciones. Instituto Tecnológico de Celaya. Centro Nacional de Metrología. División de Termometría/Área de Metrología Eléctrica. Querétaro.

González, D. L. 2013. Valorización de Biomasa de origen vegetal mediante procesos térmicos y termoquímicos (Tesis Doctoral Universidad de Castilla-La Mancha).

Guo, M., Song, W., Buhain, J. 2015. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712-725.

Hakeem, K. R., Jawaid, M., Alothman, O. Y. (Eds.). 2015. Agricultural biomass based potential materials. Springer.

Hakeem, K. R., Jawaid, M., Rashid, U. (Eds.). 2014. Biomass and bioenergy: Applications. Springer.

Holubčík, M., Jachniak, E., Jandačka, J. 2015. Utilization of materials from agriculture to produce pellets. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 17(2).

IEA. World energy Outlook 2013. Paris, France: International Energy Agency

INL. 2010. A review on Biomass Densification Technologies for Energy Application. Recuperado el 09 de 2016, de <https://inldigitallibrary.inl.gov/sti/4886679.pdf>

IPCC, 2011. Climate change – 2011: The physical science basis. Summary for policymakers. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Ginebra: IPCC. 21 pp.

IPCC. 2013. Climate change 2013-the physical science basis. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Islas-Sampeiro, J.,A. Martínez-Jiménez. 2010. Bioenergía. *Ciencia, Revista de la Academia Mexicana de Ciencia* 61:30-39.

Jain, A. K., & Goss, J. R. (2000). Determination of reactor scaling factors for throatless rice husk gasifier. *Biomass and Bioenergy*, 18(3), 249-256.

Kalra, YP and DG Maynard. 1991. *Methods manual for forest soil and plant analysis*, Minster of supply and services, Edmonton, Canada.

Kusumaningrum, W. B., y S. Sofyan-Munawar. 2014. Prospect of Bio-pellet as an Alternative Energy to Substitute Solid Fuel Based. *Energy Procedia*. 47:303– 309.

Lehtikangas, P. 2001. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and bioenergy*, 20(5), 351-360.

Liu, Z., Fei, B., Jiang, Z., Cai, Z. 2014. Important properties of bamboo pellets to be used as commercial solid fuel in China. *Wood science and technology*, 48(5), 903-917.

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>

Mani, S., Tabil, L. G., Sokhansanj, S. 2003. An overview of compaction of biomass grinds. *Powder Handling Process*. 15, (3), 160-168.

Miranda, M. T., F. J. Sepúlveda, J. I. Arranz, I. Montero, C. V. Rojas. 2018. Physical-energy characterization of microalgae *Scenedesmus* and experimental pellets. *Fuel*, vol. 226, p. 121-126. doi:10.1016/j.fuel.2018.03.097. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.097>

Nishiguchi, S., y T. Tabata. 2016. Assessment of social, economic, and environmental aspects of woody biomass energy utilization: Direct burning and wood pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 57: 1279–1286. doi:10.1016/j.rser.2015.12.213. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.213>

Norma Oficial Mexicana. "Determinación del Poder Calorífico en Desechos Sólidos". DGN-AA-33-1976. México, D.F., a 11 de marzo de 1976.

Obernberger, I., Thek, G. 2010. *The pellet handbook* (1st ed.). London-Washington DC: Earthscan

Obidziński S. 2014. Pelletization of biomass waste with potato pulp content. *International Agrophysics*, 28(1)., pp. 85-91

Ortíz Torres Luis. 2008. Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España. Universidad de Vigo. España.

Pambudi, N. A., Torii, S., Saptoadi, H., Sumbodo, W., Syamsiro, M., Surono, U. B. 2010. Experimental study on combustion of biobriquettes *Jatropha curcas* solid waste. *J. Environ. Eng. Manage*, 20(2), 133-136.

Poddar, S., Kamruzzaman, M., Sujan, S. M. A., Hossain, M., Jamal, M. S., Gafur, M. A., Khanam, M. 2014. Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value. *Fuel*, 131, 43-48.

