

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Maestría en Ciencias de la Energía

**PRODUCCIÓN DE PELLETS DE RESIDUOS DE CULTIVO DE FRIJOL CON
MÁXIMO CONTENIDO ENERGÉTICO**

TESIS

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

PRESENTA

DANIEL TREJO ZAMUDIO

DIRIGIDO POR

Dra. CLAUDIA GUTIÉRREZ ANTONIO

CO-DIRIGIDO POR

Dr. JUAN FERNANDO GARCÍA TREJO

Santiago de Querétaro, Querétaro, Noviembre, 2018.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Maestría en Ciencias de la Energía

PRODUCCIÓN DE PELLETS DE RESIDUOS DE CULTIVO DE FRIJOL CON
MÁXIMO CONTENIDO ENERGÉTICO

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

PRESENTA
I.Q. Daniel Trejo Zamudio

DIRIGIDO POR
Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

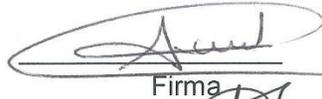
Dra. Claudia Gutiérrez Antonio
Presidente


Firma

Dr. Juan Fernando García Trejo
Secretario


Firma

Dr. José Santos Cruz
Vocal


Firma

Dr. Eduardo Castaño Tostado
Suplente


Firma

Dra. Sandra Andrea Mayén Hernández
Suplente


Firma


Dra. Silvia Lorena Amaya Llano
Directora de la Facultad de Química


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

Centro Universitario
Querétaro, Qro
Noviembre, 2018



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Maestría en Ciencias de la Energía

**PRODUCCIÓN DE PELLETS DE RESIDUOS DE CULTIVO DE FRIJOL CON
MÁXIMO CONTENIDO ENERGÉTICO**

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

PRESENTA
I.Q. Daniel Trejo Zamudio

DIRIGIDO POR
Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio
Presidente

Firma

Dr. Juan Fernando García Trejo
Secretario

Firma

Dr. José Santos Cruz
Vocal

Firma

Dr. Eduardo Castaño Tostado
Suplente

Firma

Dra. Sandra Andrea Mayén Hernández
Suplente

Firma

Dra. Silvia Lorena Amaya Llano
Directora de la Facultad de Química

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

Centro Universitario
Querétaro, Qro
Noviembre, 2018

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se emplearon residuos de cultivo del frijol de la especie conocida como Flor de Mayo, proveniente de la cosecha de 2017, para la producción de un biocombustible sólido en forma de pellet. Los residuos consistieron en el tallo, las hojas y vaina de la planta; procurando que los residuos estuvieran libres de semillas y raíces para evitar cantidades altas de nitrógeno que promovieran la formación de óxidos de nitrógeno durante la combustión. Se eligieron estos residuos por ser de los menos estudiados para la producción de biocombustibles sólidos, ya que proceden de una leguminosa y la mayoría de estudios se enfocan en residuos leñosos y gramíneos. La densificación del residuo se realizó en una pelletizadora de rodillos, siguiendo un diseño de experimentos de 3^2 , mediante el control de los factores de humedad inicial en niveles de 10.0 %, 15.0 % y 20.0 %, y tamaño de partícula con niveles de 3.97 mm, 8.0 mm y 12.7 mm. Al final de la investigación se obtuvo un pellet con poder calorífico superior de 16.097 MJ/kg, 5.3185 % de cenizas en peso seco, una humedad final de 11.679 %, una densidad a granel de 607 kg/m³. Asimismo, se obtuvo un rendimiento del 60.7 % sin recirculación, en condiciones de humedad inicial de 20.0 % y tamaño de partícula de 8.00 mm. Un resultado importante es que los pellets obtenidos de esta biomasa residual cumplen con especificaciones de la Norma ISO 17225-6, y son competitivos con otros residuos empleados en la producción de pellets con respecto al poder calorífico.

Palabras clave: pellet, frijol, biocombustibles sólidos, residuos agroindustriales

ABSTRACT

In the present research work, bean crop residues of the species known as Flor de Mayo, from the 2017 harvest were used for the production of a solid biofuel in the form of a pellet. The residues consisted of the stem, leaves and pod of the plant; trying that the residues were free of seeds and roots to avoid high amounts of nitrogen that promoted the formation of nitrogen oxides during combustion. These residues were chosen because they are the less studied for the production of solid biofuels, the bean crop residues come from a legume and most studies focus on woody and grass residues. The densification of the waste was carried out in a roller pelletizer, following an experimental design of 3^2 , by controlling the initial moisture at levels of 10.0 %, 15.0 % and 20.0 %, and particle size with levels of 3.97 mm, 8.0 mm and 12.7 mm. At the end of the investigation, a pellet with superior calorific value of 16.097 MJ/kg, 5.3185% of ash in dry weight, a final moisture of 11.679%, a bulk density of 607 kg/m³ was obtained. Likewise, a yield of 60.7 % without recirculation was obtained, under conditions of initial moisture of 20.0% and particle size of 8.00 mm. The pellets produced from this waste biomass comply with specifications of ISO 17225-6 standard, and are competitive with other waste used in the production of pellets in term of calorific value.

Keywords: pellet, beans, solid biofuels, agroindustrial residues

Agradecimientos

A Dios, por otorgarme la vida, la de mis padres y seres queridos. Gracias por permitir que pueda alcanzar una meta más.

Gracias a San Sebastián, por cuidar todos los días por mí y mi familia e interceder por mi ante Dios.

A mis padres Agustín y Elvia, por todo su amor y apoyo brindado, son los mejores padres del mundo y mi tesoro más preciado. Ustedes son el motivo más grande por seguir preparándome y mi más grande orgullo.

A hermanas Alejandra, Angelica y Yuly Alondra, por su cariño y apoyo, las mejores hermanas y amigas que alguien puede tener.

A mis profesores que tuve la oportunidad de conocer durante mi estancia en la UAQ, cada uno de ellos le agradezco por compartir conmigo parte de su experiencia y conocimiento para lograr este objetivo, en especial a la Dra. Claudia Gutiérrez Antonio, quien me apoyó y dirigió durante el proyecto de investigación, pero además me brindó su amistad, muchas gracias por todo.

A mis compañeros de generación, quienes me brindaron su amistad, apoyo y compartieron conmigo parte de sus conocimientos, de ustedes me llevo gratos recuerdos que atesoraré por siempre.

A la Secretaría de Energía (SENER) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado para la realización del proyecto por medio de la beca número **470901**.

Muchas gracias a todos ustedes.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	I
ÍNDICE DE TABLAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Preámbulo de la investigación	1
1.2. Descripción del problema	4
2. OBJETIVOS	6
2.1.1. General	6
2.1.2. Particulares	6
3. JUSTIFICACIÓN	7
4. ANTECEDENTES	9
4.1. Biocombustibles y su clasificación	9
4.2. Biomasa	11
4.3. Aglomerados energéticos o pellets	12
5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	16
5.1. Biomasa	16
5.2. Biomasa lignocelulósica	16
5.3. Frijol	18
5.4. Densificación	20
5.4.1. Contenido de humedad	22
5.4.2. Presión de formación	22
5.4.3. Temperatura de formación	23
5.4.4. Aglutinante	24

5.4.5.	Tamaño de partícula	25
5.4.6.	Poder calorífico.....	26
5.4.7.	Durabilidad	27
5.4.8.	Densidad	28
6.	METODOLOGÍA	30
6.1.	Materiales y Métodos	30
6.1.1.	Residuos del cultivo de frijol	30
6.1.2.	Molienda de biomasa.....	30
6.1.3.	Densificado de biomasa	32
6.1.4.	Calorímetro isoperibólico	33
6.1.5.	Otros instrumentos de medición	34
6.1.6.	Equipo de seguridad.....	37
6.2.	Descripción de laboratorio y espacio de densificado	38
6.3.	Recolección de residuos	38
6.4.	Caracterización química y física de los residuos del cultivo de frijol	39
6.4.1.	Determinación de humedad.....	40
6.4.2.	Determinación de cenizas	40
6.4.3.	Determinación de sólidos volátiles.....	41
6.4.4.	Determinación de contenido de carbono	42
6.4.5.	Determinación de contenido de nitrógeno	43
6.4.6.	Determinación del poder calorífico	43
6.5.	Pruebas preliminares de densificación, factor de control: humedad	44
6.6.	Pruebas preliminares de densificación, factor de control: tamaño de partícula	47
6.7.	Diseño de experimentos.....	47

6.8.	Limpieza de residuos	48
6.9.	Acondicionamiento	49
6.10.	Producción de pellets	50
6.11.	Medición de la longitud y diámetro de los pellets	52
6.12.	Densidad individual	52
6.13.	Densidad a granel de los pellets y materia prima.....	53
6.14.	Otras pruebas fisicoquímicas de los pellets	54
7.	RESULTADOS.....	55
7.1.	Caracterización inicial de la materia prima	55
7.2.	Resultados de las pruebas preliminares con formato de 6 mm, factor de control humedad, residuos de 2016	56
7.3.	Resultados de las pruebas preliminares con formato de 8 mm, factor de control humedad, residuos de 2016	59
7.4.	Resultados de las pruebas preliminares con formato de 8 mm, factor de control, tamaño de criba, residuos de 2017	63
7.5.	Resultados de los experimentos finales	67
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	71
8.1.	Análisis de resultados de pruebas preliminares	71
8.2.	Análisis de resultados del experimento final	71
8.2.1.	Análisis del rendimiento final	72
8.2.2.	Análisis del diámetro.....	76
8.2.3.	Análisis de la longitud	80
8.2.4.	Análisis de la densidad individual	84
8.2.5.	Análisis de la densidad a granel	88
8.2.6.	Análisis de la humedad final	92
8.2.7.	Análisis de contenido de cenizas finales	96

8.2.8. Análisis del contenido de carbono final.....	100
8.2.9. Análisis del poder calorífico superior	103
8.2.10. Análisis de perfiles	109
9. CONCLUSIONES	116
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
11. ANEXOS	128
Anexos 1. Humedades iniciales de algunos experimentos	128
Anexo 2. Temperatura de densificado	132

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Ejemplo de biomasas empleadas en la producción de pellets.	14
Tabla 2. Categorías de biomasa lignocelulósica. (Ullah et al., 2015).	17
Tabla 3. Métodos para caracterización de residuos.	39
Tabla 4. Tabla de tratamientos aleatorizados, diseño de experimento 3 ² con dos replicas.	49
Tabla 5. Resultados de la caracterización inicial de los desechos de la cosecha de 2016.	55
Tabla 6. Resultados de la caracterización inicial de los desechos de la cosecha de 2017.	56
Tabla 7. Determinaciones para los pellets con 3.81 % de humedad inicial.	57
Tabla 8. Determinaciones para los pellets con 5.0 % de humedad inicial.	57
Tabla 9. Determinaciones para los pellets con 20.0 % de humedad inicial.	58
Tabla 10. Promedio de las determinaciones realizadas a los pellets con diámetro de 6 mm.	58
Tabla 11. Determinaciones para los pellets con 8.5 % de humedad inicial.	59
Tabla 12. Determinaciones para los pellets con 15.0 % de humedad inicial.	60
Tabla 13. Determinaciones para los pellets con 20.0 % de humedad inicial.	60
Tabla 14. Promedio de las determinaciones realizadas a los pellets con diámetro de 8 mm.	61
Tabla 15. Determinaciones para los pellets con 20.0 % de humedad inicial y criba de 1 pulgada.	63

Tabla 16. Determinaciones para los pellets con 20.0 % de humedad inicial y criba de ½ pulgada.....	64
Tabla 17. Determinaciones para los pellets con 20.0 % de humedad inicial y criba de 5/32 pulgada.....	64
Tabla 18. Promedio de las determinaciones realizadas a los pellets con diámetro de 8 mm y humedad inicial de 20.0 %.....	65
Tabla 19. Velocidad de molienda en el molino de martillos.....	66
Tabla 20. Resultados de las determinaciones de densidad y rendimiento.....	68
Tabla 21. Resultados de las determinaciones químicas de los pellets.....	69
Tabla 22. Temperatura de formación de pellets.	70
Tabla 23. Análisis de efectos en el rendimiento.	74
Tabla 24. Análisis de efectos en el diámetro.....	78
Tabla 25. Análisis de efectos en la longitud.	82
Tabla 26. Análisis de efectos en la densidad individual.	87
Tabla 27. Análisis de efectos en la densidad a granel.	90
Tabla 28. Análisis de efectos en la humedad final.	94
Tabla 29. Análisis de efectos en las cenizas.....	98
Tabla 30. Análisis de efectos en el contenido de carbono.	101
Tabla 31. Análisis de los efectos en el poder calorífico.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ciclo de carbono al quemar biocombustibles.	11
Figura 2. Frijol Flor de Mayo.....	19
Figura 3. Residuos de cultivo de frijol.....	20
Figura 4. Molino de martillo.	31
Figura 5. Molino de martillo, vista superior.	31
Figura 6. Cribas de 3.97 mm y 12.7 mm.	32
Figura 7. Pelletizadora o densificadora de rodillos.	32
Figura 8. Matriz de formado de la densificadora.	33
Figura 9. Calorímetro 6200, utilizado para determinar el poder calorífico superior.	34
Figura 10. Balanza Precisa 321, empleada para determinar los pesos individuales y granel de los pellets.	35
Figura 11. Multímetro con termopar.	35
Figura 12. Vernier marca SH.....	36
Figura 13. Higrómetro de granos BENETECH.	36
Figura 14. Termo balanza marca OHAUS.....	37
Figura 15. Bomba de oxígeno del calorímetro isoperibólico.....	44
Figura 16. Pellets de con 8.50 % de humedad inicial.....	46

Figura 17. Proceso de densificado, etapa de limpieza y enfriado.	50
Figura 18. Pellets obtenidos para su posterior análisis en el Laboratorio.	51
Figura 19. Medición de la temperatura en la matriz de formado.	51
Figura 20. Dimensiones de un pellet, imagen basada en ISO 17225-6:2014.	52
Figura 21. Pellets de segunda prueba, elaborados con humedad inicial de 8.5 % y criba de 3.97 mm.....	62
Figura 22. Pellets de segunda prueba, elaborados con humedad inicial de 15 % y criba de 3.97 mm.....	62
Figura 23. Aglomerados obtenidos con criba de 1 pulgada de diámetro a humedad inicial de 20 %.	66
Figura 24. Análisis del rendimiento (%) en función de la humedad inicial (%).	73
Figura 25. Análisis del rendimiento (%) en función del diámetro de criba (mm)....	73
Figura 26. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad Inicial para la variable de respuesta de rendimiento.	75
Figura 27. Gráfico de residuales para análisis de rendimiento.....	76
Figura 28. Análisis de diámetro (mm) en función de humedad inicial (%) y prueba de Tukey.	77
Figura 29. Análisis de diámetro (mm) en función del tamaño de criba (mm).....	78
Figura 30. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad Inicial para la variable de respuesta de diámetro de pellet.....	79
Figura 31. Gráfico de residuales para análisis de diámetro de pellet.	80
Figura 32. Análisis de longitud (mm) en función de humedad inicial (%) y prueba de Tukey.	81

Figura 33. Análisis de longitud (mm) en función del diámetro de criba (mm) y prueba de Tukey.....	82
Figura 34. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad inicial para la variable de respuesta de longitud final.	83
Figura 35. Gráfico de residuales para análisis de longitud de pellets.....	84
Figura 36. Análisis de densidad individual (g/cm^3) en función de la humedad inicial (%) y prueba de Tukey.	85
Figura 37. Análisis de densidad individual (g/cm^3) en función del diámetro de criba (mm) y prueba de Tukey.	86
Figura 38. Gráfico de Interacción entre diámetro de criba y humedad inicial para la variable de respuesta de densidad individual.....	87
Figura 39. Gráfico de residuales para análisis de densidad individual.	88
Figura 40. Análisis de densidad a granel (kg/m^3) en función de la humedad inicial (%) y prueba Tukey.	89
Figura 41. Análisis de densidad a granel (kg/m^3) en función del diámetro de criba (mm) y prueba Tukey.	90
Figura 42. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad inicial para la variable de respuesta de densidad a granel.....	91
Figura 43. Gráfico de residuales para análisis de densidad a granel.	92
Figura 44. Análisis de la humedad final (%) en función de humedad Inicial (%) ...	93
Figura 45. Análisis de la humedad final (%) en función del diámetro de criba (mm).	94
Figura 46. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad inicial para la variable de respuesta de humedad final.....	95

Figura 47. Gráfico de residuales para análisis de humedad final.	96
Figura 48. Análisis de cenizas (%) en función de la humedad inicial (%).	97
Figura 49. Análisis de las cenizas (%) en función del diámetro de criba (mm).	98
Figura 50. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad inicial para la variable de respuesta de cenizas.	99
Figura 51. Gráfico de residuales para análisis de cenizas.	100
Figura 52. Gráfico de Interacción entre diámetro de criba y humedad inicial para la variable de respuesta COT.	102
Figura 53. Gráfico de residuales para análisis de COT.	103
Figura 54. Análisis del poder calorífico (MJ/kg) en función de la humedad inicial (%) y prueba Tukey.	105
Figura 55. Análisis del poder calorífico (MJ/kg) en función del diámetro de criba (mm).	106
Figura 56. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad Inicial para la variable de respuesta de Poder Calorífico Superior.	107
Figura 57. Gráfico de residuales para análisis de Poder Calorífico.	108
Figura 58. Resultado de predicción de perfiles, para condiciones de 20.0 % humedad inicial y criba de 8.0 mm.	111
Figura 59. Pellets de biomasa al 20.0 % de humedad inicial y criba de 8.0 mm.	112
Figura 60. Resultados de deseabilidad para las condiciones de 15.0 % humedad inicial y criba de 3.97 mm de diámetro.	113
Figura 61. Resultados de deseabilidad para las condiciones de 15.0 % de humedad inicial y criba de 8.00 mm de diámetro.	113

Figura 62. Pellets elaborados con humedad inicial de 15.0 % y tamaño de partícula de 3.97 mm.	114
Figura 63. Pellets elaborados con humedad inicial de 15.0 % y tamaño de partícula de 8.00 mm.	114
Figura 64. Pellets elaborados con humedad inicial de 10.0 % y tamaño de partícula de 8.00 mm.	114
Figura 65. Crecimiento de microorganismos en pellets producidos con 20% de humedad inicial y criba de 3.97 mm.	115

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Preámbulo de la investigación

Con el paso de los años la población ha ido en aumento, teniendo como consecuencia un incremento en la demanda de bienes y servicios; lo que a su vez ha provocado impactos desfavorables al ambiente, y por consecuencia a la salud de la población. La energía es un claro ejemplo del aumento en la demanda de los servicios; desde 1990 los requerimientos de energía primaria han tenido un incremento aproximado del 38% (Ullah et al., 2015).

Los combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural, representan las principales fuentes de energía en el mundo; aproximadamente el 80% de la energía que actualmente se consume proviene de estas fuentes (Saidur et al., 2011). Sin embargo, la combustión de éstos ha producido emisiones que han afectado al ambiente, generando lluvias ácidas y contaminación. Asimismo, los gases de efecto invernadero han causado un aumento en la temperatura global, teniendo efectos en el comportamiento climatológico y ocasionando que cada vez sean más frecuentes fenómenos que años atrás no eran imaginados; algunos de estos fenómenos incluyen la reducción de los casquetes polares, derretimiento de glaciares y nieve de montañas, inundaciones, sequías y daños a la salud de la población. Dentro de los gases de efecto invernadero se tiene al CO₂. Durante el 2013 se produjeron 32,189.7 millones de toneladas de CO₂ derivadas de la quema de combustibles en el mundo; de las cuales el 46% fueron procedentes de la combustión de carbón, 33% de la combustión de petróleo, 20% de gas, y el 1% restante fue producido por otras fuentes de energía, como la nuclear, geotérmica, solar, mareomotriz, eólica, hidráulica y biomasa. Considerando los diferentes sectores económicos, el que emitió mayor cantidad de CO₂ fue el de generación de electricidad y calor con un 42%, seguido del transporte con un 23% (International Energy Agency, 2015).

Actualmente, se han propuesto diversas estrategias para reducir las emisiones de CO₂, las cuales incluyen a la energía nuclear y a las energías renovables; en éstas

últimas se incluyen las energías solar, eólica y los biocombustibles (Saidur et al., 2011). En particular, los biocombustibles se definen como aquellos combustibles producidos a partir de biomasa procedente de las plantas. Los biocombustibles, al ser quemados, producen energía aprovechable como calor, luz y movimiento de manera similar a los combustibles fósiles (Guo et al., 2015).

Los biocombustibles se clasifican en primera, segunda y tercera generación, de acuerdo al tipo de materia prima empleado para producirlos. Así, los biocombustibles de primera generación hacen referencia a aquellos que se elaboran de cultivos que tienen un uso alimentario, ya sea animal o humano; por ejemplo, el bioetanol de caña de azúcar. Los biocombustibles de segunda generación son aquellos biocombustibles generados a partir de cultivos no comestibles, lo cual engloba a plantas, así como residuos de cultivos, de la elaboración de alimentos y orgánicos municipales (Taylor, 2010; Guo et al., 2015). Finalmente, los biocombustibles de tercera generación son aquellos producidos a partir de algas (micro y macro algas) y cianobacterias (llamadas también algas verdi azules), las cuales tienen altos rendimientos de carbohidratos, proteínas y aceites (Singh et al., 2016).

Así, los biocombustibles de primera generación se producen a partir de recursos empleados en la alimentación, mientras que los de tercera generación actualmente se encuentran en desarrollo. A diferencia de estos dos, los biocombustibles de segunda generación tienen la ventaja de aprovechar materias primas provenientes de una variedad de residuos de tierras agrícolas y de maderas sin ningún tipo de reclamación directa (Ullah et al., 2015). Además, los biocombustibles de segunda generación posibilitarían potenciar el desarrollo económico de áreas rurales, así como la creación de empleos. Asimismo, se podría aprovechar lo que en ocasiones es considerado como un factor de contaminación; tan sólo en el 2010 fueron producidos 2900 millones de toneladas de residuos agroindustriales en 25 países, incluyendo a México (Ullah et al., 2015). De estos residuos pueden producirse biocombustibles en estado líquido, sólido o gaseoso, mediante diferentes rutas de procesamiento.

En particular, dentro de los biocombustibles sólidos se encuentran la leña, astillas de madera, aserrín, pellets de madera y de biomasa diferente a la madera, así como el carbón vegetal. 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; que 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).

Actualmente los pellets han sido elaborados a partir de diversas materias primas, tales como residuos leñosos, desechos del cultivo del arroz, paja de trigo y rastrojo de maíz. Otros materiales han sido considerados como fuentes bioenergéticas potenciales, los cuales incluyen a la paja de frijol y tallos de algodón, pero aún sin aplicaciones en la producción de pellets; algunos más han sido estudiados en modelos de producción de pellets como la alfalfa y el pasto varilla (Sultana y Kumar, 2012).

En México no se cuenta con información estadística actualizada que permita tener un inventario sobre los residuos agrícolas generados, de acuerdo con Reyes-Muro et al. (2013). El último reporte publicado relacionado con la cuantificación de la producción de desechos de cultivos en México fue elaborado con datos de 2006; año en el que se estima que se generaron 75.73 millones de toneladas de materia seca proveniente de residuos agroindustriales, los cuales podrían ser transformados en bioenergía. De esta cantidad 60.13 millones de toneladas son desechos primarios de los cultivos, y los más abundantes, en orden descendente, son tallos de maíz, tallos de sorgo, hojas de caña de azúcar, y paja de trigo. Otros subproductos importantes son paja de cebada, paja de frijol y tallos de algodón. De manera particular, el frijol es uno de los productos más importantes en la dieta del

mexicano, de cuya producción se generan residuos, los cuales incluyen a la paja (tallos de la planta), hojas y vainas; se estima que en 2006 se generaron 1.75 millones de toneladas de estos residuos en México, dado que el frijol ocupa la segunda mayor cantidad de tierra cultivada en el país (Valdez-Vazquez et al., 2010). Actualmente, estos residuos se usan principalmente como alimento para ganado, y en recientes años se ha estudiado como fuente para la producción de biogás (Agencia Informativa Conacyt, 2015). Este residuo representa una fuente de biomasa potencial para diversas aplicaciones, ya que, aunque es empleado como forraje, éste no tiene una fuerte demanda. En muchas ocasiones, los residuos del cultivo de frijol son quemados o utilizados como abono en los campos de cultivo; sin embargo, podrían ser aprovechados en la producción de un biocombustible densificado, aplicación que no ha sido reportada en la literatura. Por este motivo, la presente investigación se enfoca en el aprovechamiento de los residuos del cultivo de frijol como materia prima para la elaboración de combustibles sólidos, específicamente pellets, de máximo contenido energético.