Quiceno Villada, D., Mosquera Gutiérrez, M. Y. 2010. Alternativas tecnológicas para el uso de la cascarilla de arroz como combustible (Tesis Licenciatura, Universidad Autónoma de Occidente).

Relova, I., Vignote, S., León, M. A., Ambrosio, Y. 2009. Optimisation of the manufacturing variables of sawdust pellets from the bark of *Pinus caribaea* Morelet: Particle size, moisture and pressure. *Biomass and Bioenergy*, 33(10), 1351-1357.

Rincón Rincón, S. N., González Castillo, Y. A. 2018. Estudio de factibilidad para la fabricación de pellets a partir de material lignocelulósico proveniente de palma de aceite.

Ríos-Badrán, I. M., Luzardo-Ocampo, I., García-Trejo, J. F., Santos-Cruz, J., Gutiérrez-Antonio, C. 2020. Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. *Renewable Energy*, 145, 500-507.

Rojas Valdivia, A. M. 2004. Prefactibilidad Técnica y Económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera. Tesis Ing. Forestal. Santiago, Chile. Universidad de Chile. Escuela de Ciencias Forestales: 22-26.

Rojas, S., Jumo, N. 2017. Generación de pellets y compost a partir de residuos agrícolas.

Said, N., García-Maraver, A., Zamorano, M. 2015. Influence of densification parameters on quality properties of rice straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 138, 56-64.

Saidur, R., E. Abdelaziz, A. Demirbas, M. S. Hossain, y S. Mekhilef. 2011. Renewable and sustainable energy reviews, 15(5), 2262-2289. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>

Saval, S. 2012. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. BioTecnología, 16(2), 14-46.

Scharlemann, J. P., Laurance, W. F. 2008. How green are biofuels? Science, 319(5859), 43-44.

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NMX-F-066-S-1978. Determinación de cenizas en alimentos. Dirección General de Normas. 1978

Secretaría de Salud. PROY-NOM-211-SSA1-2002. Proyecto de norma oficial mexicana, productos y servicios. Métodos de prueba fisicoquímicos. Determinación de humedad y sólidos totales en alimentos por secado en estufa. Determinación de arsénico, cadmio, cobre, cromo, estaño, hierro, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio y zinc en alimentos, agua y hielo aptos para consumo humano, bebidas y aditivos alimentarios por espectrofotometría de absorción atómica. Diario Oficial de la Federación. 2003..

Shan, M., Li, D., Jiang, Y., Yang, X. 2016. Re-thinking china's densified biomass fuel policies: Large or small scale?. Energy policy, 93, 119-126.

Shibu, J., Thallada, B. 2015. Biomass and biofuels. Advanced biorefineries for sustainable production and distributio. Boca Raton: Taylor and Francis Group.

Tauro R., Ghilardi A., García C., Masera O. 2016. Recursos biomásicos. In: García C, Masera O, editors. Estado del Arte la Bioenergía en México. México, DF: Imagia Comunicación; 2016. p. 13–26.

Tauro, R.; García, C.A.; Skutsch, M.; Masera, O. 2018 The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. Renew. Sustain. Energy Rev. 82, 380–389.

Tojes, P.J. 2015. Caracterización energética del densificado de aserrín como un biocombustible, pellet, utilizando tres diferentes aglutinantes: arcilla, almidón y yeso. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Tsuchiya, Y., Yoshida, T. 2017. Pelletization of brown coal and rice bran in Indonesia: Characteristics of the mixture pellets including safety during transportation. Fuel Processing Technology, 156, 68-71.

Tumuluru, J., Wright, C., Hess, R., Kenney, K. 2011. A review of biomass densification system to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. Biofuels, Bioproducts y Biorefining, 5, 683-707.

Whittaker, C., Shield, I. 2017. Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 71, 1-11.

Zamudio, D. T. 2019. Producción de pellets de residuos de cultivo de frijol con máximo contenido energético.