1.2. Descripción del problema

Durante el 2013 se produjeron 451.8 millones de toneladas de CO₂ en México, derivadas de la quema de combustibles (International Energy Agency, 2015). Esto a su vez representa un serio problema, ya que al ser uno de los principales gases de efecto invernadero contribuye al problema del cambio climático. El incremento de este gas es derivado de la quema de combustibles fósiles, los cuales emiten CO₂ que por muchos años no ha estado presente en el ciclo del carbono. (Saidur et al., 2011). Sumado a esto, México enfrenta problemas con la cantidad de desechos agrícolas que se generan todos los días, y que en muchas ocasiones no son empleados con otro fin; dichos residuos representan una importante fuente energética que actualmente no es totalmente aprovechada. Los biocombustibles son una alternativa para la utilización de esta biomasa, ya que aprovechan la energía almacenada en ella; y aunque generan CO₂ éste pertenece al ciclo del carbono natural, sin exceder su concentración en la atmósfera, ya que las plantas lo aprovechan durante la fotosíntesis.

Se estima que durante el 2006 en México se generaron 75.73 millones de toneladas de materia seca proveniente de residuos agroindustriales, los cuales podrían ser transformados en bioenergía. En particular, los desechos derivados del cultivo frijol son un problema, ya que de la cifra mencionada con anterioridad 1.75 millones de toneladas fueron producidos por el cultivo de esta planta (Valdez-Vazquez et al., 2010). En este contexto, los residuos del cultivo de frijol, compuestos por los tallos, las hojas y vaina de la planta seca y limpia, es decir sin la semilla y raíz; representan una fuente de biomasa potencial para diversas aplicaciones; ya que, aunque es empleado como forraje, éste no tiene una fuerte demanda. En muchas ocasiones este residuo es quemado o utilizado como abono en los campos de cultivo; sin embargo, podría ser aprovechado en la producción de un combustible densificado, aplicación que no ha sido reportada en la literatura. Los factores que influyen en el poder calorífico de los biocombustibles sólidos incluyen la humedad, la presión, la temperatura, así como la cantidad de aglutinante; aunque en muchas ocasiones, los parámetros de presión y temperatura no pueden ser controlados. Por ello, es de importancia determinar qué efecto tiene la humedad, así como el tamaño de partícula en el poder calorífico del pellet, sin afectar su resistencia y durabilidad. Considerando que no existe información en la bibliografía con respecto al empleo de residuos del cultivo de frijol se estudiaron estos dos factores, para conocer su efecto en el contenido energético de los pellets elaborados a partir de esta materia prima. Un aspecto relevante en esta investigación es la comparación de los resultados de contenido energético de los pellets de residuos del cultivo de frijol con los elaborados a partir de otros residuos, ya que esto permitirá determinar su potencial de empleo en zonas rurales con poco acceso a otros tipos de combustibles. Adicionalmente, esto ayudará a la sostenibilidad en términos energéticos de las zonas rurales, e inclusive, dependiendo de la cantidad de residuos disponibles, puede convertirse en una fuente de ingresos adicionales.

2. OBJETIVOS

2.1.1. General

Producir pellets a partir de residuos del cultivo de frijol con el mayor poder calorífico en función de humedad y tamaño de partícula.

2.1.2. Particulares

- Determinar el efecto de la humedad y del tamaño de partícula en las propiedades finales de los pellets, sobre todo rendimiento final, diámetro, longitud, densidad individual, densidad a granel, humedad final, cenizas y contenido de carbono.
- Determinar el efecto de la humedad y del tamaño de partícula en el poder calorífico final de los pellets producidos a partir de residuos de cultivo de frijol.
- Determinar los niveles de los factores de control que permitan la obtención de pellets con el mayor poder calorífico y mejores propiedades finales, mediante el análisis de resultados.

3. JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda energética y el empleo de los combustibles fósiles ha provocado un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero, sobre todo de CO₂; razón por la cual se han realizado esfuerzos por buscar alternativas energéticas. Una de ellas es el desarrollo de biocombustibles de segunda generación, los cuales aprovechan los residuos agroindustriales que en muchas ocasiones son una fuente de contaminación sin demanda directa. Así, con el empleo de estos residuos como materia prima se favorece a la protección del ambiente en dos aspectos: la reducción de desechos sólidos, y la obtención de nuevas fuentes energéticas que permitan la disminución de emisiones de CO₂.

Considerando que en México la agricultura produce una cantidad de desechos potencialmente aprovechables, cerca de 60.13 millones de toneladas de materia seca, se requiere buscar alternativas para utilizarlos para la producción de biocombustibles de segunda generación. De estos residuos, los provenientes del cultivo de frijol, componente básico de la dieta mexicana, suman 1.75 millones de toneladas; actualmente no se han realizado estudios de este residuo para su empleo como biocombustible, además de que no es muy demandado para otros usos. Por lo tanto, se propone la elaboración de biocombustibles densificados en forma de pellet que aprovechen este residuo, obteniendo el mayor aporte calorífico; que a su vez proporcione una nueva fuente de energía sustentable, teniendo como factores de control a la humedad y al tamaño de partícula. El uso de los residuos del cultivo de frijol permitirá diversificar las materias primas empleadas en la producción de pellets, posibilitando su empleo durante periodos donde otros tipos de materias son escasos; ya que el frijol puede ser cultivado en dos periodos al año, a su vez permitirá que la producción de pellets sea posible en zonas donde la producción de otras pajas o residuos son escasos o nulas obteniendo contenidos energéticos similares. Además, la determinación del empleo de tamaños de partículas superiores a los que actualmente se han estudiado permitirá la reducción en el consumo de energía durante el proceso de molienda, pudiendo en la práctica emplear molinos y cribas al alcance de las personas.

Así, la obtención de este combustible permite la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, promueve la reutilización de desechos agrícolas en México y el empleo de la energía almacenada por la biomasa; dicho biocombustible puede utilizarse para la obtención de calor, el cual puede ser aprovechado en calderas, centrales eléctricas, estufas, calentadores de agua y hornos, beneficiando también a comunidades donde el empleo de leña es todavía común.

4. ANTECEDENTES

4.1. Biocombustibles y su clasificación

El aumento en la demanda energética ha propiciado que se busquen nuevas alternativas energéticas, derivado de que las principales fuentes generadoras son no renovables y que su combustión es sumamente contaminante. Estas fuentes son los combustibles fósiles, principal fuente energética, y abarcan al petróleo, gas natural y carbón, principalmente. La quema de estos combustibles genera CO₂, gas de efecto invernadero que con el paso de los años ha ido en aumento. En el 2014 la concentración de CO₂ fue de 397 partes por millón (ppm), 40% más que a mediados de 1800s (International Energy Agency, 2015). Este aumento se debe al surgimiento de la era industrial y el aumento del consumo de los combustibles fósiles, principalmente el carbón. Por lo que desde hace algunos años las investigaciones se han enfocado en la búsqueda de nuevas alternativas, desarrollándose así los biocombustibles.

Un biocombustible es un carburante obtenido de materia vegetal o de algún residuo de origen orgánico, como grasas animales. Un biocombustible se puede obtener en estado líquido, sólido o gaseoso, dependiendo del tratamiento físico o químico al que sea sometida la materia prima.

Los biocombustibles por lo general tienen dos clasificaciones. La primera es en base al estado en que se encuentran: líquidos, como el bioetanol, el biodiésel, la bioturbosina, gaseosos, tales como el biohidrógeno, el syngas, y sólidos, como el carbón vegetal, la leña, las briquetas y los pellets. La segunda clasificación está basada en el origen de la materia empleada para su obtención, dando una clasificación por generaciones; de acuerdo con diversos autores, existen tres generaciones, aunque algunos ya consideran cuatro. Los biocombustibles de la primera generación se producen a partir de materias primas que también son utilizadas como alimentos; esta generación abarca a plantas ricas en azúcares, almidones y aceites. La caña de azúcar y el maíz son ejemplo de este tipo de materia prima, de ellas se pueden obtener etanol para motores de combustión

interna, como se ha llevado a cabo en los Estados Unidos y en Brasil; otro ejemplo es el aceite de soya y de girasol, de los cuales se puede obtener biodiésel. Sin embargo, existe un amplio debate en el uso de estas materias, debido a que pueden poner en riesgo la seguridad alimentaria, por lo que no es recomendable su empleo.

La segunda generación abarca cultivos no comestibles, y por lo general son conocidos como cultivos energéticos. Dentro de este tipo de materia prima se encuentra la llamada la biomasa lignocelulósica, la cual tiene como característica la presencia de lignina en su composición aparte de celulosa y hemicelulosa; ejemplo de ella son los pastos, de los cuales se pueden obtener alcohol o pellets. Otros ejemplos de esta generación son la jatrofa y la higuera, de los cuales se pueden obtener aceites para producir biodiésel y bioturbosina. Este tipo de materias primas no generan riesgo para la seguridad alimentaria; además, algunas especies pueden cultivarse en tierras marginadas, con mínimos cuidados, así como reducidos requerimientos de agua y fertilizantes. Algunos de los inconvenientes de estos cultivos implican el cambio de uso de suelo, o bien la competencia por tierras con los cultivos de uso alimenticio. Sin embargo, dentro de esta clasificación se encuentran otras materias primas que no compiten por tierra y son los residuos de actividades agrícolas (pajas), forestales (aserrín), ganaderas (estiércol), agroindustriales (cascaras de frutas) y los residuos sólidos urbanos; estos residuos tienen la ventaja de que la mayoría de ellos representan un problema de contaminación por los altos volúmenes en los que son generados, y porque no son empleados para generar productos de mayor valor agregado.

La tercera generación abarca a los combustibles originados a partir de algas, las microalgas, macroalgas y algas verdi-azules; ellas producen aceites, proteínas y carbohidratos, a partir de los cuales se pueden producir biodiésel, bioturbosina, bioetanol, e hidrógeno renovable. Por otra parte, las algas durante su crecimiento consumen grandes cantidades de CO₂ y pueden crecer en cuerpos acuáticos o aguas marinas.

Por último, como se ha mencionado, algunos autores consideran una cuarta generación la cual abarca a los organismos modificados para mejorar su rendimiento; sin embargo, no se han empleado a gran escala (Singh et al., 2016).

Finalmente, en la Figura 1 puede observarse que la ventaja del uso de los biocombustibles es que al ser utilizados liberan gases como dióxido de carbono, vapor de agua, con nulas o reducidas emisiones de compuestos tóxicos; no obstante, el CO₂ liberado en la combustión es captado por las plantas durante su crecimiento, y se regula en el ciclo natural del carbono sin aumentar su concentración en la atmósfera, como pasa con los combustibles fósiles.

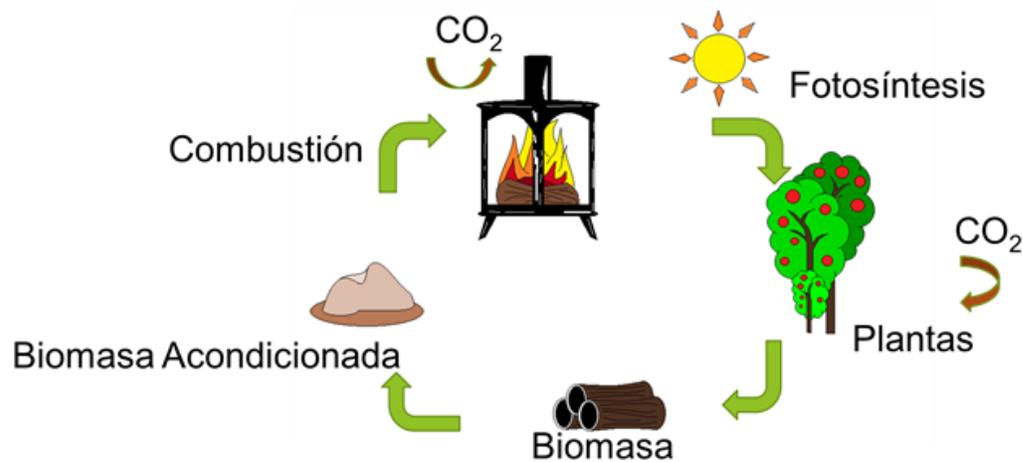


Figura 1. Ciclo de carbono al quemar biocombustibles.

4.2. Biomasa

La materia prima para la producción de biocombustibles es la biomasa, la cual es definida por el diccionario de la Real Academia Española como la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía (Real Academia Española, 2017). Por ello, en la biomasa puede incluirse la materia vegetal y sus residuos, así como los residuos de animales y humanos,

excluyendo aquella materia formada hace millones de años y que incluye a los combustibles fósiles.

La biomasa se compone principalmente de carbono, por lo que puede ser aprovechada como combustible al ser quemada. De acuerdo con Saidur et al. (2011) si la biomasa se quema completamente, la cantidad generada de dióxido de carbono es igual a la que fue tomada de la atmósfera durante la etapa de crecimiento. Así, no se adiciona CO₂ a la atmósfera y la biomasa puede ser considerada como una fuente de energía limpia; esto es conocido como el ciclo de carbono. Es por ello que la biomasa ha sido utilizada como combustible desde que el hombre tiene memoria, siendo la leña la más empleada; actualmente se ha intensificado el empleo de la biomasa en la generación de biocombustibles.

4.3. Aglomerados energéticos o pellets

Los aglomerados energéticos, o mejor conocidos como pellets, son uno de los tipos de biocombustibles sólidos más populares en la actualidad. Los pellets se obtienen mediante la densificación, por medio de presión y temperatura, de biomasa para obtener un aglomerado en forma de cilindro.

De acuerdo con la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) existen dos tipos de materias primas para la producción de este tipo de biocombustible: la materia leñosa y la no leñosa (ISO, 2014); siendo la segunda la de importancia para la presente investigación.

La biomasa no leñosa, también conocida como herbácea, es aquella proveniente de plantas que no poseen tallo leñoso y que mueren al final de la temporada de crecimiento. Incluye cultivos de granos o semillas de la industria de la producción o procesamiento de alimentos y sus subproductos como los cereales (ISO, 2014).

Un pellet, de acuerdo con ISO, está definido como un biocombustible hecho a partir de biomasa triturada o molida, con o sin aditivos, y unificada como cilindros, generalmente con un diámetro < 25 cm, con longitud aleatoria y típica de entre 3.15

mm a 40 mm, con extremos fracturados, obtenidos por compresión mecánica (ISO, 2014). Por lo general, un pellet tiene un contenido de humedad menor al 15 % de su masa.

Este tipo de biocombustible presenta la ventaja de aprovechar de manera sencilla la biomasa para densificarla, y así aumentar el valor calorífico por unidad de volumen, lo cual facilita su almacenamiento y transporte. La biomasa en forma de aglomerados puede ser utilizada directamente como un combustible sólido, obteniéndose un poder calorífico en algunos casos de 4000 a 4500 kcal/kg (Kusumaningrum y Sofyan-Munawar, 2014); en ese estudio previo se emplearon residuos de las plantaciones de palmas.

Los pellets de biomasa son competitivos frente a los combustibles de petróleo, gas natural y la electricidad, no sólo a causa del bajo costo sino también por su facilidad de uso y almacenamiento (Karkania et al., 2012).

Actualmente los pellets han sido elaborados a partir de diversos residuos, algunos de los cuales se muestran en la Tabla 1. De la Tabla 1 se observa que la mayoría de las materias primas estudiadas para la producción de pellets provienen de residuos leñosos, desechos del cultivo del arroz, paja de trigo y rastrojo de maíz. Pocos estudios se han centrado en el aprovechamiento de otros residuos agrícolas poco convencionales, como los de la uva y del cultivo de tomate; por lo que no es muy variada la oferta de biocombustibles sólidos provenientes de desechos agrícolas.

De la Tabla 1 también se observa que en ninguno de los trabajos reportados se ha abordado el uso de la paja de frijol como materia prima para la producción de pellets. De hecho, la mayoría de los residuos presentados son de origen leñoso, como los restos de poda, el aserrín y residuos de plantas de la familia de las gramíneas, como el trigo y maíz, siendo estos últimos junto con los pastos las biomásas más parecidas al del frijol, por su periodos de vida cortos, como la biomasa herbácea, sin embargo, este último es de la familia de las leguminosas por lo que presentan diferencias en su fisiología. Además, muchas de las materias primas empleadas no

son tan familiares en México, como el caso del frijol que es parte fundamental de la alimentación de los mexicanos. Como desecho, los residuos del cultivo de frijol tampoco han sido muy estudiados; por lo que no han sido caracterizados y se desconoce la composición que puedan tener. Se han realizado caracterizaciones de otros materiales como son la paja de arroz, huesos de aceituna, entre otros (Saidur et al., 2011); sin embargo no se tiene registro sobre los residuos de frijol.

Tabla 1. Ejemplo de biomásas empleadas en la producción de pellets.

Materias primas	Referencia
Madera de pino, eucaliptus, roble, sarmiento (vid), álamo, avena, triticale, arroz.	(Castellano et al., 2015)
Paja de trigo, paja de cebada, rastrojo de maíz, pasto varilla.	(Mani et al., 2008)
Aserrín de pino, aserrín de castañas, aserrín de eucalipto, residuos de celulosa, cáscara de café, residuos de uva.	(Gil et al., 2010)
Olivo, almendro, hojas de olivo, álamo negro, encinas.	(Zamorano et al., 2011)
Residuos de poda del olivo.	(Carone et al., 2010)
Rastrojo de maíz, paja de trigo, tallo del sorgo.	(Theerarattananoon et al., 2011)
Mezcla de paja de arroz y bambú.	(Liu et al., 2013)
Arroz.	(Ishii y Furuichi, 2014)
Palma de coco.	(Acda, 2015)
Palma aceitera.	(Kusumaningrum y Sofyan-Munawar, 2014)
Residuos de cultivo de tomate.	(Celma et al., 2012)
Trigo, canola, maíz y mezclas entre ellos.	(Niedzióka et al., 2015)

Por otra parte, dentro de los factores que se han estudiado en la elaboración de pellets se encuentran la longitud del pellet, la temperatura de la matriz, el contenido de la humedad de la biomasa, el tamaño de partícula y la presión de formación (Stelte et al., 2011b). De los factores anteriormente mencionados la presión, humedad y el tamaño de partícula son los principales factores estudiados; como es

reportado por Mani et al. (2008) e Ishii y Furuichi (2014), quienes trabajaron con paja de arroz. Estos autores afirman que se consideran factores de control importantes, que pueden tener un efecto significativo en las características de calidad de los pellets, sobre todo en el poder calorífico (a mayor densidad mayor contenido calorífico). Por otra parte, 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 algunos estudios en los que se trabajó con rastrojo de maíz, las humedades más propicias fueron entre 9% y 14%, ya que con valores mayores se encontraron problemas con la durabilidad del pellet (Theerarattananoon et al., 2011).

Por ello, el presente estudio se enfocó en el análisis de la humedad, así como en el tamaño de partícula, ya que ambos factores determinan la capacidad calorífica final del pellet así como el consumo de energía eléctrica requerido en la molienda y pelletización.

5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

5.1. Biomasa

La biomasa representa todo material orgánico que proviene de los residuos animales, humanos, así como aquellos de origen vegetal, en los que se incluyen los residuos derivados de cultivos y los derivados de algas. Los constituyentes de la biomasa vegetal son celulosa (un polímero de glucosa), hemicelulosa (que también se llama poliosa), lignina (un polímero fenólico complejo), extractos orgánicos y minerales inorgánicos (también llamado ceniza) (Chen et al., 2015).

La energía solar que absorben las plantas se utiliza para el proceso de la fotosíntesis, proceso que les permite crecer a las plantas, ya que estas transforman el dióxido de carbono atmosférico, agua y energía solar en glucosa, fuente de energía y que es la materia prima para producir celulosa, además se libera oxígeno como desecho. La energía de la biomasa que se almacena en las plantas y animales, o en los residuos; puede ser recuperada al convertir la biomasa en combustible para procesos de combustión (Abuelnuor et al., 2014).

5.2. Biomasa lignocelulósica

El término biomasa lignocelulósica es aplicado para aquella proveniente de plantas, ya sean de características fibrosas o leñosas, que poseen una combinación de lignina con celulosa y hemicelulosa, vinculadas entre sí en una matriz heterogénea. La masa combinada de la celulosa y la hemicelulosa en el material de la planta varía con la especie; pero normalmente representa 50-75% de la masa seca total, siendo el resto lignina (Ullah et al., 2015). La biomasa lignocelulósica puede ser dividida en tres categorías, como se muestra en la Tabla 2. En esta tabla se puede observar que algunos tipos de biomasa tienen limitaciones para su empleo como materia prima en biocombustibles sólidos; sobre todo en los cultivos energéticos y residuos forestales. En el caso de los cultivos energéticos se tienen que emplear tierras marginales, lo que involucra que las plantas deben de adaptarse, lo cual consume tiempo y recursos. Con los residuos forestales se debe tener en cuenta que al tener

una mayor cantidad de aplicaciones la competencia por adquirirlos es mayor. De ahí que los residuos de cultivos tienen una amplia ventaja en su utilización como materias primas para biocombustibles. Una de sus desventajas es que emplean grandes volúmenes para su almacenamiento y transporte; es por ello que se emplea el proceso de densificación para su acondicionamiento. Uno de los residuos de cultivo más importantes en México es el obtenido del frijol, cultivo del cual se proporciona información en la siguiente sección.

Tabla 2. Categorías de biomasa lignocelulósica. (Ullah et al., 2015).

Categoría	Descripción
Residuos agrícolas	Abarcan una amplia gama de materiales (como las pajas), y se utilizan para producir biocarburantes de segunda generación; son sostenibles ya que no compiten por tierra con los cultivos alimenticios. Una aplicación incluye la gasificación de residuos para generar gas de síntesis, que se pueden convertir en combustibles líquidos con la ayuda de catalizadores.
Residuos forestales	Existen dos tipos principales de recursos forestales que se utilizan en la producción de biocombustibles de segunda generación: 1.- Los residuos de la cosecha de la madera, tales como ramas, hojas, y raíces. 2.- Tala complementaria, que describe la diferencia entre el nivel de captura máxima sostenible y la cosecha real necesaria para satisfacer la demanda de madera en rollo.
Cultivos energéticos/ herbáceas leñosas	Aquellos que pueden ser cultivados en tierras marginales, no adecuadas para la producción de alimentos, para proporcionar materias primas para la generación de biocombustibles. Ejemplos de éstos son pasto varilla, hierba de la pradera, y especies forestales de rotación corta, como eucalipto y álamos. Estos cultivos pueden ser de alto rendimiento, y pueden ser cosechados sobre largas temporadas; lo cual permite disponer de suministro constante, evitando así el almacenamiento costoso de los volúmenes grandes de biomasa entre cosechas (Gil et al., 2010).

5.3. Frijol

El frijol (*Phaseolus vulgaris*) es una planta perteneciente a la familia de las leguminosas, del género *Phaseolus* y de la familia Fabacea, de la cual se obtiene una semilla que es ampliamente utilizada como alimento; el frijol constituye una fuente importante de proteínas, y por lo general acompaña a muchos otros alimentos.

De acuerdo con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, en México la siembra de esta planta puede realizarse a mano o con sembradora a una profundidad de 3 a 5 cm, con distancia entre plantas de 6 cm; puede cultivarse en tierras que tienen una temperatura entre 10 y 27 °C, y con pH óptimo que fluctúe entre 6.5 y 7.5, aunque la planta se comporta bien en un rango de pH de 4.5 a 5.5 (SAGARPA, 2017).

Actualmente se conocen alrededor de 70 variedades de frijol en el mundo; en México existen 50, de las cuales se cultivan sólo cuatro especies: frijol común, comba, ayocote y teperi (SAGARPA, 2015).

Los frijoles se pueden agrupar de acuerdo con su color o su variedad. En México las variedades más consumidas son moryocoba, peruano, flor de mayo y flor de junio, garbancillo, manzano, negro San Luis, negro Querétaro y pinto (SAGARPA, 2015); siendo estas variedades la que se cultivan en el ciclo Primavera-Verano (Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial, 2015).

El frijol ha sido consumido por la población mexicana desde hace siglos, ya que contiene también hierro, vitaminas y carbohidratos; el frijol tiene un consumo anual per cápita de 9.9 kg en promedio (SAGARPA, 2017). Además, el consumo de frijol es asociado con la reducción de niveles de colesterol en la sangre y problemas cardíacos, obesidad, diabetes y cáncer (SAGARPA, 2016).

Actualmente, el frijol es considerado el segundo producto agrícola en México, ya que ocupa una superficie sembrada de 2'200,000 hectáreas por 650 mil

productores; y tiene una enorme demanda gracias a su alto contenido de proteínas, teniendo una producción total nacional de más de un millón de toneladas (SAGARPA, 2016).

La producción nacional reporta variaciones anuales; esto se debe a las condiciones del clima, principalmente la sequía, ya que se desarrolla en condiciones de temporal. Sin embargo se observa que existe una ligera tendencia a la alza, ya que durante 2102 y 2014 se obtuvo un promedio de 1.21 millones de toneladas; durante el 2011 la producción de frijol registro su nivel más bajo en 32 años (Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial, 2015), y se estima que para el 2030 el consumo nacional sea de 1.44 millones de toneladas (SAGARPA, 2017).

La Figura 2 muestra al frijol flor de mayo, el cual se produce en el centro del país; el residuo, paja, de esta variedad será utilizada en el presente proyecto aprovechando la tendencia al alza que se tiene tanto en su cultivo como en su consumo. Además, los desechos del cultivo de frijol tiene pocos usos, y se aprovechará principalmente la cosecha del período de Primavera-Verano.



Figura 2. Frijol Flor de Mayo.

La Figura 3 muestra los residuos del cultivo de frijol, los cuales se componen del tallo de la planta (paja), hojas y vaina; se planea aprovechar todo el residuo para su densificación. El subproducto de la cosecha de frijol, en zonas rurales, se obtiene de forma manual “apaleando” la planta, para retirar la semilla de la vaina; ésta posteriormente se seca al sol, y si no se emplea como forraje se deja como abono en las tierras de cultivo. No obstante, para considerar su uso como biocombustible

este residuo posee baja densidad, por lo que es necesario aumentarla mediante el proceso descrito a continuación.



Figura 3. Residuos de cultivo de frijol.

5.4. Densificación

La densificación o pelletización es un proceso de aumento de densidad de la masa, al aplicar una fuerza en forma de presión o compactación. Diversas formas de combustibles son obtenidas mediante el proceso de densificación, tales como gránulos, briquetas o pellets. Estos últimos son biocombustibles de forma cilíndrica, y son de las formas más empleadas actualmente.

El principal objetivo de la densificación de la biomasa es aumentar la densidad volumétrica inicial de 40 a 200 kg/m³ a una final de 600 a 1400 kg/m³; esto con la finalidad de facilitar el almacenamiento, la manipulación, reducir el costo de transporte así como el contenido de humedad (Chen et al., 2015). Así, al final se obtiene un biocombustible con mayor aporte energético que la biomasa sin densificar.

En general, la calidad de pellets depende de las propiedades de la materia prima: tipo de biomasa, contenido de humedad y tamaño de partícula; así como de la gestión de la calidad del proceso de fabricación: condiciones de operación, el tipo de pelletización, y agente de unión o aglutinante (Gilbert et al., 2009).

El proceso de elaboración de pellets consiste en forma general de los siguientes pasos.

1.- Secado: A la materia prima se le reduce el contenido de humedad, alcanzando valores que van entre del 13% al 20% para residuos como el arroz (Ishii y Furuichi, 2014), 6.5% para el pasto varilla (Gilbert et al., 2009), 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 el proceso de secado depende de la materia prima a emplear, observándose que se consideran humedades cercanas al 10%.

2.- Molienda: Se reduce la materia prima al tamaño de partícula deseado, algunos estudios han empleado tamaños de partícula de 5, 10 y 20 mm (Ishii y Furuichi, 2014). Este proceso permite que se compacte el residuo en la etapa de densificado.

3.- Densificado: La materia prima se introduce en una matriz perforada, la cual, mediante la acción de unos rodillos, es obligada a pasar por unos agujeros. Gracias a la presión ejercida por los rodillos y a la lignina contenida se obtienen cilindros de producto prensado (pellets). La temperatura del producto triturado aumenta en la máquina pelletizadora, la lignina se derrite y aglutina el pellet cuando se enfría. De ahí que el pellet no presenta dureza hasta una vez enfriado.

4.- Enfriado: Después de la compresión, la temperatura de los pellets es alta, puede ser de 70°C a 80°C. El enfriado estabiliza los pellets y endurece la lignina. A partir de ahí los pellets adquieren su durabilidad final.

En los procesos industriales se añaden las etapas de tamizado, para su clasificación por tamaño, y almacenamiento en tanques; el producto no seleccionado es reprocesado (Kusumaningrum y Sofyan-Munawar, 2014).

Durante el proceso de densificado es conveniente tener bajo control factores que influyen en el poder calorífico final de los pellets. Se han realizado diversos estudios en cuanto al control de estos factores, siendo los más comunes los siguientes.

5.4.1. Contenido de 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. Lo anterior es debido a que en materias primas húmedas, por ejemplo, leña húmeda, se obtiene un contenido de energía bajo; ya que cierta cantidad de energía tiene que ser consumida para transformar el agua en vapor después de la combustión (Guo et al., 2015).

Ahora bien, una humedad alta puede alterar la durabilidad, ya que la temperatura vítrea de la lignina disminuye conforme aumenta la humedad, lo que permite una mayor unión entre partículas (Stelte et al., 2011b); por lo contrario, humedades muy bajas afectan la formación del pellet, y pueden ocasionar que el pellet se desintegre con la fricción. También hay que considerar que el agua no se comprime, lo que al final puede hacer que el pellet pierda durabilidad una vez densificado.

La humedad varía en la biomasa y ésta puede emplearse en diferentes intervalos, ya sea secando o humectando la biomasa; por ejemplo, en el caso de la madera se han empleado humedades en un intervalo de 5 al 10% (Guo et al., 2015), entre 13% y 20% para residuos como el arroz (Ishii y Furuichi, 2014), entre 8% y 15% para paja de trigo y de 20 % a 25 % para algunos pastos (Whittaker y Shield, 2017); mientras que para paja de trigo se ha empleado 17.5 %, para maíz 18.5 %, y en el caso de colza o canola 16.5 %. En un caso, cuando la humedad inicial máxima era 14.8 % para el maíz, la biomasa se humectó con agua (Niedzióka et al., 2015).

5.4.2. Presión de formación

Se refiere a la presión que se requiere en el equipo de pelletizado para formar el pellet, y que permita que el pellet mantenga su forma y adquiriera su durabilidad final. Se ha mostrado que la presión de formación depende del tipo de biomasa, la temperatura, el contenido de humedad y el tamaño de partícula (Stelte et al., 2011b; Huang et al., 2017). Por ejemplo, en la investigación de Stelte se demostró que

presiones por encima de 250 MPa dieron como resultado sólo un ligero aumento en la densidad del producto, mientras que en la de Huang se encontraron presiones óptimas de hasta 400 MPa para pasto.

Por otra parte, en otros estudios, como el realizado por Poddar y colaboradores (Poddar et al., 2014) se encontró que un aumento en la presión de formación de los pellets permite incrementar la densidad final del densificado; además, la presión incrementa el poder calorífico en algunos casos, aunque depende del tipo de biomasa para encontrar el valor de presión adecuado. Por ejemplo, en ese estudio se aplicó una presión de 20 kN sobre una muestra de Magnolia Champaca (Champak en inglés), y se obtuvo un pellet con una densidad de 922.38 kg/m³, aunque su poder calorífico más alto para esta misma materia se encontró de 12 kN con un valor de 20961.55 kJ/kg.

5.4.3. Temperatura de formación

Es la temperatura requerida para la formación de pellet; es importante debido a que gracias a ésta la lignina se ablanda, y permite aglutinar las partículas para formar el pellet cuando se enfría. De ahí que el pellet no presenta dureza hasta una vez enfriado. El aumento de temperatura permite el flujo de los polímeros, sobre todo lignina, y la penetración de ésta con partículas de biomasa adyacentes; de esta manera se forman enlaces y la adhesión de partículas, siendo favorecido por temperaturas mayores a la temperatura de transición vítrea de la lignina (Stelte et al., 2011a). En un estudio donde se empleó paja de arroz se determinó que el intervalo de temperatura óptima de formación es de 60 a 80 °C (Ishii y Furuichi, 2014). Sin embargo, la deformación plástica de las partículas es importante para hacer enlaces permanentes. El intervalo de temperaturas de acondicionamiento óptimas (65 a 100 °C) depende del tipo de biomasa (Lisowski et al., 2017).

Como ya se mencionó, la temperatura de formación depende de la materia prima y también de la humedad inicial de ésta; ya que la temperatura de transición puede diferir para cada biomasa debido a la composición de hemicelulosa y lignina. Este comportamiento fue explicado en la investigación de Liu y colaboradores, donde

trabajaron con mezclas de bambú y pino; ellos indican que debido a la diferente composición de las dos biomásas, al hacer mezclas hay variaciones en las propiedades de los pellets por las diferentes temperaturas de transición vítrea (Liu et al., 2016). Es por ello que no se tiene una temperatura específica. Por ejemplo en la revisión de Whittaker y Shield se menciona que algunos autores recomiendan el empleo de temperaturas de 100 °C para pelletizar paja de trigo y una temperatura de 105 °C para *Miscanthus*, el cual es un pasto; y se describe que a temperaturas superiores a la temperatura de transición vítrea de la lignina puede favorecer a la durabilidad del pellet (Whittaker y Shield, 2017).

5.4.4. Aglutinante

Se refiere al residuo o aditivo agregado al pellet ajeno a la materia prima principal, el cual puede proveer de mejores características al producto final. El aglutinante puede ser cualquier residuo agrícola, forestal o incluso químico, como el glicerol, bentonita o lignosulfonato (Lu et al., 2014). Se ha reportado el uso de glicerol para producir pellets de pajas y aserrín de pino pre tratado por torrefacción para incrementar el poder calorífico superior (García et al., 2018); también se ha empleado maicena, melaza (Ståhl et al., 2016) y paja de trigo (Chou et al., 2009).

El uso de aditivos o aglutinantes permite tener mayor eficiencia en la producción de pellets, reduciendo la electricidad requerida e incrementando la durabilidad del producto (Lu et al., 2014; Ståhl et al., 2016). También el uso de aglutinante permite la mitigación de CO₂, siempre y cuando la región donde se emplee tenga un alto consumo de energía proveniente de combustibles fósiles. Además, una mayor durabilidad representa mayor aprovechamiento de los pellets por parte del consumidor final, al tener un producto más íntegro (Ståhl et al., 2016); ya que el aglutinante al enfriar promueve la formación de puentes o enlaces entre las partículas, lo cual tiene el efecto de unión (Kaliyan y Morey, 2010).

En otros casos, donde el pellet es empleado como materia prima para la producción de biocombustibles, mediante pirólisis, se ha encontrado que el uso de glicerina mejora el rendimiento de H₂, uno de los biocombustibles gaseosos obtenidos

durante el proceso (Bartocci et al., 2017); por lo que muchos estudios se centran en el uso de aglutinantes, donde adicionalmente a la selección del aglutinante la cantidad agregada también es muy importante. Por ejemplo en un estudio con canola se optimizaron las condiciones de densificado, y la cantidad de aglutinante óptima fue de 5.0 %, con temperaturas por encima de 70 °C para obtener una durabilidad final de 99 % (Tilay et al., 2015).

5.4.5. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula es un factor muy importante, ya que el proceso de pelletización requiere de una reducción de tamaño; y no cualquier tamaño puede ser empleado para lograr la densificación con la mayor densidad posible. Sin embargo, este pretratamiento requiere de energía por lo que se requiere determinar un tamaño apropiado, que permita reducir la energía durante la densificación y compensar lo consumido durante la molienda.

El uso de un molino de martillos y tamiz de 4 mm permite obtener pellets con densidad a granel y durabilidad conforme al estándar internacional ISO 17225-6; además de reducir la energía requerida durante su producción, esto cuando se emplea madera como materia prima (Kirsten et al., 2016).

En otros casos el tamaño de partícula se ve influenciado por la humedad del residuo, obteniendo mejores resultados con tamaños de partícula menores a 1 mm y con humedades cercanas al 18% (Arzola et al., 2012); esto permite aumentar la densidad y la durabilidad del pellet, cuando es empleada la palma de aceite; al igual que lo demostrado en otro estudio, donde se empleó un molino de martillos para obtener un tamaño de partícula de 3.2 mm en promedio y con una humedad de 12% se pudo obtener la mayor densidad cuando se emplea residuos del cultivo de maíz como materia prima (Mani et al., 2008). Por otra parte, en algunos casos se ha determinado que es suficiente con mantener un tamaño de partícula entre 10 y 20 mm, cuando se emplea paja de arroz (Ishii y Furuichi, 2014). Sin embargo, en recientes revisiones se describe que el uso de tamaños de mallas pequeñas empleadas durante la molienda permite obtener una durabilidad óptima, pero

también pueden causar problemas durante el densificado. Por lo que el porcentaje de partículas finas no debe superar el 10 y 20% en la alimentación al proceso, y tamaños debajo de 1 mm como 0.7 mm, son tamaños de partículas empleados en pellets pero destinados como alimento animal (Whittaker y Shield, 2017).

Por ello es muy probable que el tamaño de partícula influya en la producción de pellets a partir de residuos del cultivo de frijol; ya que puede influir en la energía requerida durante la densificación, así como en la densidad y durabilidad final del producto. Esto es esperado dado que un tamaño más grande reduciría la densidad del pellet e incrementaría la energía requerida para densificar.

Por otra parte, durante el proceso de densificado es necesario medir algunas variables como respuesta para determinar la calidad de los pellets esto incluye: poder calorífico, resistencia y densidad.

5.4.6. Poder calorífico

El poder calorífico es una de las características más importantes para la comercialización de un pellet junto con la resistencia a la fricción mecánica (Wang et al., 2018); 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 durante su oxidación, o en otras palabras durante su combustión o quema.

De acuerdo a la norma ISO 18125 (Solid biofuels-Determination of calorific value), pueden distinguirse dos tipos de poderes o valores caloríficos:

1.- Valor Calorífico Bruto o también conocido como poder calorífico superior. Este parámetro se determina en un calorímetro de bomba, donde una muestra del biocombustible se combustiona con un exceso de oxígeno. El valor calorífico bruto se calcula a partir del aumento de la temperatura y la capacidad calorífica efectiva del calorímetro; además se toman en cuenta contribuciones de la energía de ignición, la combustión de la muestra y de los efectos de reacciones secundarias como la formación de ácido nítrico y la energía liberada por la condensación de agua

formada durante la combustión, conocido como calor latente de condensación. En este caso se asume que los productos de combustión son oxígeno gaseoso, dióxido de nitrógeno, dióxido de carbono, dióxido de azufre y agua líquida saturada (en equilibrio con su vapor) con dióxido de carbono y ceniza sólida todas a temperatura de referencia, la cual es 25 °C.

2.- Valor calorífico Neto o también conocido como poder calorífico superior. Este parámetro se define como el valor calorífico, ya sea a presión constante o a volumen constante, que contiene el biocombustible; y es obtenido de restarle al valor calorífico bruto el calor latente de condensación del agua formada durante la combustión y del agua contenida en la muestra. Para este análisis es necesario conocer la humedad y el contenido de nitrógeno en la muestra, cuando se lleva a cabo el cálculo a volumen constante; mientras que se requiere conocer el contenido de oxígeno y nitrógeno de la muestra cuando el cálculo es a presión constante.

Mientras que el poder calorífico superior e inferior se puede obtener de manera experimental, también puede ser calculado mediante modelos matemáticos que son aplicados a la biomasa. Varios de estos modelos son enlistados en la revisión de Vargas-Moreno, donde el cálculo se obtiene mediante un análisis elemental, proximal o químico, (Vargas-Moreno et al., 2012).

5.4.7. Durabilidad

La durabilidad es una variable muy importante, ya que permite determinar si el pellet resiste el manejo y transporte. La durabilidad se determina por la masa perdida de las muestras, tras someterse a un proceso de impacto y fricción.

Los pellets son pesados en una balanza digital y se colocan en un equipo de pruebas para estresar los pellets al friccionarse unos con otros por 10 minutos; posteriormente se hacen pasar por un tamiz con un tamaño de malla de 3.17 mm (1/8 pulgadas), se pesan los pellets nuevamente y se emplea la ecuación 1 para determinar la durabilidad (Liu et al., 2013).

$$P_d = 100 - (m_i - m_f) / m_i \times 100 \quad (1)$$

donde:

P_d : Durabilidad de los pellets (%)

m_i : masa inicial de las muestras (g)

m_f : masa final de las muestras (g)

5.4.8. Densidad

La densidad es otro factor de respuesta importante a considerar, ya que entre mayor densidad mayor aporte calorífico; además permite reducir costos por transporte cuando la densidad es alta.

Pueden determinarse dos tipos de densidad:

- a) Densidad Unitaria o Individual: es la densidad promedio por pellet ρ_p en g/cm³; para ello se determina de forma individual, calculando el volumen del pellet V_p (cm³) mediante las mediciones de diámetro D (cm) y la longitud L (cm), y pesando el pellet en una balanza para determinar su masa m_p (g), se usan las ecuaciones (2) y (3):

$$V_p = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) * L \quad (2)$$

$$\rho_p = m_p / V_p \quad (3)$$

- b) Densidad a granel: Es la densidad que tienen los pellets en relación a un volumen donde son contenidos ρ_g . 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 (4):

$$\rho_g = m_g/V_g \quad (4)$$

donde:

m_g : masa a granel (g)

V_g : volumen a granel del recipiente ya conocido (cm^3)

6. METODOLOGÍA

6.1. Materiales y Métodos

6.1.1. Residuos del cultivo de frijol

Para la presente investigación se seleccionaron los residuos del cultivo de frijol de la especie Flor de Mayo, producido en los años 2016 y 2017. Éste residuo fue seleccionado dado que la especie Flor de Mayo es la tercera con mayor producción en el país, con un 9.4 % de la producción nacional, por debajo del frijol pinto (26.5 %) y el frijol negro (37.9 %), esto en el 2015 de acuerdo con datos de SIAP-SAGARPA (FIRA, 2016). Los residuos del cultivo de esta especie de frijol representan una buena cantidad, si se considera que la producción anual para todo el frijol producido ascendió a 1.08 millones de toneladas en 2016 (SAGARPA, 2017); además, esta especie es producida por agricultores de la región centro del país.

Los residuos fueron recolectados en la comunidad de San Sebastián Tenochtitlan, en el municipio de Nopala de Villagrán, estado de Hidalgo; el residuo incluye el tallo, hoja y la vaina de la planta. Los residuos fueron colocados en bolsas selladas para evitar su degradación por la humedad y la proliferación de microorganismos.

6.1.2. Molienda de biomasa

Para realizar el densificado de la biomasa fue necesario un pretratamiento, que consistió en la reducción del tamaño de partícula. Para ello se empleó un molino de martillos marca BOMERI, modelo PD6, serie 1036, con un motor monofásico SIEMENS de 1.5 HP. La Figura 4 muestra el molino de martillo empleado en la investigación, se observan las cuchillas la cuales aplican fuerzas de corte e impacto, lo que permite reducir el tamaño de partícula de la biomasa, mientras que la Figura 5 muestra al molino de martillo armado y listo para ser operado.

Para controlar el tamaño de la molienda se emplearon tres cribas de 5/32 pulgadas de diámetro equivalente a 3.97 mm, de 8.0 mm de diámetro y de ½ pulgada de diámetro equivalente a 12.7 mm. También se realizaron pruebas con una criba de

una pulgada de diámetro equivalente a 25.4 mm. La Figura 6 muestra dos de las cribas que se emplearon durante la investigación, las cuales son fáciles de cambiar en el equipo y permitieron obtener una distribución homogénea de las partículas.



Figura 4. Molino de martillo.



Figura 5. Molino de martillo, vista superior.

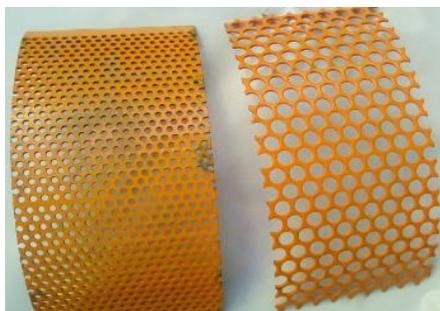


Figura 6. Cribas de 3.97 mm y 12.7 mm.

6.1.3. Densificado de biomasa

Para densificar el material se empleó una pelletizadora de rodillos con una capacidad máxima de entre 150 a 250 kg/h con un motor marca Magne Tek de 5 HP de potencia, Figura 7.



Figura 7. Pelletizadora o densificadora de rodillos.

En las primeras pruebas se densificó la biomasa con una matriz de formado de 6 mm de diámetro; sin embargo, para incrementar el diámetro y poder emplear los pellets en sistemas de calentamiento de agua y producción de vapor para generar

energía eléctrica se cambió por una matriz de 8 mm de diámetro, la cual se puede apreciar en la Figura 8.

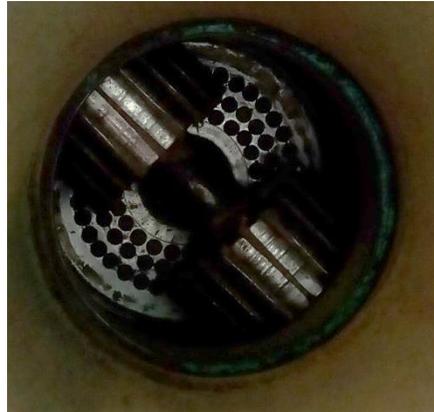


Figura 8. Matriz de formado de la densificadora.

El equipo con el que se realizó la investigación permite el ajuste de presión por medio de tornillos que sujetan la coraza de densificado; sin embargo, no es posible conocer la presión real a la que se están formando los pellets, el equipo tampoco permite controlar la temperatura de formación.

6.1.4. Calorímetro isoperibólico

Para determinar el poder calorífico de las muestras densificadas se empleó un Calorímetro isoperibólico Parr modelo 6200, ubicado en el Laboratorio de Bioingeniería de la Facultad de Ingeniería, en el Campus Amazcala, ver Figura 9. Dicho equipo está complementado con un sistema que suministra agua a temperatura controlada marca Parr modelo 6510. El equipo cuenta también con una chaqueta de agua aislante para contener una cubeta ovalada con agua, y la bomba con oxígeno, agitador y un termopar para medir la temperatura; además cuenta con una prensa manual, Parr Pellet Press 2811. Las mediciones en el equipo se realizan con un sensor de temperatura en un intervalo de 20 a 40 °C.

El principio de funcionamiento de este equipo consiste en mantener a una temperatura constante la chaqueta aislante, por medio de una bomba que mantiene el flujo continuo alrededor de ésta; mientras que la temperatura de la bomba y de la “cubeta” se eleva a medida que el calor se libera por la combustión (operación isoperibólica). Un microprocesador controla la temperatura de la chaqueta y realiza las correcciones necesarias, el calor se calcula en base a las diferencias de temperatura logradas en el sistema, la combustión se lleva a cabo a volumen constante.



Figura 9. Calorímetro 6200, utilizado para determinar el poder calorífico superior.

6.1.5. Otros instrumentos de medición

Para determinar el peso de los pellets se empleó una balanza marca Precisa, modelo 321, con resolución de 0.1 mg y un intervalo de medición de 0.01 g a 220 g, ver Figura 10. Las mediciones obtenidas con el equipo permitieron obtener la densidad después de haber obtenido en conjunto, el volumen de los pellets.

La temperatura en la matriz de formado se midió con un multímetro digital marca TRUPER modelo MUT-33, el cual cuenta con una resolución de 1 °C y un intervalo de medición de -40 °C a 1000 °C, ver Figura 11. La temperatura fue medida con un termopar de la misma marca, tipo K, con un alcance de medición de 250 °C, limitado

por el recubrimiento del termopar. El dato de temperatura fue sólo informativo al no poderse controlar este factor en el equipo empelado en la investigación.



Figura 10. Balanza Precisa 321, empleada para determinar los pesos individuales y granel de los pellets.



Figura 11. Multímetro con termopar.

Para las mediciones de longitud y diámetro de los pellets se empleó un vernier digital, o pie de rey como también se le conoce, con resolución de 0.01 mm, marca STAINLESS HARDENED, modelo 784EC. El instrumento cuenta con un intervalo de medición de 0 mm a 150 mm. Figura 12.



Figura 12. Vernier marca SH.

También se empleó un medidor de humedad para granos, marca BENETECH, modelo GM640, con una resolución de 0.5 % humedad, ver Figura 13. Con un intervalo de medición de 5 % a 30 % de humedad y -10 °C a 60 °C en temperatura.

Para el empleo de éste fue necesario determinar la humedad de la biomasa en laboratorio, y ajustar el higrómetro para medir aproximadamente la misma humedad mediante los ajustes de tipo de grano, ya que se cuenta con ocho opciones. Para esta investigación se determinó usar la opción de trigo (Wheat en inglés y como se identifica en el equipo y manual), ya que fue la opción que mejor se ajustó. El equipo trabaja con el fenómeno de resistencia eléctrica; se hace pasar corriente por la biomasa y se mide la resistencia a su paso para poder relacionarla con un porcentaje de humedad. Debido a lo anterior, en algunos casos fue necesario aumentar la presión de la biomasa, para que fuera posible el paso de corriente en la sonda del instrumento y que el panel equipo pudiera arrojar una lectura; ya que si no se hacía esta operación el equipo mostraba una lectura de 0.0 %.



Figura 13. Higrómetro de granos BENETECH.

Finalmente, otro equipo que se empleó fue una termo balanza marca OHAUS, modelo MB-45, con resolución de 0.01 % de humedad y 0.001 gramos en peso. El equipo tiene un alcance de 45 gramos y un intervalo de temperatura de 50 a 200 °C, el equipo se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Termo balanza marca OHAUS.

6.1.6. Equipo de seguridad

Durante la investigación se empleó equipo de seguridad para evitar accidentes; éste consistió de gafas de seguridad, protección auditiva, guantes de carnaza para el proceso de molienda, guantes de tela con látex para el densificado, zapato cerrado, bata de laboratorio y bata para proceso de molienda y densificado. También se empleó protección respiratoria para evitar aspirar polvos, y las pruebas de digestión para determinar nitrógeno se llevaron a cabo en campanas de extracción para evitar el contacto con ion amonio.

Otros instrumentos y equipos de seguridad empleados fueron pinzas para crisoles, guantes para altas temperaturas y guante de látex para la humidificación de la biomasa.

6.2. Descripción de laboratorio y espacio de densificado

Las pruebas de caracterización química de la biomasa y de los pellets se llevaron a cabo en el laboratorio de Bioenergía, perteneciente a la Facultad de Ingeniería en el Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro, ubicado en la comunidad de Amazcala, municipio de El Marqués, Querétaro. En este mismo laboratorio se densificó la biomasa; el equipo de pelletizado se encuentra en un espacio destinado a éste a un costado del laboratorio de Bioingeniería.

Las pruebas físicas de los pellets y de la biomasa sin procesar, como fueron la medición de diámetro, longitud y peso, se llevaron a cabo en el Laboratorio de Materiales Avanzados de la Facultad de Química en el Campus Centro Universitario de la Universidad Autónoma de Querétaro.

6.3. Recolección de residuos

Los residuos de frijol de la variedad Flor de Mayo fueron recolectados en los campos de cultivo, una vez que los agricultores extrajeron la planta, ya seca, del campo y la semilla fue retirada de la planta. La planta fue recolectada y se incluyó la hoja, vaina, tallo inclusive la raíz. Las muestras se colocaron en bolsas y se cerraron para evitar la humedad. Se trasladaron posteriormente a Nopala de Villagrán para la limpieza y molienda de ellos. Es importante mencionar que la planta ya se encuentra con bajos contenidos de humedad, debido a que la planta se extrae junto con la semilla cuando ya está completamente seca; lo anterior facilita la extracción de la semilla de la vaina, sobre todo en lugares donde aún el proceso es manual.

Con ayuda de aire se limpiaron las muestras; esto para retirar principalmente residuos de tierra y semillas, las cuales pueden interferir en la obtención de un pellet con bajo contenido de nitrógeno. La semilla del frijol posee grandes cantidades de proteínas, las cuales pueden incrementar la cantidad de nitrógeno en el pellet que a su vez puede ocasionar la producción de NOx en la combustión final.

Para ello se colocaron los residuos sobre un plástico y se le hizo pasar aire a condiciones ambientales para retirar la tierra; las semillas restantes se recolectaron para ser empleadas en cultivos posteriores.

6.4. Caracterización química y física de los residuos del cultivo de frijol

Se caracterizó el residuo del cultivo de frijol para conocer sus propiedades químicas y físicas, las cuales pudieran afectar el proceso de densificación. Las pruebas se realizaron con apoyo del Laboratorio de Bioingeniería ubicado en el Campus Amazcala, en el municipio de El Marqués; tales pruebas incluyeron humedad, contenido de cenizas, contenido de carbono, sólidos volátiles, contenido de nitrógeno y poder calorífico en kcal/g.

Los métodos para cada prueba se realizaron en base a los ya establecidos en el Laboratorio, y los cuales se basan en normas e instructivos tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Métodos para caracterización de residuos.

Determinación	Método
Humedad	Gravimétrico PROY-NOM-211-SSA-2002 (Secretaría de Salud, 2003)
Cenizas	Gravimétrico NMX-F-066-S-1978
Sólidos Volátiles	Gravimétrico (APHA, 1999)
Carbono	Gravimétrico (Kalra y Maynard, 1991)
Nitrógeno Total	Digestión y espectrofotometría (Digesdahl ® y Método TKN HACH ®)
Poder calorífico	Calorímetro Isoperibólico

En la Tabla 3 se observa de manera resumida el método empleado en la determinación de algunas propiedades físicas y químicas de los residuos; esto con el objetivo de conocer la materia prima y determinar en qué condiciones pudiera llevarse a cabo la densificación, sobre todo en el aspecto de humedad inicial. A continuación, se describen con más detalle los métodos anteriormente mencionados.

6.4.1. Determinación de humedad

El procedimiento fue realizado en base a un método gravimétrico propio del Laboratorio de Bioingeniería. Para ello, se emplearon 3 crisoles de porcelana los cuales se pesaron en la balanza y se registró su peso; posteriormente se colocaron en la estufa y cada media hora fueron pesados hasta tenerlos a peso constante. La estufa fue programada a una temperatura de 106 °C para el secado de los crisoles.

Posteriormente se pesaron 5 gramos de biomasa triturada, procurando que fuera representativa de toda la muestra; es decir, que incluyera parte de tallo, hojas, vainas y se colocaron en uno de los crisoles. Esto mismo se realizó para los otros dos crisoles para tener por triplicado la operación. Los crisoles con la biomasa se colocaron dentro la estufa, la cual fue programada a 110 °C y cada 30 minutos se pesaron las muestras hasta llegar a un peso constante. Después de 5 horas los crisoles se dejaron enfriar en un desecador y se pesaron en la balanza. Al determinar el peso final se obtuvo la cantidad de humedad en las muestras, la cual resultó de restar al peso inicial el peso final de la biomasa.

6.4.2. Determinación de cenizas

Esta prueba se realizó en base a la norma NMX-F-066-S-1978 (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1978) con algunas modificaciones, ya que en la determinación se emplearon 2 gramos de biomasa triturada; los cuales se colocaron en crisoles puestos a peso constante, el peso de los crisoles y de la biomasa fueron registrados. Cabe mencionar que la prueba se realizó por triplicado.

Los crisoles con biomasa se colocaron en la mufla a una temperatura de 950 °C y se dejaron por 48 horas; esto para que las muestras pudieran quemarse en su totalidad.

Posterior a que se cumplió el tiempo, la mufla se apagó y se dejaron enfriar los crisoles por 10 minutos en la puerta del equipo. Después los crisoles se colocaron en el desecador para enfriar y evitar que las muestras absorbieran humedad. Finalmente, los crisoles se pesaron en la balanza analítica y se registró el peso. La ceniza se calculó en base al peso inicial menos el peso final, y considerando el peso del crisol como muestra la ecuación 5:

$$\% \text{ cenizas} = \frac{(P-p) \times 100}{M} \quad (5)$$

donde:

P= Peso del crisol con las cenizas en gramos (g)

p= Peso del crisol vacío en gramos (g)

M= Peso de la muestra en gramos (g)

6.4.3. Determinación de sólidos volátiles

La determinación de sólidos volátiles se basó en una modificación de los métodos de APHA (1999) para aguas. En dicha prueba se determinó la cantidad de sólidos que tiene la muestra, que no es más que la materia que puede volatilizarse por el efecto de calcinación a una temperatura de 550 °C. Para ello las muestras se colocaron en 3 crisoles, las cuales habían sido puestos a peso constante a 550 °C; posteriormente se colocaron en la estufa a una temperatura de 103 a 105 °C hasta obtener el peso constante, por lo que cada 30 minutos se midió el peso.

La muestra evaporada se colocó en la mufla y se incineró a una temperatura de 550 °C, y cada 30 minutos se midió el peso hasta que éste se mantuvo constante. Los resultados se obtuvieron por medio de la ecuación 6:

$$\% \text{ sólidos volátiles} = \frac{(A-B)}{PS} \times 100 \quad (6)$$

donde:

A = Peso del crisol con la muestra, después de la evaporación (peso constante) en gramos (g)

B = Peso del crisol con el residuo después de la calcinación en gramos (g)

PS = Peso de la muestra seca (g)

6.4.4. Determinación de contenido de carbono

El método para determinar el contenido de carbono se basó en el método descrito por Kalra y Maynard en su Manual "Methods manual for forest soil and plant analysis" (Kalra y Maynard, 1991). Con este método se determinó el carbono orgánico total (COT) contenido en la muestra por medio de pérdida por ignición (Loss on Ignition, LOI por sus siglas en inglés). Para ello, una muestra de 5 gramos se calcinó a una temperatura de 375 °C en la mufla por 16 horas, en crisoles puestos a peso constante a 375 °C. Cabe mencionar que el análisis se realizó por triplicado.

Las muestras, después de ser sometidas a esta temperatura por 16 horas, se dejaron enfriar a 150 °C en el horno apagado; posteriormente se pasaron al desecador para enfriarse a temperatura ambiente, y se pesaron registrando los pesos obtenidos. La cantidad de materia orgánica se calculó por medio de la ecuación 7:

$$\% LOI (materia orgánica) = \frac{(A-B)}{A} \times 100 \quad (7)$$

donde:

A = Peso de la muestra seca en la estufa en gramos (g)

B = Peso de la muestra después de la calcinación en gramos (g)

Posteriormente el resultado se divide por el factor de Van Bemmelen de 1.724 para obtener el % de carbono orgánico (% C orgánico), ya que la materia orgánica contiene 58 % de C aproximadamente.

6.4.5. Determinación de contenido de nitrógeno

El procedimiento de medición de nitrógeno se basó en el método descrito por el fabricante del equipo, el cual está basado en el método de Kjeldhal; es decir, por Digestión (Digesdahl®) y posteriormente se determinó la cantidad de sulfato de amonio por espectrofotometría (Método TKN HACH®, método 8075).

El método consistió en convertir el nitrógeno contenido en la muestra, el cual proviene de las proteínas, en sulfato de amonio, con ayuda de ácido sulfúrico y peróxido de hidrogeno como catalizador; la digestión se realizó en el equipo del Laboratorio de Bioingeniería que es un Digesdahl de la marca HACH. Posteriormente, una muestra de la digestión se colocó en el espectrofotómetro UV-Vis HACH, modelo DR 6000, donde se determinaron las concentraciones de nitrógeno con una longitud de onda de 460 nm para determinar la concentración del ion amonio.

6.4.6. Determinación del poder calorífico

Para determinar el valor del poder calorífico se empleó el procedimiento del equipo con el que se cuenta en el Laboratorio de Bioingeniería, el cual es un calorímetro isoperibólico.

Durante la caracterización de la biomasa se pesó aproximadamente un 1 gramo de la biomasa molida, y con ayuda de la prensa manual Parr Pellet Press 2811 se formó una pastilla la cual se pesó y se registró el resultado del peso. 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. Dentro de la bomba de oxígeno se colocó la canastilla que contenía a la pastilla y la mecha para calcinar la muestra; se tapó, y posteriormente la bomba se llenó con oxígeno de manera automática, con un exceso estequiométrico para asegurar la combustión total de la muestra, como se observa en la Figura 15.



Figura 15. Bomba de oxígeno del calorímetro isoperibólico.

Después se colocó la bomba dentro del equipo y se conectaron los electrodos en la bomba. En el panel de control del calorímetro se ingresó el peso registrado de la pastilla, y una vez colocados los electrodos en la bomba y con la tapa en posición del equipo se prosiguió a la combustión de la muestra. El equipo trabajo de manera automática y después de la combustión en la pantalla se mostró el poder calorífico en calorías/gramo. Este proceso se realizó 3 veces por muestra de biomasa, recordando que se trabajaron con residuos de 2 cosechas diferentes.

6.5. Pruebas preliminares de densificación, factor de control: humedad

Durante la investigación se decidió comenzar con pruebas preliminares para conocer el comportamiento de la biomasa, y ver si era factible la densificación de ésta en el equipo con el que se contaba, así como saber si era necesario el uso de

algún aglutinante. Para ello se redujo el tamaño de partícula de los residuos empleando el molino de martillos, donde fue necesario el paso de la biomasa varias veces por la criba de 3.97 mm hasta obtener un tamaño de partícula de 0.5 mm, empleando tamices para asegurar esta medida. La biomasa fue secada al sol y se mantuvo en bolsas de plástico herméticas para su resguardo, hasta el momento de la densificación.

Con ayuda de la termobalanza se determinó la humedad inicial de la biomasa y esta fue de 3.81 % en promedio, por lo que se decidió tomar esta humedad como inicial. Se realizaron pruebas preliminares de densificado con valores de 15 % y 20 % de humedad; para ello se adicionó agua destilada a la biomasa por medio de aspersión en capas delgadas de la biomasa triturada. Las humedades fueron determinadas con la termobalanza y se verificaron antes de la densificación con ayuda del higrómetro. Todas las muestras después de hidratadas fueron colocadas en bolsas de plástico herméticas, y no fueron abiertas hasta la verificación final de humedad para su posterior densificación. Esta prueba fue llevada cabo en un formato para pellets de 6 mm de diámetro aproximadamente, con residuos procedentes de la cosecha de 2016.

De estas pruebas se obtuvieron pellets, los cuales fueron objetos de estudio en cuanto a densidad a granel, densidad individual y sobre todo se puso atención a su apariencia y la resistencia que tenían al ser impactados desde una altura de 1.85 metros contra una superficie dura. Los resultados se presentan en las secciones posteriores; sin embargo, esta prueba permitió observar que era posible la densificación de esta biomasa desde humedades bajas, aunque presentaban una baja densidad. Además de que se obtenían pellets con apariencia de no ser muy resistentes a la fricción, y que no presentaban uniformidad en el aglomerado.

Posteriormente se decidió cambiar de formato, con un diámetro de 8.0 mm; esto para poder emplear los pellets en procesos de evaporación de agua y obtener energía eléctrica. Para estas pruebas se decidió emplear la criba de 3.97 mm y se

empleó biomasa de las cosechas 2016 y 2017. A partir de estas pruebas se trabajó con los residuos del 2017, debido a que se terminó el otro residuo.

De igual manera se redujo el tamaño de partícula de la biomasa y se dejó secar por 1 día al sol, en finas capas de biomasa. Al final se determinó la humedad de la biomasa con ayuda de la termobalanza, la cual fue de 8.50 % de humedad en promedio. Se trabajó con esta humedad, además de humidificar por aspersion otras muestras a 15 % y 20 % de humedad. Antes de la densificación se medía la humedad con ayuda del higrómetro para comprobar que no se perdiera o ganara humedad en el trayecto.

De esta prueba se determinaron las densidades aparentes e individuales de los pellets; también se puso énfasis en su apariencia y resistencia al impacto, esto al dejar caer 10 pellets desde una altura de 1.85 metros. En todos los casos se obtuvieron densificados, aunque a humedades bajas se notaron pellets con baja resistencia a la fricción. La Figura 16 muestra los pellets obtenidos con una humedad inicial de 8.50 %; éstos apenas mostraban forma de aglomerado y aunque presentaban relativa resistencia al impacto se desintegraban al ser sometidos a fricción durante su manipulación y transporte.



Figura 16. Pellets de con 8.50 % de humedad inicial.

6.6. Pruebas preliminares de densificación, factor de control: tamaño de partícula

Posterior a la realización de las pruebas de humedad se decidió trabajar con diferentes tamaños de partícula; para ello se intercambiaron las cribas en el molino de martillos. Se utilizó un kilogramo de biomasa para cada tamaño de criba, y se emplearon cribas de 5/32 pulgadas, de ½ pulgada y de 1 pulgada.

Se empleó el molino de martillos, con las cribas descritas, para reducir el tamaño de partícula de la biomasa; se preparó un 1 kg de muestra para cada tamaño de criba. El fin de esta prueba fue determinar el tamaño de criba con el que era posible obtener pellets con una humedad de 15 % y 20 %, ya que ésta era la humedad máxima con la que se han producido algunos pellets.

6.7. Diseño de experimentos

En base a la caracterización inicial de la materia prima, así como a las pruebas de humedad y tamaño de partícula se decidió trabajar con dos factores de control: humedad y tamaño de criba, el cual determinaba el tamaño de partícula de la biomasa. Los niveles que se establecieron fueron:

- Humedad:

10 % de humedad inicial

15 % de humedad inicial

20 % de humedad inicial

Mientras que para el tamaño de la criba fueron:

- Tamaño de partícula (en relación con el tamaño de la criba)

5/32 pulgada (3.97 mm)

8.0 mm

½ pulgada (12.70 mm)

Con ello se estableció un diseño de experimento de 3^2 , es decir de dos factores y tres niveles. La presión y la temperatura al no ser factores controlables se consideraron como ruido, la temperatura se decidió medirla con un termopar sólo como dato informativo. La presión no fue posible medirla y sólo se trató de mantener la misma en todas las pruebas, manteniendo la misma longitud de los tornillos que aumentan o disminuyen la presión en la carcasa del equipo.

Con ayuda del programa JMP se diseñó el experimento, y se decidió que los tratamientos deberían tener dos replicas en total; los tratamientos finales se pueden ver en Tabla 4.

Una vez aleatorizado los tratamientos se prosiguió a la impresión de la tabla para producir los pellets en el orden aleatorizado de los tratamientos establecidos; esto con el fin de establecer si las variaciones observadas se deben al error experimental o a efectos debidos los factores de control, ya que si no se realiza el experimento aleatorizado se corre el riesgo de interpretar las variaciones incorrectamente (Castaño Tostado, 2014).

En cuanto a las variables de respuesta se establecieron las siguientes: el diámetro (mm), la longitud (mm), la densidad individual (g/cm^3), la densidad a granel (kg/m^3), el poder calorífico (kcal/g), el rendimiento (relación de biomasa que entra al proceso y la que se densifica %), humedad final (%), cenizas (%), y contenido de carbono en COT (%).

6.8. Limpieza de residuos

Los residuos se limpiaron con aire para retirar polvo con ayuda de una aspiradora; además de que se retiraron otros residuos ajenos al tipo de biomasa, como lo fueron hojas de maíz y se retiraron las semillas que aún se encontraban dentro de la paja para evitar que se densificaran junto con los residuos, ya que se observó un aumento del contenido de nitrógeno en las pruebas de caracterización cuando la semilla estaba presente, debido a la cantidad de proteína con la que cuenta la semilla. Se retiraron también las raíces, las cuales no eran muchas, esto para evitar

el aumento de nitrógeno en el pellet; además, la raíz en ocasiones trae tierra por lo que retirarla evita contaminación por este compuesto en el aglomerado final además de evitar la reducción de poder calorífico por la presencia de la tierra.

Tabla 4. Tabla de tratamientos aleatorizados, diseño de experimento 3² con dos replicas.

Humedad inicial (%)	Criba (mm)
20	12.70
20	3.97
20	3.96
20	12.70
10	3.97
10	12.70
20	8.00
10	8.00
15	3.97
10	12.70
15	12.70
10	8.00
20	8.00
10	3.97
15	8.00
15	8.00
15	3.97
15	12.70

6.9. Acondicionamiento

Los residuos del cultivo de frijol se molieron para reducir el tamaño de partícula, con cada una de las cribas en el orden que se muestra en la Tabla 4. Posteriormente, la biomasa se colocó en finas capas sobre un hule y se adicionó agua por aspersion para alcanzar la humedad de acuerdo con el diseño de experimentos. Para determinar la cantidad de agua a adicionarse se determinó en laboratorio la humedad inicial de una muestra de biomasa ya molida; y por balance de materia se determinó el agua a adicionar para cada una.

Se colocó un kilogramo de biomasa en bolsas herméticas y se sellaron hasta el momento de ser densificadas; antes de densificarla la biomasa se colocó en un contenedor y con ayuda del medidor de humedad se comprobó que la humedad inicial fuera la que se estableció en cada uno de los tratamientos. Algunas de las pruebas se muestran en el Anexo 1, como evidencia.

6.10. Producción de pellets

Empleando el equipo de densificado se obtuvieron los pellets mediante el empleo de presión para la obtención del producto final. Posteriormente con ayuda del tamiz que tiene el equipo, se retiró parte del polvo de los pellets y se dejaron enfriar, tal como se observa en la Figura 17.



Figura 17. Proceso de densificado, etapa de limpieza y enfriado.

Los pellets se tamizaron manualmente con una malla de 3.15 mm para seleccionar los pellets que cumplan con la longitud mínima de acuerdo a ISO 17225-6:2014 (ISO, 2014). Los pellets fríos y limpios se colocaron en bolsas herméticas para determinar el valor de las variables respuesta. La Figura 18 muestra parte de los pellets obtenidos durante el proceso de densificado, en la cual se observan algunas diferencias entre los tratamientos, como la longitud, la coloración y brillo. Estas muestras se analizaron para determinar las variables respuesta en el Laboratorio.



Figura 18. Pellets obtenidos para su posterior análisis en el Laboratorio.

Durante el proceso de densificado se midió la temperatura que se alcanzó en la matriz de formado del equipo, tal como se observa en la Figura 19. Para hacerlo, se introdujo el termopar en un orificio que se encuentra en la carcasa de la pelletizadora, también se hizo directamente en la matriz de formado. Este valor sólo es informativo, y se procuró que la temperatura fuera similar durante toda la investigación.



Figura 19. Medición de la temperatura en la matriz de formado.

6.11. Medición de la longitud y diámetro de los pellets

La longitud y el diámetro de los pellets se midieron una vez fríos, para ello se empleó el vernier. Ambas dimensiones se determinaron en 20 pellets para cada tratamiento, y para la medición se siguió el diagrama descrito en la norma ISO 17225 y representado en la Figura 20, donde D representa el diámetro y L la longitud.

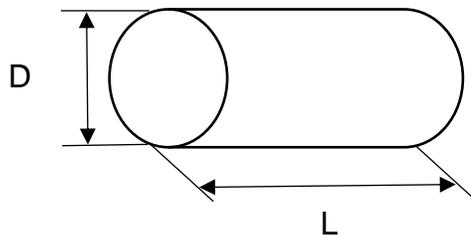


Figura 20. Dimensiones de un pellet, imagen basada en ISO 17225-6:2014.

Al final se determinó el promedio de longitud y diámetro para cada tratamiento.

6.12. Densidad individual

Para cada pellet, después de medir su longitud y su diámetro se pesó inmediatamente en una balanza con resolución de 0.1 mg. Posteriormente, con los datos de longitud y diámetro se determinó el volumen para los 20 pellets, y con el peso se calculó la densidad para cada uno de ellos y se determinó un promedio para cada tratamiento. Las ecuaciones que se emplearon, presentadas previamente en el capítulo 3, fueron las siguientes:

Volumen de pellet, ecuación 2:

$$V_p = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) * L \quad (2)$$

donde:

V_p : Volumen del pellet (cm^3)

D : Diámetro (cm)

L : Longitud (cm)

Densidad Individual, ecuación 3:

$$\rho_p = m_p/V_p \quad (3)$$

donde:

ρ_p : Densidad del pellet (g/cm³)

m_p : Peso del pellet (g)

V_p : Volumen del pellet (cm³)

6.13. Densidad a granel de los pellets y materia prima

Para determinar la densidad a granel de los pellets se empleó un vaso de precipitado de 50 cm³ y se comprobó con agua destilada que el volumen fuera el descrito anteriormente. Una vez que se validó el volumen, el vaso fue puesto en la balanza y se taró. Posteriormente fue llenado con los pellets correspondientes al experimento uno, hasta la marca de 50 cm³, cuidando que los pellets no sobresalieran; para ello se aplicó un poco de presión además de que fueron aplicados ligeros golpes para que los pellets se acomodaran en el vaso, procurando cubrir todo el espacio disponible en el vaso. Posterior a esta operación, el vaso se colocó en la balanza y se registró el peso del vaso con biomasa. La densidad a granel se calculó por la ecuación 8:

$$\rho_g = \frac{m_{ps}}{50 \text{ cm}^3} \quad (8)$$

donde:

ρ_g : densidad a granel (g/cm³)

m_{ps} : peso de los pellets que ocupan un volumen de 50 cm³ en (g)

La operación se repitió 3 veces para el tratamiento 1 y se realizó la misma operación para los 17 tratamientos restantes; esto con el fin de tener un promedio por cada tratamiento, antes de cada operación el vaso se limpió y taró para evitar acumulación de polvo que pudiera afectar los resultados.

Un procedimiento similar se llevó a cabo para la biomasa sin moler; esto con el fin de determinar en qué relación aumenta la densidad de la biomasa una vez densificada. Para ello se empleó un vaso de 1 litro, y de la misma manera se validó el volumen y se marcó. Una vez realizado esto, se taró y se llenó con biomasa. La masa que se obtuvo se dividió entre un 1 dm^3 para conocer la densidad de la biomasa sin procesar.

6.14. Otras pruebas fisicoquímicas de los pellets

A los pellets que se obtuvieron durante la fase de experimentación se les realizaron determinaciones en cuanto al contenido de Carbono (% de C orgánico), contenido de cenizas (%), humedad final (%) y poder calorífico en kcal/g. Todas estas determinaciones se realizaron con los mismos métodos empleados para la biomasa y descritos con anterioridad, con la diferencia que los pellets tuvieron que ser triturados para las pruebas de contenido de carbono, cenizas, humedad final; en el caso del poder calorífico se emplearon pellets con un peso aproximado a un gramo, que es el máximo que permite el equipo; en casos donde los pellets pesaban más de un gramo, con mucho cuidado se retiró parte del pellet para lograr un peso máximo de un gramo.

Durante el proceso de densificado se determinó el porcentaje de rendimiento, el cual se obtuvo de dividir el peso de los pellets obtenidos, una vez fríos, entre el peso inicial de la biomasa; esto para tener una relación de que la biomasa que entró al proceso y que pudo densificarse en relación con el tamaño de partícula y la humedad inicial de la biomasa. Los resultados obtenidos durante la investigación se presentan en la siguiente sección.

7. RESULTADOS

7.1. Caracterización inicial de la materia prima

Los primeros resultados obtenidos fueron las caracterizaciones de la materia prima, los cuales se presentan en las Tablas 5 y 6. Es importante hacer notar que durante las pruebas preliminares no se limpió el material, ya que la intención era emplearlo directamente en el proceso de densificación; sin embargo, se obtuvieron altas cantidades de nitrógeno y un alto contenido energético, esto pudiera deberse a la presencia de semilla (frijol) en los residuos, los cuales al no ser removidos causaron un incremento en estas determinaciones. Por esa razón en las pruebas finales se aseguró limpiar los residuos, sobre todo para eliminar semilla y algunas raíces que pudieran estar en la planta; por lo que los resultados de nitrógeno y de poder calorífico se observaron menores, siendo beneficioso el bajo contenido de nitrógeno para cumplir con las especificaciones de ISO y tener menos formaciones de NOx durante la combustión final del producto.

Tabla 5. Resultados de la caracterización inicial de los desechos de la cosecha de 2016.

Análisis	Método	Resultado
%Humedad	Gravimétrico (PROY-NOM-211-SSA-2002)	8.531
% Cenizas	Gravimétrico (NMX-F-066-S-1978)	6.220
% Carbono	Método gravimétrico (Kalra & Maynard, 1991)	53.983*
% Sólidos Volátiles	Gravimétrico (APHA, 1999)	93.656*
kcal/g	Calorímetro isoperibólico	3.823*
N total	Digestión y espectrofotometría	6.415*
Densidad kg/m ³		36.0
*Respecto a peso seco		

Tabla 6. Resultados de la caracterización inicial de los desechos de la cosecha de 2017.

Análisis	Método	Resultado
% Humedad	Gravimétrico (PROY-NOM-211-SSA-2002)	10.710
% Cenizas	Gravimétrico (NMX-F-066-S-1978)	4.962
% Carbono	Método gravimétrico (Kalra & Maynard, 1991)	54.727*
% Sólidos Volátiles	Gravimétrico (APHA, 1999)	94.591*
kcal/g	Calorímetro isoperibólico	1.973*
N total	Digestión y espectrofotometría	0.609*
Densidad kg/m ³		37.0
*Respecto a peso seco		

7.2. Resultados de las pruebas preliminares con formato de 6 mm, factor de control humedad, residuos de 2016

Cabe mencionar que, a los pellets elaborados en las pruebas preliminares, donde se controló la humedad inicial de la biomasa con un formato de 6 mm de diámetro, sólo se determinó la densidad individual de los pellets. Esta prueba ayudó a determinar el comportamiento de la biomasa en el equipo y ver la factibilidad de ser procesada. Por ello, los resultados de la caracterización completa para las pruebas de 3.81 %, 5.0 % y 20.0 % de humedad inicial se muestran en la Tabla 7, 8 y 9. Un resumen de las pruebas se muestra en la Tabla 10.

Tabla 7. Determinaciones para los pellets con 3.81 % de humedad inicial.

Pellet	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
1	5.56	8.54	0.1473	0.207	0.7104
2	5.11	5.10	0.0695	0.105	0.6645
3	5.60	4.58	0.1019	0.113	0.9033
4	5.59	5.74	0.1423	0.141	1.0101
5	5.53	4.28	0.0602	0.103	0.5856
6	5.32	3.97	0.0887	0.088	1.0051
7	5.48	5.43	0.1005	0.128	0.7847
8	5.52	10.40	0.2830	0.249	1.1371
9	5.51	3.91	0.0792	0.093	0.8495
10	5.31	3.97	0.0773	0.088	0.8792
Promedio	5.45	5.59	0.1150	0.131	0.8530
Desviación estándar	0.16	2.18	0.0657	0.055	0.1712

Tabla 8. Determinaciones para los pellets con 5.0 % de humedad inicial.

Pellet	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
1	5.56	15.32	0.4225	0.372	1.136
2	5.53	17.83	0.5021	0.428	1.172
3	5.59	9.80	0.2497	0.241	1.038
4	5.58	16.21	0.3896	0.396	0.983
5	5.63	10.90	0.2641	0.271	0.973
6	5.50	10.01	0.2794	0.238	1.175
7	5.64	8.12	0.2184	0.203	1.077
8	5.71	11.05	0.2565	0.283	0.906
9	5.50	10.20	0.2895	0.242	1.195
10	5.52	9.24	0.2144	0.221	0.970
Promedio	5.58	11.87	0.31	0.290	1.062
Desviación estándar	0.07	3.32	0.10	0.080	0.103

Tabla 9. Determinaciones para los pellets con 20.0 % de humedad inicial.

Pellet	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
1	5.67	21.92	0.6516	0.553	1.177
2	5.53	20.96	0.6212	0.503	1.234
3	5.62	12.75	0.3955	0.316	1.250
4	5.53	10.38	0.3017	0.249	1.210
5	5.65	24.39	0.5761	0.612	0.942
6	5.54	23.76	0.5748	0.573	1.004
7	5.52	20.89	0.6209	0.500	1.242
8	5.60	12.30	0.2761	0.303	0.911
9	5.50	9.21	0.2784	0.219	1.272
10	5.53	11.33	0.3082	0.272	1.133
Promedio	5.57	16.79	0.46	0.410	1.1376
Desviación estándar	0.06	6.07	0.16	0.151	0.1355

Tabla 10. Promedio de las determinaciones realizadas a los pellets con diámetro de 6 mm.

Pellets	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
Humedad inicial 3.81 %	5.45	5.59	0.115	0.131	0.853
Humedad inicial 5.0 %	5.58	11.87	0.3086	0.29	1.0625
Humedad inicial 20.0 %	5.57	16.79	0.46	0.41	1.1376

En las tablas anteriores se registraron los datos obtenidos durante la primera prueba. Con esta prueba se notó que, al incrementar la humedad inicial, antes del densificado, el diámetro, la longitud y el peso de los pellets incrementaban; por lo que la densidad aumentaba y probablemente el poder calorífico también lo haría. Sin embargo, esta prueba se llevó a cabo con un formato de 6 mm y empleando un tamaño de partícula menor a 1 mm. De igual manera se notó que la desviación estándar en las determinaciones incrementaba al disminuir la humedad inicial en las muestras, lo que indicaba que es era difícil controlar el proceso a humedades bajas; por lo que podría requerirse de un aglutinante a estas humedades.

7.3. Resultados de las pruebas preliminares con formato de 8 mm, factor de control humedad, residuos de 2016

Los resultados completos de la caracterización de los pellets para las pruebas que se llevaron a cabo a humedades de 8.5 %, 15.0 % y 20.0 % de humedad inicial se muestran en la Tabla 11, 12 y 13. Un resumen de las pruebas se muestra en la Tabla 14.

Tabla 11. Determinaciones para los pellets con 8.5 % de humedad inicial.

Pellet	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
1	7.99	22.78	0.9265	1.142	0.8112
2	8.11	13.20	0.5931	0.682	0.8698
3	7.98	20.28	0.8930	1.014	0.8804
4	7.98	17.33	0.7901	0.867	0.9116
5	8.08	28.18	1.2320	1.445	0.8526
6	8.00	16.68	0.7968	0.838	0.9503
7	7.98	21.16	0.8821	1.058	0.8335
8	7.98	16.13	0.7032	0.807	0.8717
9	7.99	16.98	0.7215	0.851	0.8475
10	8.00	15.32	0.6613	0.770	0.8588
Promedio	8.01	18.80	0.8200	0.947	0.8687
Desviación estándar	0.05	4.37	0.1800	0.224	0.0395

Tabla 12. Determinaciones para los pellets con 15.0 % de humedad inicial.

Pellet	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
1	8.06	36.54	1.6694	1.864	0.895
2	8.09	19.48	0.8924	1.001	0.891
3	8.02	16.76	0.8045	0.847	0.950
4	8.05	20.86	0.9998	1.062	0.942
5	8.01	22.90	0.9997	1.154	0.866
6	8.05	15.01	0.7678	0.764	1.005
7	8.10	18.50	0.8868	0.953	0.930
8	8.00	20.32	0.9931	1.021	0.972
9	8.01	18.12	0.8532	0.913	0.934
10	8.02	15.32	0.6932	0.774	0.896
Promedio	8.04	20.38	0.96	1.035	0.928
Desviación estándar	0.03	6.19	0.27	0.317	0.042

Tabla 13. Determinaciones para los pellets con 20.0 % de humedad inicial.

Pellet	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
1	7.98	22.07	1.0573	1.104	0.958
2	8.19	19.01	0.9544	1.001	0.953
3	8.11	31.08	1.4649	1.606	0.912
4	8.06	29.59	1.3939	1.510	0.923
5	7.99	21.80	1.0627	1.093	0.972
6	7.99	16.39	0.7941	0.822	0.966
7	7.99	17.45	0.8712	0.875	0.996
8	8.06	23.06	1.1224	1.177	0.954
9	8.02	22.01	1.0452	1.112	0.940
10	8.10	22.04	1.3516	1.136	1.190
Promedio	8.05	22.45	1.11	1.143	0.9765
Desviación estándar	0.07	4.72	0.22	0.247	0.0787

Tabla 14. Promedio de las determinaciones realizadas a los pellets con diámetro de 8 mm.

Pellets	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
Humedad inicial 8.5 %	8.01	18.8	0.82	0.947	0.8687
Humedad inicial 15.0 %	8.04	20.38	0.956	1.035	0.9283
Humedad inicial 20.0 %	8.05	22.45	1.11	1.143	0.9765

El objetivo de estas pruebas fue determinar si el material se podría densificar con humedades bajas y con este tamaño de diámetro en el equipo; siendo estos materiales susceptibles de empleo en la producción de energía eléctrica o calentamiento.

En las tablas anteriores se registraron los datos obtenidos durante la segunda prueba. Con esta prueba se volvió a observar que, al incrementar la humedad inicial, antes del densificado, el diámetro, la longitud y el peso de los pellets incrementaban; por lo que la densidad aumentaba y probablemente el poder calorífico también lo haría. Sin embargo, en comparación con la primera prueba, las densidades fueron menores; y esto se atribuyó principalmente a que el tamaño de partícula empleado en esta prueba fue de 3.97 mm, mayor al empleado a la prueba anterior. Por lo que posiblemente durante la densificación el pellet contenía menor cantidad de materia, al tener una partícula más grande y con más espacios entre ellas, lo que se vio reflejado en una menor densidad, sobre todo en humedades bajas, ver Figura 21. Sin embargo, aunque existieran espacios entre las partículas posiblemente la humedad pudo haber ocupado esos espacios por lo que la densidad aumentó con una humedad inicial mayor, aunque fuera la misma criba empleada durante la molienda, como se observa en la Figura 22.



Figura 21. Pellets de segunda prueba, elaborados con humedad inicial de 8.5 % y criba de 3.97 mm.



Figura 22. Pellets de segunda prueba, elaborados con humedad inicial de 15 % y criba de 3.97 mm.

De igual manera, al aumentar la humedad los pellets presentaron mayor brillo, lo que pudiera significar que se obtenían mejores pellets en relación a densidad, poder calorífico y resistencia; sin embargo, debe considerarse que al tener mayor humedad, al combustionar el pellet se perdería energía para evaporar el agua contenida en el pellet; es decir, se perdería 1 caloría por cada gramo de agua por cada grado Celsius ($1 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$) que se elevara la temperatura o lo que es igual $4.186 \text{ J/g}^{\circ}\text{C}$. También, las longitudes de los pellets en esta prueba fueron mayores a las de las de la primera prueba, aunque esto se atribuyó al cambio de formato.

7.4. Resultados de las pruebas preliminares con formato de 8 mm, factor de control, tamaño de criba, residuos de 2017

Para las últimas pruebas preliminares, se mantuvo constante la humedad inicial de la biomasa en 20 % y lo que se cambió en cada tratamiento fue el tamaño de la partícula, la cual estuvo en función del diámetro de criba empleada en el molino. El formato de la pelletizadora se mantuvo en 8 mm, y de igual manera se determinó solo la densidad individual de los pellets. El objetivo era saber si el material se podría densificar con los diversos tamaños de cribas con los que se contaba, e incluso verificar que se pudieran emplear tamaños de partículas mayores a 1 mm.

Los resultados completos de la caracterización de los pellets para las pruebas que se llevaron con las cribas de 1 pulgada (25.4 mm), ½ pulgada (12.7 mm) y 5/32 pulgada (3.97 mm) se muestran en las Tablas 15, 16 y 17. Un resumen de las pruebas se muestra en la Tabla 18.

Tabla 15. Determinaciones para los pellets con 20.0 % de humedad inicial y criba de 1 pulgada.

Pellet	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
1	8.10	17.14	0.6142	0.883	0.6954
2	8.09	23.07	0.4979	1.186	0.4199
3	8.21	17.57	0.4744	0.930	0.5100
4	8.05	14.53	0.3645	0.740	0.4929
5	8.19	14.39	0.3324	0.758	0.4385
6	8.17	13.42	0.3556	0.704	0.5054
7	8.14	29.13	0.6591	1.516	0.4348
8	8.02	21.83	0.5747	1.103	0.5211
9	8.37	29.82	0.5979	1.641	0.3644
10	8.28	24.71	0.5530	1.331	0.4156
Promedio	8.16	20.56	0.5024	1.079	0.4798
Desviación estándar	0.11	6.06	0.1175	0.334	0.0911

Tabla 16. Determinaciones para los pellets con 20.0 % de humedad inicial y criba de ½ pulgada.

Pellet	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
1	8.08	16.83	0.8014	0.863	0.929
2	8.10	32.52	1.6763	1.676	1.000
3	8.08	24.20	1.0382	1.241	0.837
4	8.01	20.02	0.9678	1.009	0.959
5	7.99	18.21	0.8965	0.913	0.982
6	8.01	24.29	1.1232	1.224	0.918
7	7.99	22.60	1.0487	1.133	0.925
8	8.02	20.12	0.9395	1.016	0.924
9	8.04	19.32	0.8567	0.981	0.873
10	8.00	16.84	0.8512	0.846	1.006
Promedio	8.03	21.50	1.02	1.090	0.935
Desviación estándar	0.04	4.72	0.25	0.248	0.054

Tabla 17. Determinaciones para los pellets con 20.0 % de humedad inicial y criba de 5/32 pulgada.

Pellet	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
1	7.99	28.23	1.6958	1.415	1.198
2	8.15	28.01	1.4204	1.461	0.972
3	7.99	23.52	1.4664	1.179	1.243
4	8.10	23.52	1.3516	1.212	1.115
5	8.20	27.01	1.5348	1.426	1.076
6	8.18	26.78	1.4703	1.407	1.045
7	8.02	25.26	1.1721	1.276	0.919
8	7.98	22.07	1.0573	1.104	0.958
9	8.11	22.21	1.3886	1.147	1.210
10	7.99	22.87	1.4647	1.147	1.277
Promedio	8.07	24.95	1.40	1.278	1.1014
Desviación estándar	0.09	2.40	0.18	0.137	0.1279

Tabla 18. Promedio de las determinaciones realizadas a los pellets con diámetro de 8 mm y humedad inicial de 20.0 %.

Pellets	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
Criba de 25.4 mm	8.16	20.56	0.5024	1.079	0.4798
Criba de 12.70 mm	8.03	21.50	1.0200	1.090	0.9353
Criba de 3.97 mm	8.07	24.95	1.4000	1.278	1.1014

En las tablas anteriores se registraron los datos obtenidos durante la tercer y última prueba de exploración; es importante recordar que la humedad inicial fue de 20 % y el tamaño de partícula se vio modificado para cada tratamiento. Se puede apreciar que la densidad incrementó con tamaños de partículas menores, esto debido a que las longitudes y pesos fueron mayores con tamaños de partículas pequeñas. En contraparte, el diámetro fue menor cada vez que el tamaño de partícula disminuía, lo que indicaba que la presencia de partículas de tamaño más grande provocaba espacios dentro del aglomerado, lo que se traduce en un diámetro más grande; sin embargo esto no beneficiaba al diámetro ni al peso, ya que las partículas más grandes no presentaban la misma adherencia que las de menor tamaño, por lo que también se vio reflejado con un peso menor por la presencia de aire en el pellet.

Es importante mencionar que al emplear un tamaño de partículas de 1 pulgada no se obtuvieron aglomerados resistentes a una humedad de 20 % inicial; tampoco se observó que se formara un densificado con buena forma y brillo, ver Figura 23. Incluso se realizó una prueba con 15 % de humedad inicial con la que ni siquiera se logró la formación de pellets con dicho tamaño de criba; a dicha humedad no se realizaron las pruebas con los demás tamaños de partículas, debido a que los pellets se observaron con buena apariencia y resistencia al impacto.



Figura 23. Aglomerados obtenidos con criba de 1 pulgada de diámetro a humedad inicial de 20 %.

Debido a esto la criba de 1 pulgada fue descartada, y se emplearon las otras cribas en esta prueba junto con una de 8 mm, la cual coincidía con el diámetro de la matriz de formado del equipo perteneciente al Campus Amazcala.

Con ayuda de estas pruebas, también se determinó la velocidad de molienda para la biomasa, en kg/h, para los tamaños de criba de 3.97 mm, 8.0 mm y 12.7 mm; esto con el objetivo de determinar en qué tamaño de criba la velocidad de molienda es menor, y por lo tanto en cual situación se consume mayor cantidad de energía.

Tabla 19. Velocidad de molienda en el molino de martillos.

Tamaño de criba (mm)	Velocidad kg/h
3.97 mm	5.96
8.00 mm	12.23
25.4 mm	15.18

Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 19, donde se puede apreciar que entre más pequeño el tamaño de partícula, mayor tiempo se requiere para la molienda; lo que impacta de manera negativa ya que representa mayor consumo de energía. Además, el tamaño de motor es pequeño de 1.5 HP en comparación

con el motor de la pelletizadora de 5 HP con el que se alcanzaron velocidades en promedio de 120 kg/h. Es importante enfatizar que la biomasa procede de una leguminosa y la planta tiene forma de enredadera, lo que dificulta la molienda; ya que la alimentación no es tan fluida como en el caso de las cáscaras, aserrín o pasto.

7.5. Resultados de los experimentos finales

Una vez finalizadas las pruebas de exploración, se decidió trabajar con un intervalo de 10 a 20 % de humedad inicial con un punto intermedio, al igual que con el tamaño de criba el cual fue de 5/32 a ½ pulgada.

Para caracterizar la densidad en cada tratamiento se decidió tomar una muestra de 20 pellets, mientras que para el rendimiento se determinó por tratamiento; estos resultados se muestran en la Tabla 20. Para la determinación de cenizas, humedad final, poder calorífico, y contenido de carbono se realizó por triplicado el método, y se obtuvo un promedio; el resumen de los resultados se presenta en la Tabla 21.

Las Tablas 20 y 21 muestran de manera resumida los datos obtenidos durante la fase de experimentación final del proyecto; estos datos permitieron realizar el análisis estadístico en el programa JMP para determinar el mejor tratamiento, bajo las condiciones de cumplir con las especificaciones de la norma ISO 17225. En la Tabla 21 se muestran dos columnas de calores superiores, las cuales contienen los mismos sólo que en una columna se muestran los resultados en kcal/g, mientras que en la otra se muestran en MJ/g, que son las unidades del sistema métrico y empleadas por ISO.

Tabla 20. Resultados de las determinaciones de densidad y rendimiento.

Humedad inicial (%)	Criba (mm)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Densidad individual (g/cm³)	Densidad a granel (kg/m³)	Rendimiento (%)
20.0	12.70	8.08	19.39	1.1020	597.38	47.60
20.0	3.97	8.15	20.16	1.0583	514.26	52.17
20.0	3.97	8.14	21.11	1.0667	521.39	53.37
20.0	12.70	8.09	19.94	1.1212	607.54	49.50
10.0	3.97	8.08	14.20	1.0740	644.69	15.19
10.0	12.70	8.09	17.46	1.1216	611.64	30.10
20.0	8.00	8.13	18.61	1.1891	601.94	59.30
10.0	8.00	8.04	15.19	0.9017	543.90	12.60
15.0	3.97	8.12	17.23	1.0981	605.76	54.60
10.0	12.70	8.06	17.74	1.0982	619.50	33.50
15.0	12.70	8.10	16.53	1.0849	557.72	28.90
10.0	8.00	8.07	15.30	1.0306	560.00	14.80
20.0	8.00	8.12	18.39	1.2066	612.82	62.10
10.0	3.97	8.10	17.01	1.0991	621.74	15.14
15.0	8.00	8.09	17.78	1.1738	612.54	51.30
15.0	8.00	8.09	16.23	1.1520	600.12	49.60
15.0	3.97	8.09	16.42	1.1629	600.76	58.10
15.0	12.70	8.06	16.60	1.1337	590.18	26.90

Tabla 21. Resultados de las determinaciones químicas de los pellets.

Humedad inicial (%)	Criba (mm)	Poder Calorífico Superior (kcal/g)	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	Humedad final (%)	Cenizas (%)	COT (%)
20.0	12.70	3.843	16.087	11.496	5.952	53.633
20.0	3.97	3.752	15.706	14.517	5.316	54.302
20.0	3.97	3.802	15.915	14.481	5.255	54.288
20.0	12.70	3.849	16.112	12.252	6.399	53.744
10.0	3.97	4.016	16.811	7.251	5.926	53.957
10.0	12.70	3.987	16.690	7.093	6.088	53.812
20.0	8.00	3.824	16.007	11.171	5.316	54.394
10.0	8.00	3.990	16.702	7.885	5.564	54.203
15.0	3.97	3.955	16.556	8.310	5.924	54.170
10.0	12.70	3.935	16.472	9.727	5.424	53.994
15.0	12.70	3.926	16.434	9.417	6.044	53.870
10.0	8.00	3.956	16.560	8.525	6.593	53.894
20.0	8.00	3.867	16.187	12.187	5.321	54.249
10.0	3.97	3.991	16.706	7.614	5.816	54.316
15.0	8.00	3.910	16.367	9.698	5.756	54.148
15.0	8.00	3.939	16.489	9.322	5.818	54.217
15.0	3.97	3.937	16.480	9.129	6.102	54.054
15.0	12.70	3.948	16.526	8.425	6.612	53.639

En la Tabla 22 se muestran las temperaturas a las que se densificó la biomasa. Se puede apreciar que las temperaturas se mantuvieron en un intervalo de 90 °C a 105 °C; temperaturas que son comparables a otros estudios, 95.0 °C para pellets de paja y madera (Lu et al., 2014), y que además se encuentran dentro de la temperatura óptima para la deformación plástica (Lisowski et al., 2017). Algunas fotografías en las que se observa el procedimiento de medición de temperatura en la matriz de formado se muestran en el Anexo 2.

Tabla 22. Temperatura de formación de pellets.

Humedad inicial (%)	Criba (mm)	Temperatura de formación (°C)
20.0	12.70	94
20.0	3.97	104
20.0	3.97	105
20.0	12.70	98
10.0	3.97	104
10.0	12.70	100
20.0	8.00	104
10.0	8.00	100
15.0	3.97	97
10.0	12.70	98
15.0	12.70	94
10.0	8.00	95
20.0	8.00	99
10.0	3.97	101
15.0	8.00	98
15.0	8.00	97
15.0	3.97	99
15.0	12.70	98

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. Análisis de resultados de pruebas preliminares

Las pruebas preliminares mostraron que la biomasa proveniente de los residuos de cultivo de frijol era capaz de ser densificada, sin la necesidad del empleo de un aditivo aglomerante; sin embargo, se determinó que, para tamaños de partículas muy grandes, de 25.40 mm, no era posible obtener pellets ni con humedades altas de 20.0 %, por lo que se descartó a este tamaño de criba. También se pudo apreciar que al aumentar la humedad inicial de la biomasa la densidad individual aumentó, esto manteniendo un tamaño de criba constante; mientras que al emplear tamaño de partícula menor la densidad aumentaba en los casos, donde se mantuvo la humedad constante, por lo que la densidad se ve afectada por la humedad y tamaño de partícula (Harun y Afzal, 2016). En algunos casos se ha visto que depende también de la presión, ya que incluso a humedades bajas se puede tener una alta densidad, como 6.1 % (Huang et al., 2017); pero esta exploración sólo fue preámbulo de la investigación, derivado de que no se habían determinado con anterioridad algunas condiciones para el densificado de esta biomasa.

Por último, se pudo apreciar que la diferencia de velocidades de flujo de materia en la molienda depende del tamaño de criba empleado; siendo los tamaños menores los que menos velocidad tienen, y por lo tanto mayor consumo de energía pueden tener. Por lo que en la práctica sería preferible el empleo de cribas de mayor tamaño, como la de 8.00 mm, o emplear un molino con mayor capacidad o con mayor potencia de motor.

8.2. Análisis de resultados del experimento final

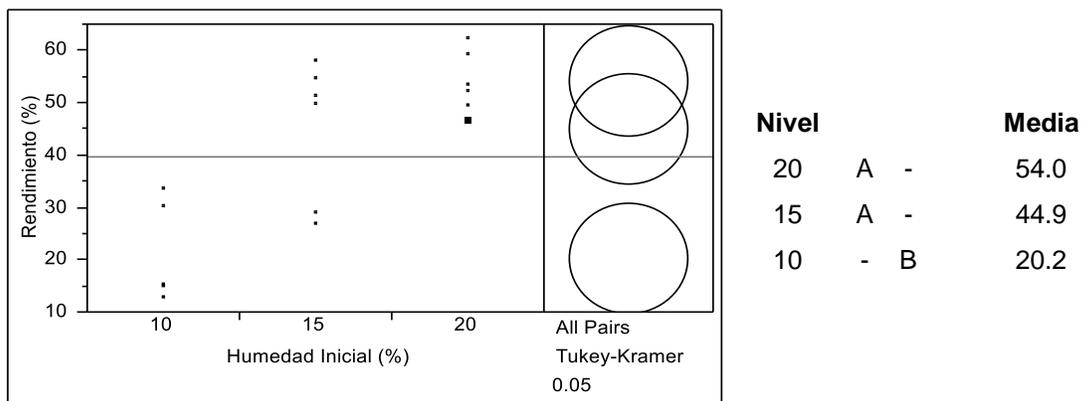
En esta sección se muestra el análisis de datos, el cual fue realizado con el apoyo del programa JMP. Para ello se analizaron los datos correspondientes; en primer lugar, de las respuestas obtenidas en función de los factores de control de manera individual, posteriormente, se analizaron los datos con la función Fit Model, para observar las posibles interacciones de los factores de control.

8.2.1. Análisis del rendimiento final

La primera variable que se analizó fue el rendimiento, debido a que fue la primera que se calculó, y la cual se calcula como la relación entre la masa que entró y salió del proceso de densificado. Esta variable resulta de importancia ya que permitió saber si las condiciones eran favorables o no, ya que en algunos casos pudieran obtenerse pellets con buenas densidades o poder calorífico; sin embargo, no valdría mucho la pena si los rendimientos de éstos fueran muy bajos, lo que indica que a mayor rendimiento mejor aprovechamiento de la biomasa, debido a una mayor aglomeración de las partículas, que en parte se ve beneficiada por una disminución de la temperatura vítrea de la lignina gracias al aumento de la humedad inicial. En la Figura 24 se muestran los resultados del análisis individual de los efectos. En este caso para la humedad inicial se observa una clara tendencia del aumento del rendimiento con respecto al aumento de la humedad inicial; esto debido a que se disminuye la temperatura de transición vítrea de la lignina con la humedad, por lo que existe un mejor densificado. Las temperaturas de formación fueron similares en todos los tratamientos, por lo que al disminuir la temperatura vítrea con una mayor humedad se disponía de mayor cantidad de lignina para aglomerar la biomasa. Además de que la humedad disminuye el polvo y permite el mejor moldeado del pellet, evitando pérdidas por el manejo de la biomasa; sobre todo durante el densificado, ya que a menor humedad la formación de polvo era mayor y parte de la biomasa era solamente molida en los rodillos. Es por ello que a humedades de 10.0 % los resultados fueron los más bajos, y no superaron el 35 % de rendimiento.

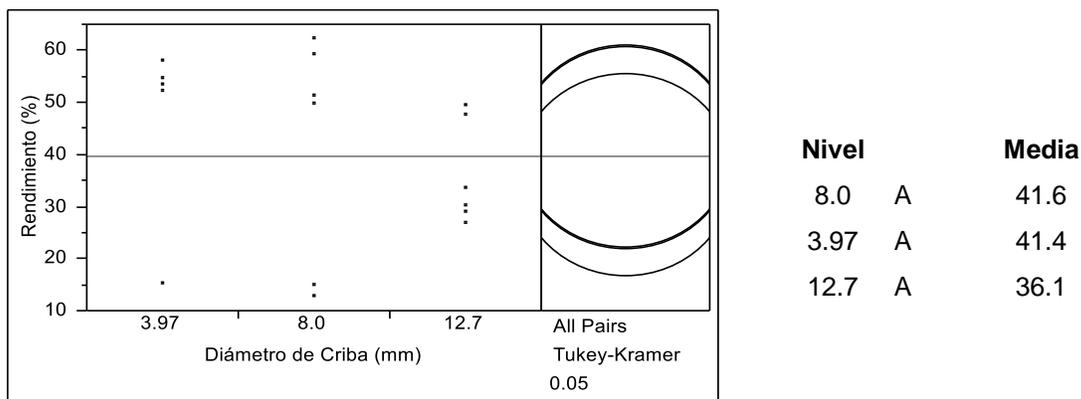
Para el caso del diámetro de criba no se observa un efecto significativo del factor por sí solo, ya que los tratamientos no tienen diferencias significativas como se observa en la Figura 25; la prueba Tukey tampoco muestra diferencias significativas entre las medias de los tratamientos. En algunos casos, el rendimiento se ve favorecido por el uso de cribas con diámetros de 3.97 mm y de 8.0 mm. Con el diámetro de 12.7 mm los resultados si fueron más bajos, debido a que el tamaño de partícula superó al diámetro de la matriz de formado; por lo que mucha biomasa era

densificada con rapidez y se quedaba entre los rodillos, lo que provocaba que se redujera aún más su tamaño, perdiéndose biomasa en forma de polvo.



Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 24. Análisis del rendimiento (%) en función de la humedad inicial (%).



Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 25. Análisis del rendimiento (%) en función del diámetro de criba (mm).

El análisis de la interacción entre ambos factores se realizó con ayuda de JMP y por medio del análisis Full Factorial; los resultados se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Análisis de efectos en el rendimiento.

Fuente de Variación	Nparm	GL	Suma de Cuadrados	Fc	Prob > F
Humedad Inicial (%)	2	2	3666.7555	681.3772	<.0001*
Diámetro de Criba (mm)	2	2	118.4445	22.0100	0.0003*
Humedad Inicial (%)*Diámetro de Criba (mm)	4	4	1339.8956	124.4935	<.0001*

En la Tabla 23 se observa que el efecto de los factores individuales es significativo, y en el caso de la humedad lo es aún más, con un valor de P de <0.0001; sin embargo, este mismo valor de P lo tiene la interacción de los dos factores de control, por lo que se decidió interpretar a este efecto sin revisar sus efectos parentales. Lo anterior indica que existe dependencia de los efectos de ambos factores sobre el rendimiento (Figura 26). En este gráfico se observa un mayor efecto sobre el rendimiento cuando se emplea una humedad de 10.0 %, ya que las densidades son bajas y disminuyen con el uso de cribas de 3.97 y 8.00 mm de diámetro. En cambio, el rendimiento se ve menos afectado con humedades de 20.0 %, manteniéndose rendimientos similares para los tres tamaños de criba, y para el caso de la humedad al 15.0 % el rendimiento no tiene mucha diferencia cuando se emplean cribas de diámetro de 3.97 y 8.00 mm; por lo que las humedades de 20.0% y de 15.0% son buenas opciones para densificar esta biomasa, con tamaños de criba medianos. Sin embargo, los rendimientos son bajos, por debajo del 60.0%, por lo que sería bueno emplear un aglutinante como aceite vegetal usado o glicerol; lo anterior para que pudiese aumentar la aglomeración de la biomasa, o en todo caso emplear una recirculación para aprovechar las mermas o biomasa que no se densificó en un primer proceso, lo que implicaría el uso de aire para recircular la materia no densificada. En la humedad de 10.0 % sólo en diámetro alto se mejora el

rendimiento; a 20.0 % de humedad siempre el rendimiento es alto pero mejora con diámetros bajos. Por último, con la humedad de 15.0 % un diámetro grande de criba afecta al rendimiento.

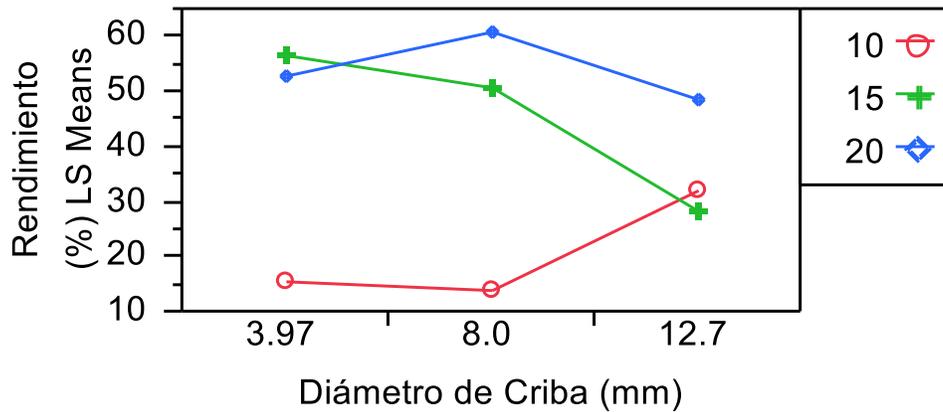


Figura 26. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad Inicial para la variable de respuesta de rendimiento.

En cuanto a la validación de la prueba se graficaron los residuales con JMP, Figura 27, ya que éstos representan la parte que no puede ser explicada por el efecto del tratamiento. Los residuales no presentan valores atípicos, ya que todos los datos se distribuyen de manera aleatoria entre residuales de 2.0 y -2.0 %, y no se observa alguna tendencia o una variabilidad constante; tampoco se observa que los errores se desvíen con respecto a la normalidad. Por lo que se concluye que la prueba no presentó errores diferentes a los que se pudieran explicar por error experimental, por lo que se aceptaron los resultados de esta prueba.

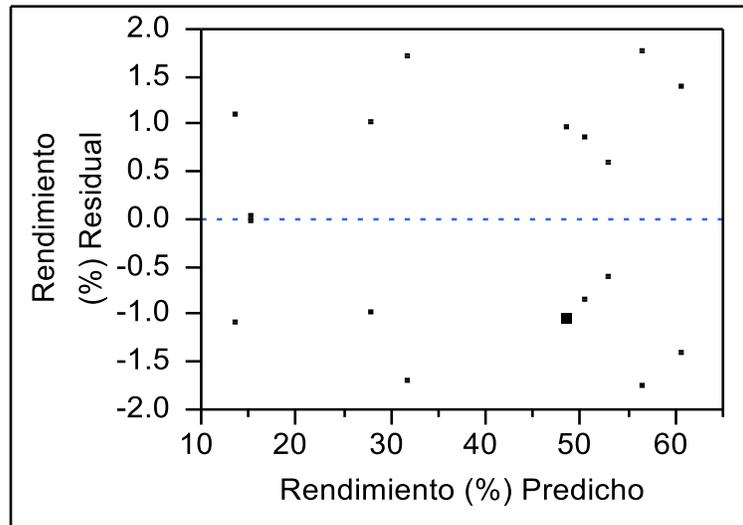


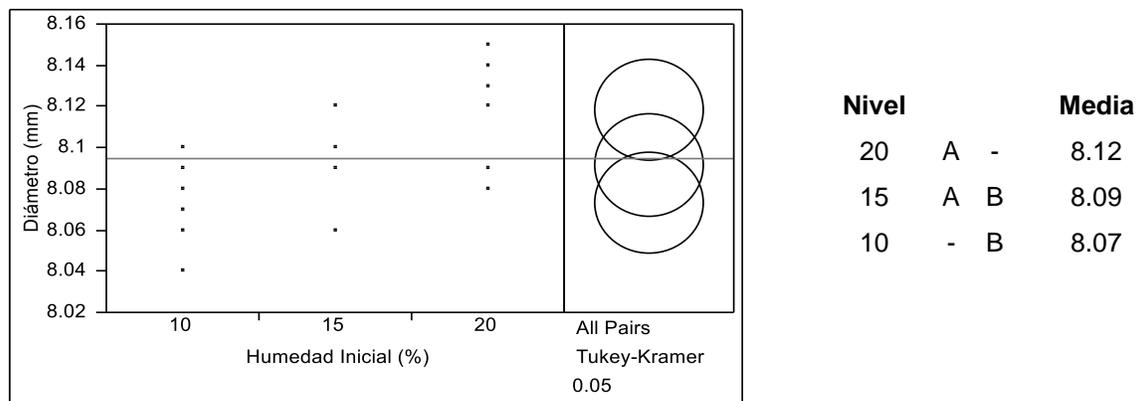
Figura 27. Gráfico de residuales para análisis de rendimiento.

8.2.2. Análisis del diámetro

La segunda variable en analizarse fue el diámetro en función de la humedad, en este caso, se considera como el mejor diámetro aquel que se acerca a los 8.0 mm, el cual es el diámetro de la matriz de formado, ya que indicaría que existe menos expansión, sin embargo, se puede tener una tolerancia de 1 mm, además se debe considerar que siempre existe una ligera expansión final. Los resultados del análisis se muestran en la Figura 28; se puede apreciar en primer lugar que los diámetros son mayores al diámetro de la matriz de formado, 8.00 mm. En segundo lugar, se observa que al aumentar la humedad inicial en las muestras el diámetro se incrementa, notando diferencias prácticamente en dos de los tratamientos entre 10.0 y 20.0 % de humedad; esto se ve reflejado en la prueba de Tuckey, en la cual también se aprecia que no existen diferencias significativas de tratamiento de 15.0 % de humedad inicial con respecto a los otros dos. Para explicar el incremento en el diámetro del pellet se debe considerar que, al existir humedad en forma de agua dentro del pellet, éste hidrata a la biomasa; entre más humedad inicial tiene la

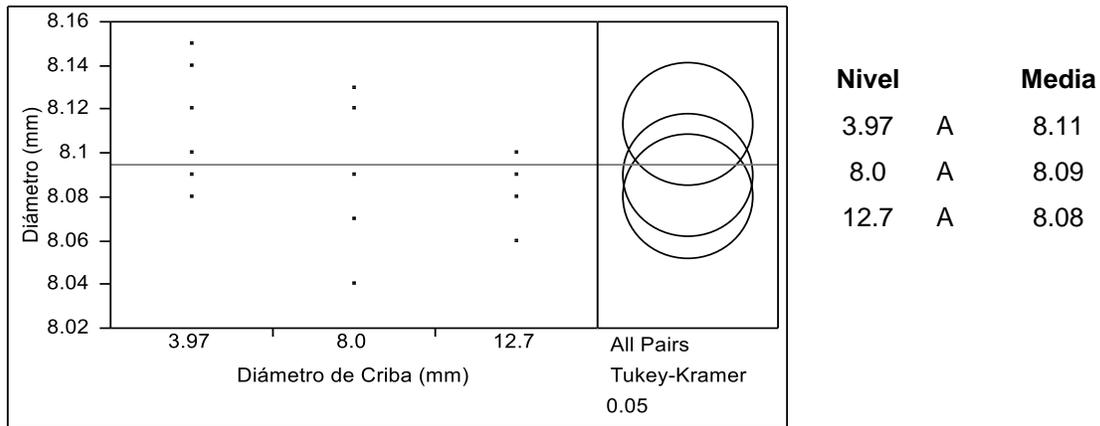
biomasa más espacio ocupará en el pellet final, si no se evapora totalmente. También se debe considerar que el agua no se comprime, y al salir de la pelletizadora el pellet sufre una “expansión”; además, como se ha reportado, una baja humedad y altas temperaturas disminuyen el efecto de expansión radial (Carone et al., 2010), y aunque una alta humedad favorece a la densidad del pellet mayor expansión se sufrirá (McKeown et al., 2016). Aunque es importante mencionar que para todos los casos se cumplió con las especificaciones de la norma ISO 17225-6.

Con lo que respecta al diámetro en función del tamaño de partícula, Figura 29, se observó que éste no tiene diferencias significativas entre los tres tratamientos analizados; de hecho, son pocos los casos donde el diámetro se incrementó por tener un tamaño de partícula pequeño. Esto indicaría que considerar tamaños de partículas pequeños podría aumentar el diámetro final de pellet al contener una mayor cantidad de materia; que junto una alta humedad provocaría que durante el enfriamiento el pellet no recuperara el diámetro con el que fue formado dentro de la matriz. Lo anterior por las razones de materia y expansión-evaporación de agua, lo que provocaría un diámetro más grande en comparación a los otros tratamientos.



Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 28. Análisis de diámetro (mm) en función de humedad inicial (%) y prueba de Tukey.



Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 29. Análisis de diámetro (mm) en función del tamaño de criba (mm).

Posteriormente se analizaron en conjunto ambos factores de control, para saber si tenían alguna interacción; los resultados se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Análisis de efectos en el diámetro.

Fuente de Variación	Nparm	GL	Suma de Cuadrados	F c	Prob > F
Humedad Inicial (%)	2	2	0.00614444	11.0600	0.0038*
Criba (mm)	2	2	0.00351111	6.3200	0.0193*
Humedad Inicial (%) * Criba (mm)	4	4	0.00208889	1.8800	0.1982

En esta tabla se observa que no existe interacción por los factores de control sobre la variable de respuesta de diámetro, aunque sí depende de los factores por separado. Esto también se ve en el diagrama de interacción, Figura 30, donde se observa que no existen interacciones, ya que las líneas en el gráfico mantienen un poco de paralelismo; lo que indica que la interacción de los factores no es significativa como ya se observó en la Tabla 24. En esta misma figura se observa que para los tres tratamientos, el mayor diámetro de cada tratamiento se logra con

un tamaño de criba de 3.97 mm, y el menor se obtienen con la criba de 8.0 mm de diámetro para los tratamientos con 15.0 y 20.0 % de humedad inicial. En caso de mantener el diámetro más cercano a 8.00 mm, la opción sería emplear una humedad inicial de 10.0 % con cualquier tamaño de criba; aunque la humedad de 15.0 % con tamaños de partícula de 8.0 y 12.0 mm también muestran buenos resultados, por lo que es necesario el análisis de otras variables.

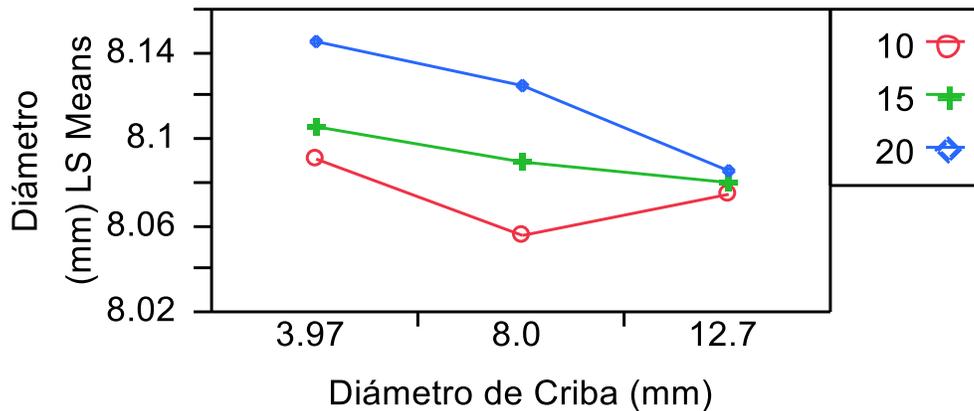


Figura 30. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad Inicial para la variable de respuesta de diámetro de pellet.

En cuanto a la validación de la prueba, los residuales, que representan la parte que no puede ser explicada por el efecto del tratamiento, se muestran en la Figura 31; éstos no presentan valores atípicos, ya que la diferencia es de entre -0.02 y 0.02 unidades, y se observa una variabilidad aleatoria. Es decir, no se observa alguna tendencia o una variabilidad constante, y tampoco se observa que la distribución de los residuales se desvíe con respecto a la normalidad.

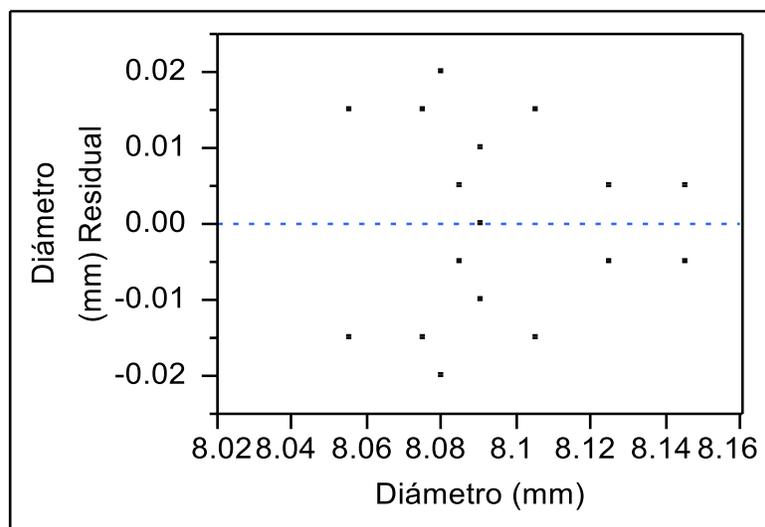
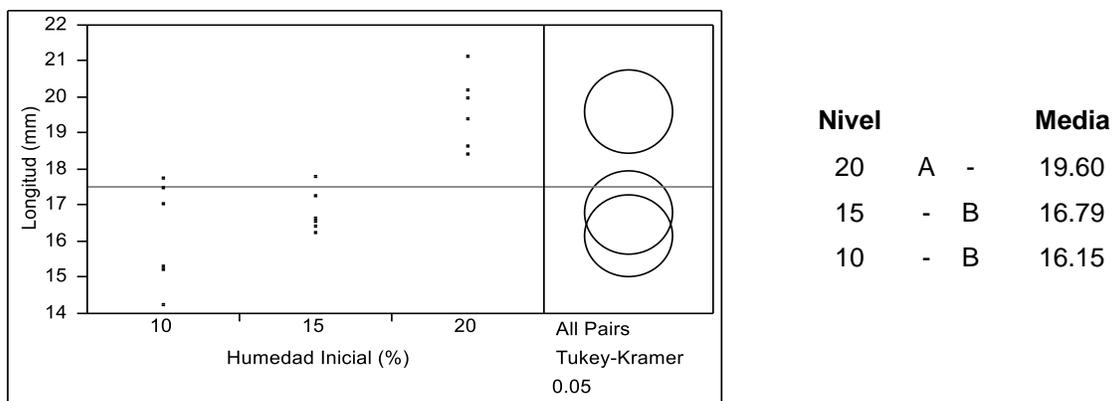


Figura 31. Gráfico de residuales para análisis de diámetro de pellet.

8.2.3. Análisis de la longitud

La siguiente variable de respuesta que se analizó fue la longitud, evaluando, en primer lugar, el efecto de cada uno de los factores de manera individual. Para comenzar se analizó el efecto de la humedad inicial de la biomasa sobre la longitud final del pellet. En este caso, como se observa en la Figura 32, al aumentar la humedad se tiene un incremento en la longitud; esto se puede deber primero a que una humedad mayor permite que exista una mayor aglomeración de las partículas, permitiendo que más biomasa se una y el pellet sea de mayor tamaño. Además, la lignina es un polímero amorfo y es el principal agente aglomerante de este biocombustible, por lo que debe considerarse que, a una mayor humedad, la temperatura de transición vítrea de la lignina disminuye. Por lo que ésta puede estar entre 190 °C y 135 °C, dependiendo de la humedad, entonces si aumenta la humedad, la temperatura de transición disminuye, lo que permite que mayor cantidad de lignina esté disponible en el proceso y sea mayor la cantidad de biomasa la que se integra al enfriarse el pellet. Otro fenómeno implicado es la

recuperación elástica de las partículas, lo cual produce que los pellets tengan poca resistencia y se fracturen, lo que disminuye su longitud (Liu et al., 2014); por lo que puede estar asociado a la humedad, ya que entre mayor sea, la recuperación disminuye al haber más fuerzas de unión derivado por la deformación plástica. Sin embargo, las longitudes se mantuvieron en un intervalo de 14 mm a 21 mm, lo cual cumple con especificaciones de la norma ISO 17225-6, donde especifica longitudes en un intervalo de 3.15 mm a 40 mm. Aunque investigaciones como la realizada por Whöler et al. (2017) sugieren que en el caso de estufas, emplear pellets de longitud media con una media aritmética de 19.5 mm y pellets con una longitud grande con media aritmética de 22.6 mm puede presentar un problema en los sistemas de alimentación; por lo que en este caso resultó mejor el empleo de pellets con una longitud pequeña de media aritmética de 17.5 mm, por lo se puede considerar longitudes cercanas a estas como las más adecuadas, además de que longitudes medianas y altas presentan mayores emisiones de CO aunque las emisiones de NOx pueden disminuir (Whöler et al., 2017).

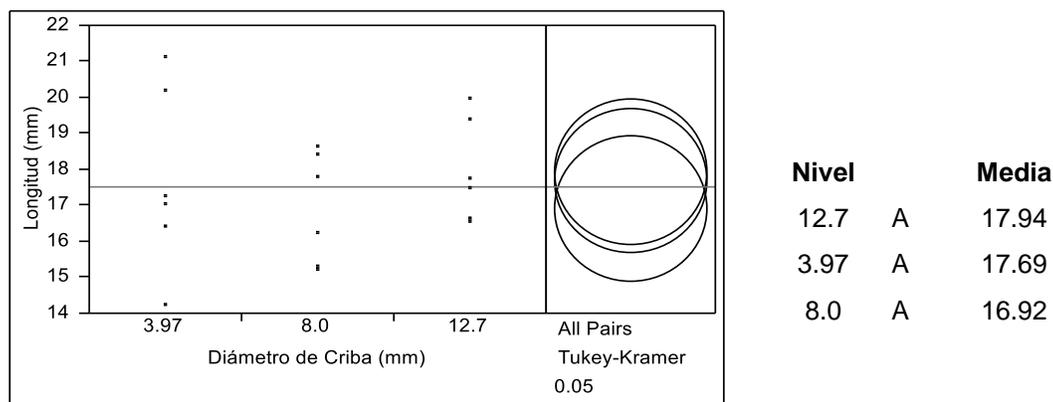


Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 32. Análisis de longitud (mm) en función de humedad inicial (%) y prueba de Tukey.

En cuanto al análisis de la longitud en función del tamaño de partícula, el cual dependió del diámetro de la Criba, como se observa en la Figura 33, no se aprecian diferencias significativas para ninguno de los tratamientos, lo cual también se observa en la prueba de Tukey; se puede concluir que el tamaño de partícula no tiene un efecto significativo en la longitud del pellet y sólo depende de la humedad inicial.

Posteriormente se analizaron en conjunto ambos factores de control, en un análisis Full Factorial, para saber si las fuentes de variación tenían alguna interacción; los resultados obtenidos en el software de JMP se muestran en la Tabla 25.



Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 33. Análisis de longitud (mm) en función del diámetro de criba (mm) y prueba de Tukey.

Tabla 25. Análisis de efectos en la longitud.

Fuente de Variación	Nparm	GL	Suma de Cuadrados	F c	Prob > F
Humedad Inicial (%)	2	2	40.344344	29.5119	0.0001*
Diámetro de Criba (mm)	2	2	3.429078	2.5084	0.1362
Humedad Inicial (%)*Diámetro de Criba (mm)	4	4	7.774656	2.8436	0.0889

Como se puede apreciar en la Tabla 25, el principal factor con efecto en la longitud es la humedad inicial, y no es clara si la interacción es significativa entre los factores, ya que tienen un valor p de 0.0889. Esta interacción también se puede observar en la Figura 34, en la cual se observa que sólo existe una interacción para los casos de 10.0 % y 15.0 % de humedad inicial; lo que indica que la interacción no es estadísticamente significativa, y por lo que se concluye que la longitud se verá afectada en forma creciente cuando la humedad de la biomasa aumenta, al no tener efecto sobre el otro nivel de humedad. Además, la variable de humedad tiene un valor de p de 0.0001. Por otra parte, si se considera como objetivo obtener longitudes medias para el empleo en equipos de alimentación automática, los mejores resultados se tendrían con humedades de 15.0 % y cribas de 3.97 y 8.00 mm; es claro que para longitudes más grandes se podría emplear humedades de 20.0 % y cribas de 3.97 mm. Para este caso, no se ve un patrón para los tres tratamientos.

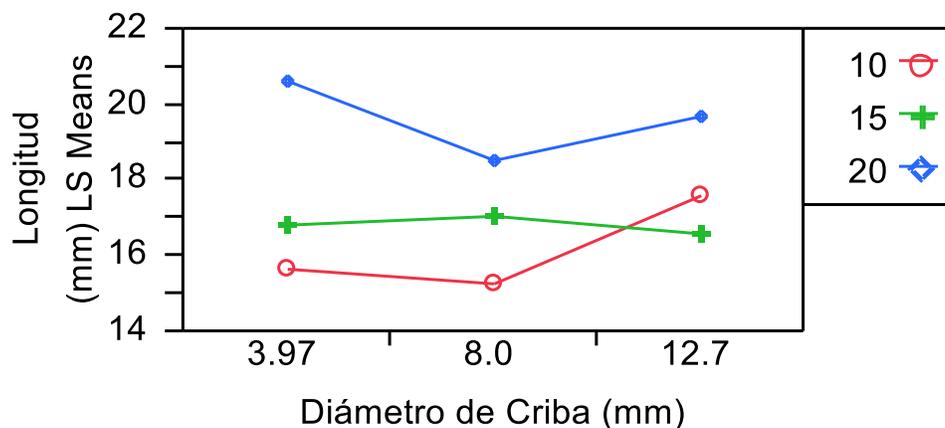


Figura 34. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad inicial para la variable de respuesta de longitud final.

En cuanto a la validación de la prueba, los residuales que se graficaron, y se muestran en la Figura 35, no presentan valores que se pudieran considerar atípicos, considerando que la longitud es una variable con menos control y que la misma

norma considera que puede ser aleatoria. Incluso durante el manejo se pudieran fracturar los pellets, el intervalo de residuales se encontró entre -1.5 y 1.5 unidades y se observa una variabilidad aleatoria; es decir, no se observa alguna tendencia o una variabilidad constante, y tampoco se observa que la distribución de los errores se desvié con respecto a la normalidad.

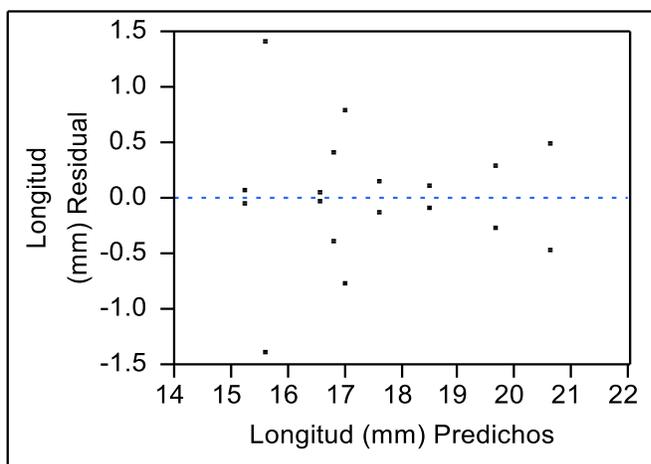
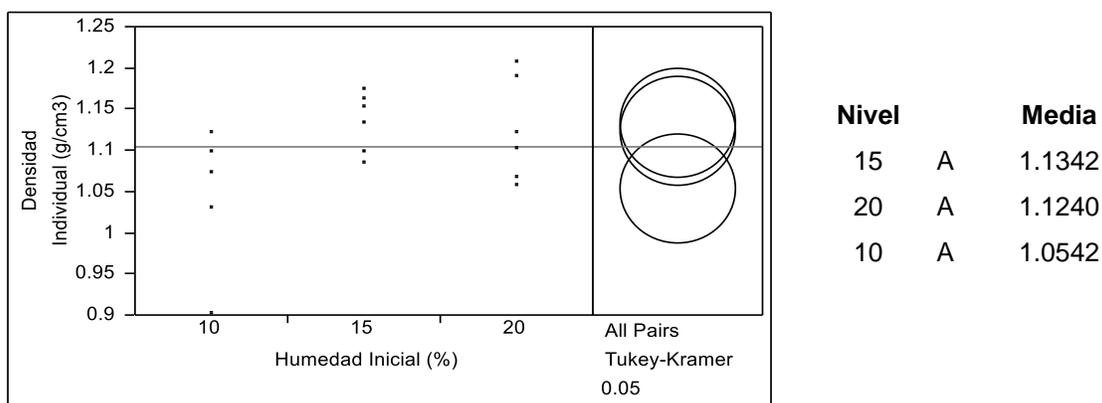


Figura 35. Gráfico de residuales para análisis de longitud de pellets.

8.2.4. Análisis de la densidad individual

La siguiente variable de respuesta que se analizó fue la densidad individual, expresada en g/cm^3 . En un primer paso se analizó el efecto de la humedad inicial de la biomasa sobre esta respuesta, Figura 36, encontrándose que en conjunto con los resultados de la prueba Tukey no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Se observa una ligera tendencia a aumentar la densidad de los pellets cuando se tiene una mayor humedad, 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. Sin embargo, se puede observar que en la mayoría de los casos, a humedades altas como 20.0 %, se tiene una densidad baja, debido a la expansión volumétrica; además en otros casos, como en la investigación de Arzola, se encontró que al aumentar la humedad se puede disminuir la densidad individual del pellet (Arzola et al., 2012).



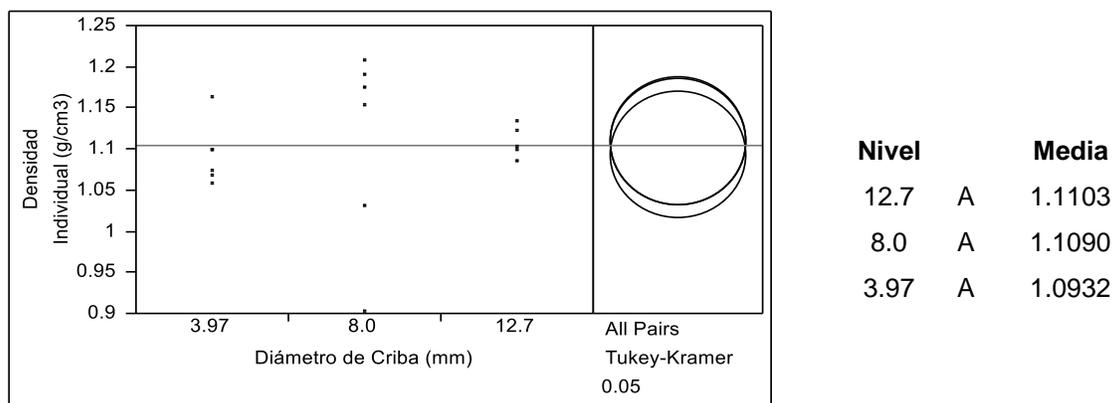
Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 36. Análisis de densidad individual (g/cm^3) en función de la humedad inicial (%) y prueba de Tukey.

En cuanto al análisis de la densidad individual en función del diámetro de criba empleado en el molino de martillos, los tratamientos no presentaron diferencias significativas y prácticamente tuvieron la misma media. La Figura 37 presenta la prueba Tukey y confirma que no hay diferencias entre los tres tratamientos; por lo que la densidad individual no depende del tamaño de partícula que se emplee durante el densificado.

Posterior a este análisis se realizó el análisis full factorial para determinar si existía interacción entre los factores de control, los resultados de tales pruebas se observan en la Tabla 26.

Como se observa en la Tabla 26, la densidad se ve afectada por el efecto de la humedad inicial; sin embargo, es más significativa la interacción de los efectos en este caso, ya que el valor P para la interacción es de 0.0053, mientras que para el factor de humedad es un poco más grande de 0.0101. En este caso existe interacción entre los efectos de estos dos factores, lo que indica que la densidad individual dependerá conjuntamente tanto del nivel de humedad y del tamaño de criba; este efecto confirma lo encontrado en otras investigaciones, como en la de Harun y Afzal, donde se encontró que pellets fabricados sólo de biomasa agrícola tenían baja densidad (584 a 799 kg/m³ o 0.584 a 0.799 g/cm³), la cual también dependía del tamaño de partícula ya que al disminuir esta la densidad aumentaba, alcanzando una máxima con un tamaño de particular de 0.15 mm y una mínima con 0.45 mm (Harun y Afzal, 2016). En la Figura 38 se observa que con un tamaño de criba de 12.7 mm se obtiene la misma densidad, sin importar la humedad empleada; sin embargo, la mejor humedad para este caso fue de 15.0 %, con tamaños de criba de 3.97 mm y 8.0 mm, ya que se obtienen mayores densidades, la humedad de 20.0 % se descarta al estar limitada a un tamaño de criba de 8.0 mm.



Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 37. Análisis de densidad individual (g/cm³) en función del diámetro de criba (mm) y prueba de Tukey.

Tabla 26. Análisis de efectos en la densidad individual.

Fuente de Variación	Nparm	GL	Suma de Cuadrados	Fc	Prob > F
Humedad Inicial (%)	2	2	0.02276022	8.0035	0.0101*
Diámetro de Criba (mm)	2	2	0.00108529	0.3816	0.6933
Humedad Inicial (%)*Diámetro de Criba (mm)	4	4	0.04441278	7.8088	0.0053*

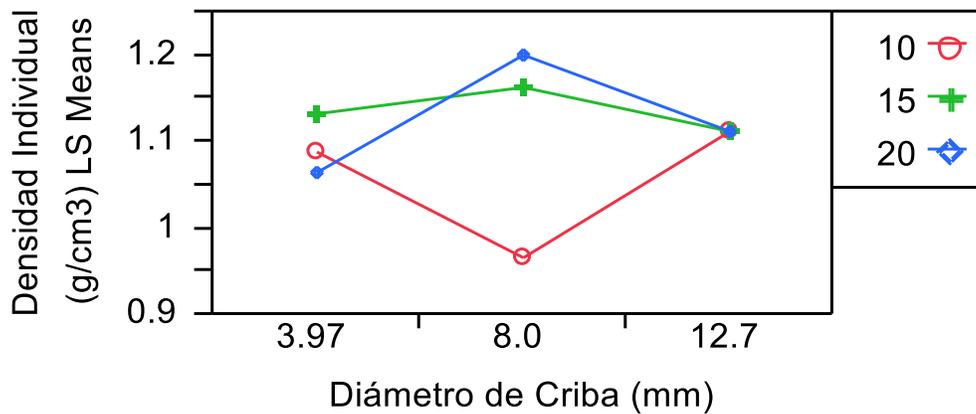


Figura 38. Gráfico de Interacción entre diámetro de criba y humedad inicial para la variable de respuesta de densidad individual.

En cuanto a la validación de la prueba, los residuales que se graficaron, y se muestran en la Figura 39, se pueden observar dos puntos fuera del patrón general del gráfico que corresponden a los experimentos 8 y 12, llevados a cabo con humedades de 10.0 % y diámetro de criba de 8.0 mm, lo que puede hacer que la estimación de la varianza del error sea un poco más grande, sin embargo a estas condiciones de humedad se observó que pequeñas variaciones en la temperatura de la matriz afecta a la densidad final al no evaporar la misma cantidad de agua, por lo que existe esa diferencia de la densidad, sin embargo, los resultados en cuanto el efecto de la interacción de ambos factores siguen siendo los más significativos

estadísticamente. Los demás datos se distribuyen con una variabilidad aleatoria, y no se detecta alguna tendencia que indique errores no atribuibles al error experimental.

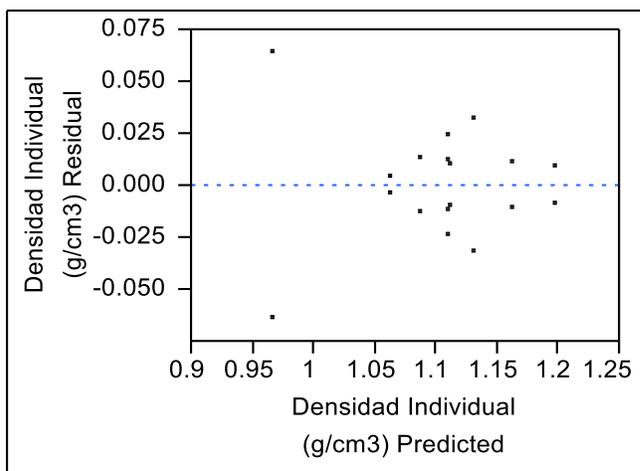
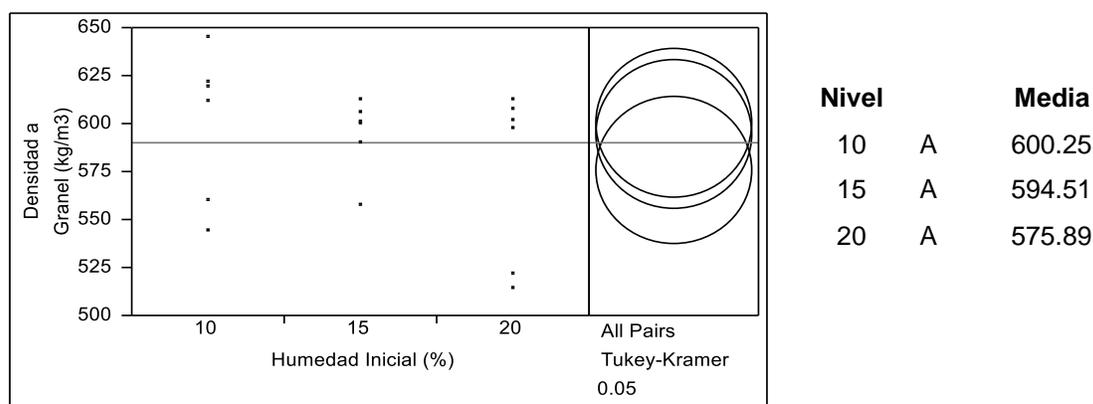


Figura 39. Gráfico de residuales para análisis de densidad individual.

8.2.5. Análisis de la densidad a granel

Posteriormente se prosiguió con el análisis de la densidad a granel, variable que permite una mejor comparación de los tratamientos, ya que ésta forma parte de las especificaciones de la norma ISO 17225-6; en dicha norma se especifica que la densidad a granel debe ser por lo menos de 600 kg/m³, por lo que los tratamientos con mayor densidad y que superen o igualen la especificación serían una buena opción. Como primer paso se analizó el efecto de la humedad inicial de la biomasa sobre la densidad a granel. Los resultados se pueden apreciar en la Figura 40, donde también se muestran los resultados de la prueba de Tukey; en la Figura 40 se aprecia que no hay diferencia significativa entre los tratamientos, mostrando cierta tendencia a que el empleo de humedades altas disminuye la densidad a granel de los pellets. Con un valor de humedad de 20.0 % se obtuvieron menores densidades a granel, ya que la longitud y diámetro de estos pellets fueron grandes 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 (Theerarattananoon et al., 2011; McKeown et al., 2016).

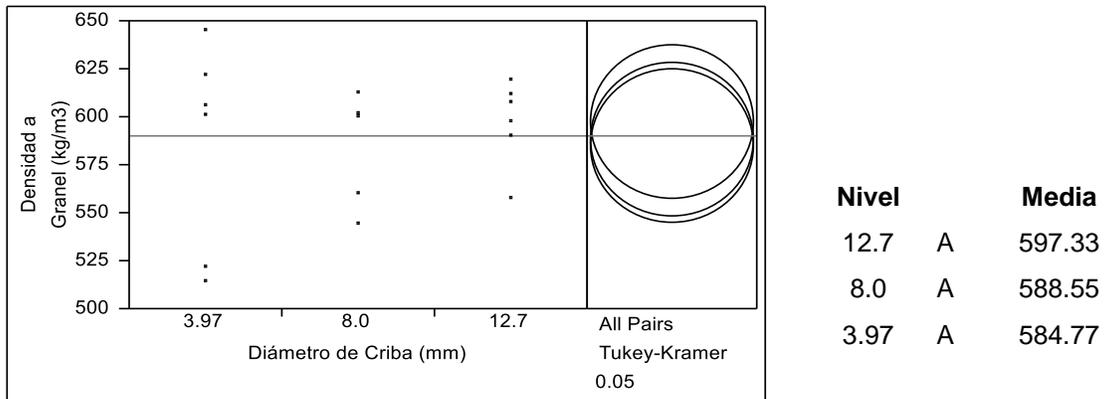


Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 40. Análisis de densidad a granel (kg/m^3) en función de la humedad inicial (%) y prueba Tukey.

El efecto derivado del tamaño de criba en la densidad a granel, que se puede apreciar en la Figura 41 junto con la prueba Tukey, tampoco es significativo, y no se observa una tendencia clara al aumentar o disminuir el diámetro de la criba empleada en el molino de martillos. Se obtuvo una media más grande con la criba de 12.7 mm, lo que concuerda con otra investigación, donde se concluyó que un tamaño de malla grande en el molino de martillos dio una densidad a granel más alta pero no a un nivel significativo (Theerarattananoon et al., 2011). En algunos casos se puede apreciar es que el empleo de un tamaño de partícula pequeño aumenta la densidad a granel. Esto puede deberse a que los pellets que se forman tienen alto contenido de materia, por lo que concuerda con la revisión de Whittaker, donde se menciona que un empleo de tamaño de molienda pequeño puede

maximizar la densidad aparente y por lo tanto tener un pellet más duradero (Whittaker y Shield, 2017).



Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 41. Análisis de densidad a granel (kg/m^3) en función del diámetro de criba (mm) y prueba Tukey.

Posterior a este análisis, y como no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos, se realizó el análisis Full Factorial, con ayuda de JMP; los resultados se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Análisis de efectos en la densidad a granel.

Fuente de Variación	Nparm	GL	Suma de Cuadrados	Fc	Prob > F
Humedad Inicial (%)	2	2	1945.980	7.4431	0.0124*
Diámetro de Criba (mm)	2	2	498.128	1.9053	0.2042
Humedad Inicial (%)*Diámetro de Criba (mm)	4	4	18226.675	34.8571	<.0001*

En la Tabla 27 se puede apreciar que la humedad inicial tiene un efecto en la densidad a granel final de los pellets; sin embargo, su valor P es de 0.0124 mientras que la interacción de los efectos es de <0.001 , lo que indica que ésta es más significativa. En este caso, la dependencia entre estos los dos factores es grande, lo que indica que la densidad a granel dependerá de manera conjunta tanto de la humedad inicial como del tamaño de criba que se esté empleando; ya que si se tienen tamaños de partículas muy grandes se alimenta poca materia, lo que disminuye la densidad y en conjunto con alta humedad se favorece una alta expansión volumétrica, por lo que la densidad aparente o granel disminuye. Esto también se ve en la Figura 42, donde se confirma la interacción de los efectos de ambos factores de control; se observa que los mejores resultados se obtuvieron con humedades de 10.0 % con tamaños de criba de 3.97 mm y 12.7 mm, sin embargo, con la criba de 8.00 mm se obtuvieron densidades muy bajas. La humedad con peores resultados es la de 20 %; incluso con la criba de 3.97 mm se obtuvieron los pellets con menor densidad a granel. La humedad de 15 % mostró buenos resultados, incluso con diámetros de criba de 8.00 mm y 3.97 mm no se observa mucha diferencia; y aunque con la criba de 12.70 mm se obtuvieron densidades bajas, éstas no mostraron cambios tan grandes como en las otras humedades estudiadas. En este caso se elegiría la humedad de 15.0 % como la mejor opción.

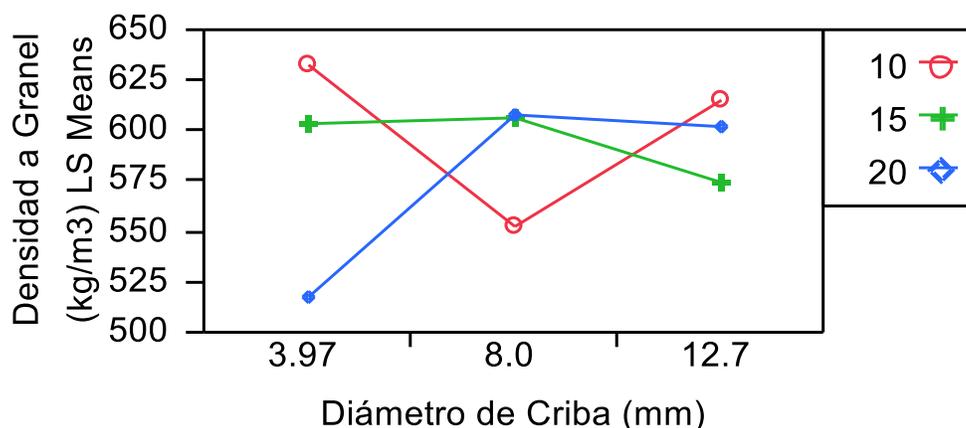
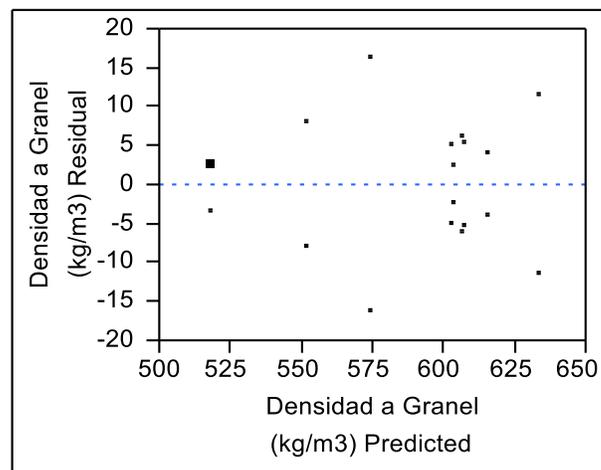
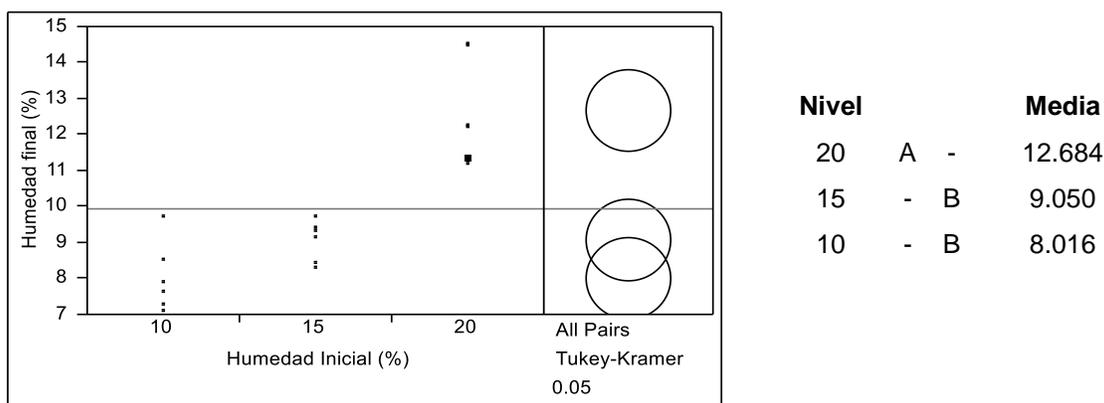


Figura 42. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad inicial para la variable de respuesta de densidad a granel.

En cuanto a la validación de la prueba, los residuales que se graficaron y se muestran en la Figura 43, no presentan valores que se pudieran considerar atípicos; existe poco control en la densidad a granel y ésta se mantuvo entre -20 y 20 kg/m^3 , y la mayoría de los resultados estuvieron alrededor de los 600 kg/m^3 . Se observa que los datos se distribuyen aleatoriamente, y no se observa alguna tendencia o variabilidad constante.



masa del pellet por acción de la presión y del aumento de la temperatura (Carone et al., 2010). También se ha concluido, en algunos casos, que cuando la humedad de alimentación es alta enfría la matriz de formado debido a la evaporación, lo que inhibe la evaporación adicional a temperatura reducida, lo que da como resultado pellets de alta humedad (Monedero et al., 2015). Igualmente en la Figura 44 se observa que existen diferencias entre los tratamientos, sobre todo con la humedad inicial de 20.0%, lo cual originó que los pellets tuviesen una humedad por arriba del 14.0%; el porcentaje de humedad en el pellet es alto, pero aún está dentro de especificaciones de acuerdo a la norma ISO 17225-6, para pellets de biomasa herbácea tipo B, donde la humedad se especifica como 15.0 % máxima.

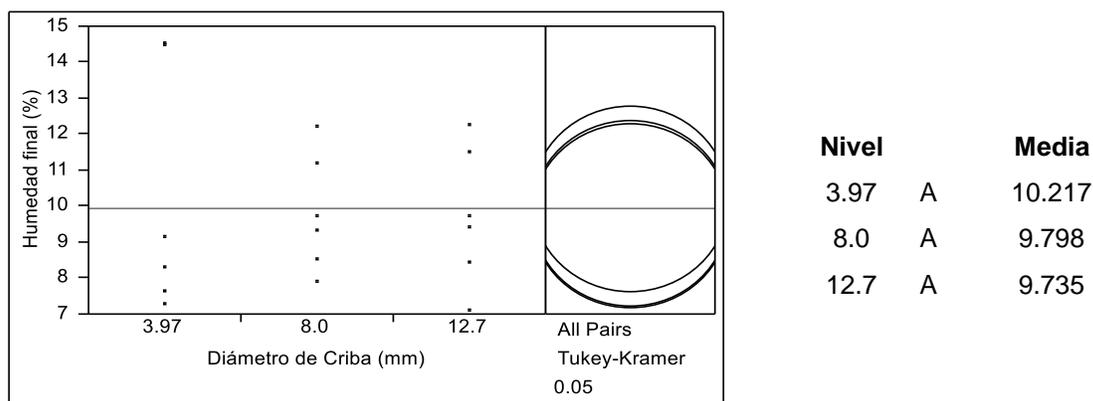


Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes

Figura 44. Análisis de la humedad final (%) en función de humedad Inicial (%)

En el análisis del efecto del diámetro de criba sobre la humedad final se observa que estadísticamente no hay diferencias significativas entre tratamientos; en todos los casos con tamaños pequeños de criba se tiene menor humedad al final, derivado a que un tamaño de partícula pequeño retiene menor humedad al incrementar la presión sobre ella. Además, con tamaños de partículas más grandes existen más espacios que pueden ser ocupados por humedad o aire por lo que se guarda más

humedad la final del pellet; también se observa en la prueba de Tukey que no existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos.



Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes

Figura 45. Análisis de la humedad final (%) en función del diámetro de criba (mm).

Finalmente se realizó el análisis Full Factorial para saber si existían interacciones entre los factores de control. Los resultados de la prueba se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Análisis de efectos en la humedad final.

Fuente de Variación	Nparm	GL	Suma de Cuadrados	Fc	Prob > F
Humedad Inicial (%)	2	2	72.132740	59.6653	<.0001*
Diámetro de Criba (mm)	2	2	0.823708	0.6813	0.5302
Humedad Inicial (%)*Diámetro de Criba (mm)	4	4	10.834793	4.4810	0.0288*

De la Tabla 28 se puede observar que el efecto de la humedad inicial es el más significativo, con un valor $P < 0.0001$; sin embargo, el valor P de la interacción de los efectos, 0.0288, indicó que sería de mayor importancia para el estudio. Por lo tanto, la humedad final depende tanto del nivel de humedad inicial como del diámetro de la criba empleada durante la molienda. Este comportamiento también se observa en la Figura 46, donde si bien no se observa que las líneas en el gráfico se crucen sí se observa una pérdida de paralelismo en relación a los tres tratamientos; además se observa que a mayor humedad inicial mayor humedad final del pellet, y en el caso de la humedad inicial de 20.0 % con cribas más pequeñas se retiene mayor humedad, por lo que se explicaba con anterioridad. En este caso, la humedad de 15.0 % se puede considerar como la más estable, donde la humedad final no se ve tan afectada por los cambios ni de humedad inicial ni de tamaño de partícula.

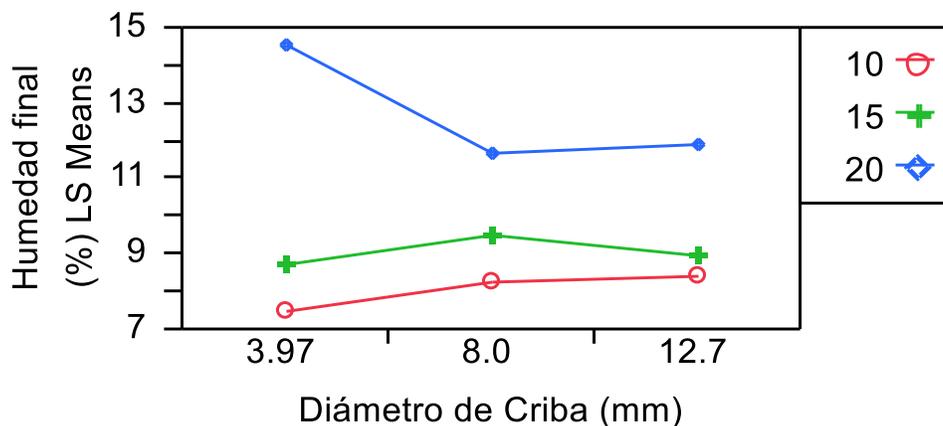


Figura 46. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad inicial para la variable de respuesta de humedad final.

Por otra parte, se concluyó que la prueba era válida debido que al graficar los residuales, Figura 47, en este gráfico se observan dos puntos que no se encuentran en el patrón general del gráfico, corresponde a los experimentos 6 y 10, llevados a cabo con humedades de 10.0 % y diámetro de criba de 12.7 mm, estos valores pueden hacer que la estimación de la varianza del error sea un poco más grande,

sin embargo, la interacción de los efectos sigue siendo estadísticamente significativa, nuevamente se confirma que la humedad baja es un factor con poco control al verse afectada por la temperatura de la matriz e incluso por la ambiental, ya que dependiendo de esta se puede evaporar diferente cantidad de agua, por lo que se observa la variación entre algunos resultados. Los demás datos se distribuyen aleatoriamente y no se observa alguna tendencia o variabilidad constante.

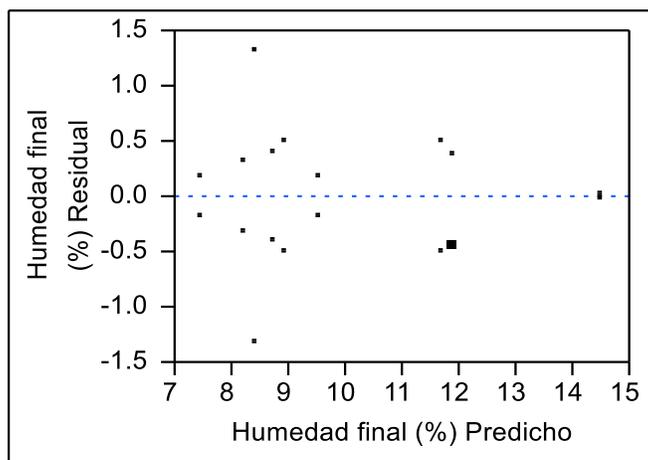


Figura 47. Gráfico de residuales para análisis de humedad final.

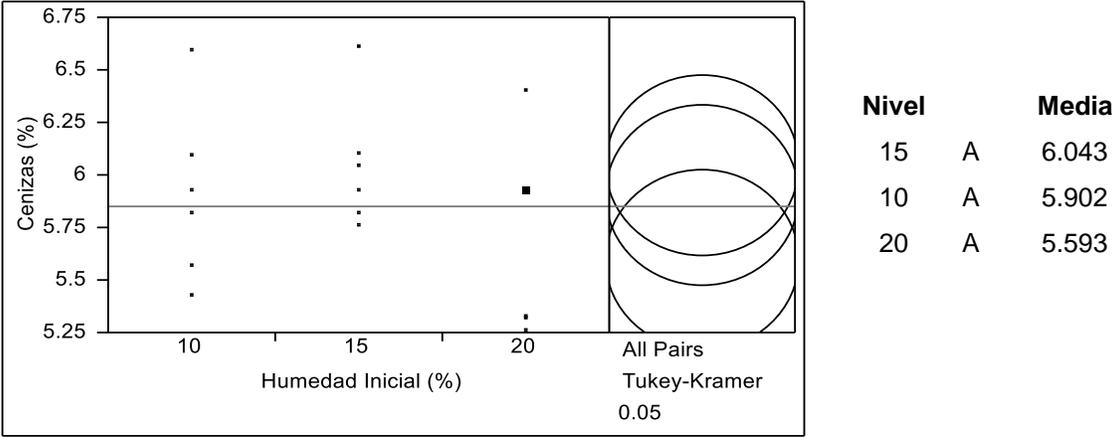
8.2.7. Análisis de contenido de cenizas finales

El contenido de cenizas es otra variable de importancia, ya que representa todo el material que no fue quemado y está compuesto por materiales inorgánicos, derivados de potasio, calcio, magnesio y otros (Miranda et al., 2018). Además, la cantidad de cenizas forma parte de las especificaciones de la norma ISO 17225-6; 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 estas. 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 en el poder calorífico (Rambo et al., 2015).

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, la biomasa estudiada aún no tiene clase, ya que la clase depende de la humedad, cenizas y nitrógeno en el pellet final.

El efecto de la humedad inicial sobre el contenido de cenizas se presenta en la Figura 48, en la cual se puede ver que no existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos derivado del efecto de la humedad; la media se mantuvo en un intervalo de 5.5 % a 6.0 % de cenizas, resultados que se pueden ver en la prueba Tukey, por lo que no fue posible determinar algún patrón o tendencia con este factor.

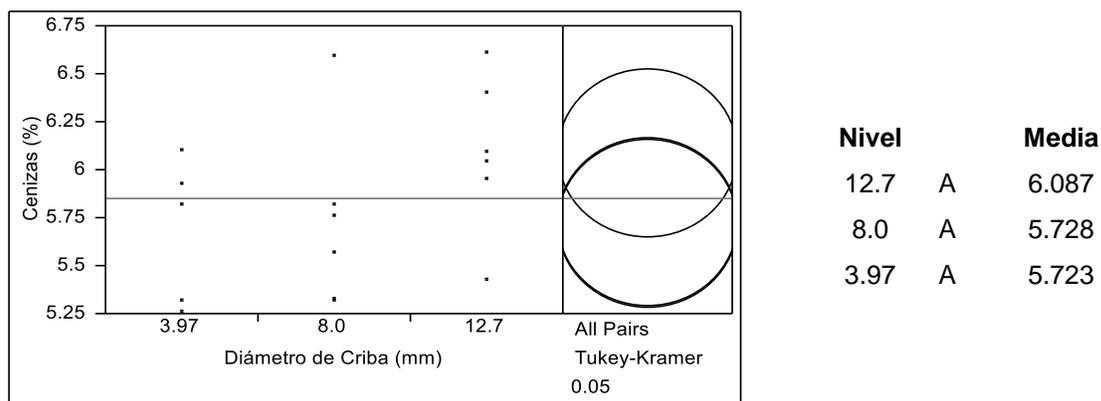


Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 48. Análisis de cenizas (%) en función de la humedad inicial (%).

En cuanto al efecto del diámetro de la criba, ver Figura 49, se observa que el emplear tamaños de partícula mayores al diámetro de la matriz de formado se tiene mayor cantidad de cenizas; ya que a mayor tamaño de partícula la combustión de la biomasa no es completa por lo que se favorece la formación de cenizas. Esto se

observa en la prueba Tukey, donde la diferencia más marcada fue para el tamaño de criba de 12.7 mm, con una mayor formación de cenizas.



Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes

Figura 49. Análisis de las cenizas (%) en función del diámetro de criba (mm).

Para verificar que no existiera alguna interacción de los efectos se realizó un análisis Full Factorial; los resultados se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29. Análisis de efectos en las cenizas.

Fuente de Variación	Nparm	GL	Suma de Cuadrados	Fc	Prob > F
Humedad Inicial (%)	2	2	0.63431878	2.7532	0.1167
Diámetro de Criba (mm)	2	2	0.52111344	2.2618	0.1600
Humedad Inicial (%)*Diámetro de Criba (mm)	4	4	0.89949156	1.9521	0.1859

En la tabla anterior se puede ver que no existen efectos individuales, tanto por el tamaño de criba como de la humedad inicial sobre la cantidad de cenizas; por lo tanto, éste depende del tipo de biomasa. El valor de P de 0.1859 para la interacción de los factores sugiere que puede considerarse como importante el efecto; de hecho; en la Figura 50 se observa que si existe la interacción y que la menor cantidad de cenizas se obtuvieron al emplear humedades altas con tamaños de criba chicos y medianos. Lo anterior se debe a que el pellet contenía más agua por lo que durante la combustión se liberó en forma de vapor. En contraparte, con el caso de 10.0 % de humedad inicial la menor cantidad de cenizas se logra con la criba de 12.7 mm; ya que este pellet al tener poca humedad, y más materia para combustionar, provoca la formación de mayor cantidad de ceniza. Para el caso de 15.0 % de humedad inicial se observa una menor cantidad producción de cenizas cuando se emplea la criba de 8.00 mm de diámetro; además, en el tratamiento de 20.0 % de humedad inicial se observa poco efecto del cambio de criba, por lo que se tendría un mejor control en el proceso. En todos los casos se puede cumplir con cualquiera de los requerimientos de ISO, ya sea con 6.0 % o 10 % de cenizas, y los resultados son competitivos contra otras biomásas como las algas que en estudios se han reportado hasta un 18.02 % de cenizas (Miranda et al., 2018), y un poco altos en comparación con pastos en los que se han reportado hasta un 4.0 % (Harun y Afzal, 2016).

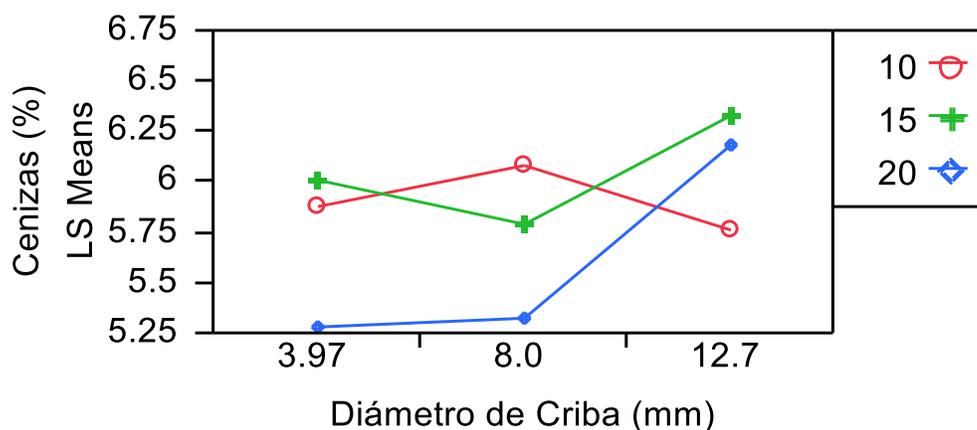


Figura 50. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad inicial para la variable de respuesta de cenizas.

También se concluyó que la prueba era válida, debido que al graficar los residuales, Figura 51, éstos no presentan valores que se pudieran considerar atípicos. Además los datos se distribuyen aleatoriamente y no se observa alguna tendencia o variabilidad constante; las medias están muy cercanas unas de otras, por lo que parte de esta variable se explica por la biomasa empleada, ya que no cambia ni se tiene un agente aglutinante en ningún tratamiento que pudiera incrementar la cantidad de cenizas finales.

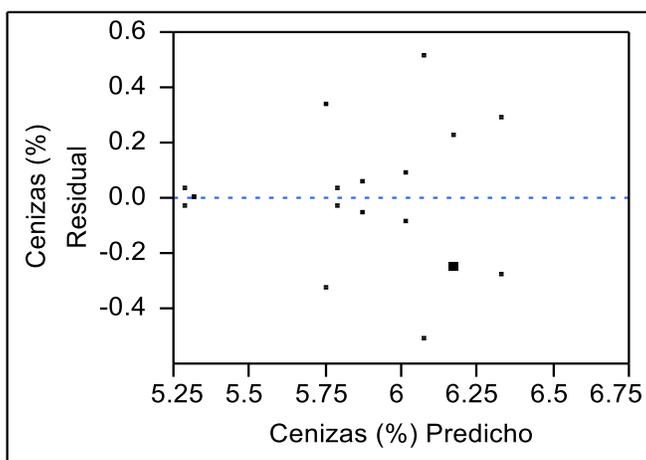


Figura 51. Gráfico de residuales para análisis de cenizas.

8.2.8. Análisis del contenido de carbono final

Para el contenido de carbono resulta lógico pensar que dependerá del tipo de biomasa y de la cantidad de materia que se pueda densificar; por ello sólo se analizó la interacción de los efectos, cuyos resultados se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30. Análisis de efectos en el contenido de carbono.

Fuente de Variación	Nparm	GL	Suma de Cuadrados	Fc	Prob > F
Humedad Inicial (%)	2	2	0.02536578	0.6296	0.5547
Diámetro de Criba (mm)	2	2	0.64216211	15.9387	0.0011*
Humedad Inicial (%)*Diámetro de Criba (mm)	4	4	0.13692489	1.6993	0.2335

En la Tabla 30 se observa que el efecto más significativo se debe al tamaño de criba, con un valor P de 0.0011; sin embargo, la interacción también tiene un efecto importante incluso mayor que la humedad inicial, por lo que se determinó al efecto de la interacción como el estadísticamente más significativo. A su vez, la Figura 52 muestra cómo se pierde paralelismo entre los tratamientos, y se observa la interacción; en los casos de humedades medias y altas se tiene un mayor contenido de carbono orgánico con cribas pequeñas y medianas. Este resultado es muy bueno porque en el caso de los biocombustibles la moneda energética es el carbono; por lo que a mayor contenido de carbono en el biocombustible mayor poder calorífico se puede tener. En caso de la humedad de 10.0 % se tiene poca influencia por el tamaño de criba, pero es necesario recordar que para esta humedad se tienen bajos rendimientos; además, estadísticamente sólo se logra un mayor contenido de carbono con la criba de 12.7 mm, que no favorece a otras variables. Por lo que el mejor caso es aquel donde la humedad es de 15.0 % con una criba de 8.00 mm, ya que, aunque supera el caso de 20.0 %, el ahorro en agua podría ser considerable en caso de llevarse a la producción.

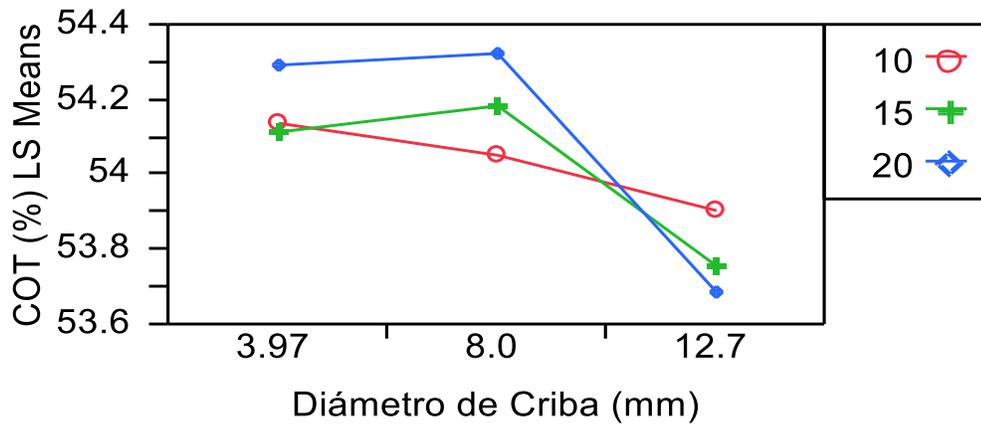


Figura 52. Gráfico de Interacción entre diámetro de criba y humedad inicial para la variable de respuesta COT.

En cuanto a la prueba, ésta se concluyó como válida, debido que al graficar los residuales, Figura 53, éstos no presentan valores que se pudieran considerar atípicos. Además, los datos se distribuyen aleatoriamente y no se observa alguna tendencia o variabilidad constante; las medias son similares y esto se debe a que no se empleó otra biomasa, agente aglutinante u otro aditivo que pudiera incrementar el contenido de carbono en el pellet. Por lo que en otra investigación podría incluirse algún tipo de aditivo para ver si se incrementa el contenido de carbono, y por lo tanto el poder calorífico del pellet.

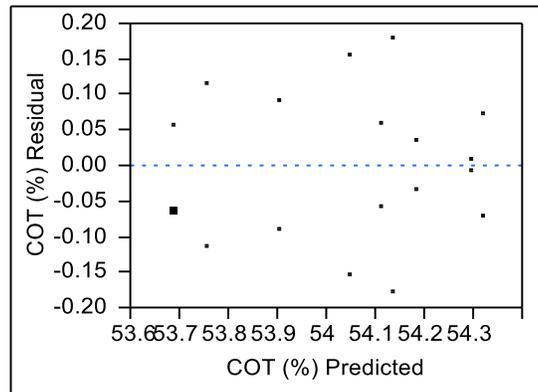


Figura 53. Gráfico de residuales para análisis de COT.

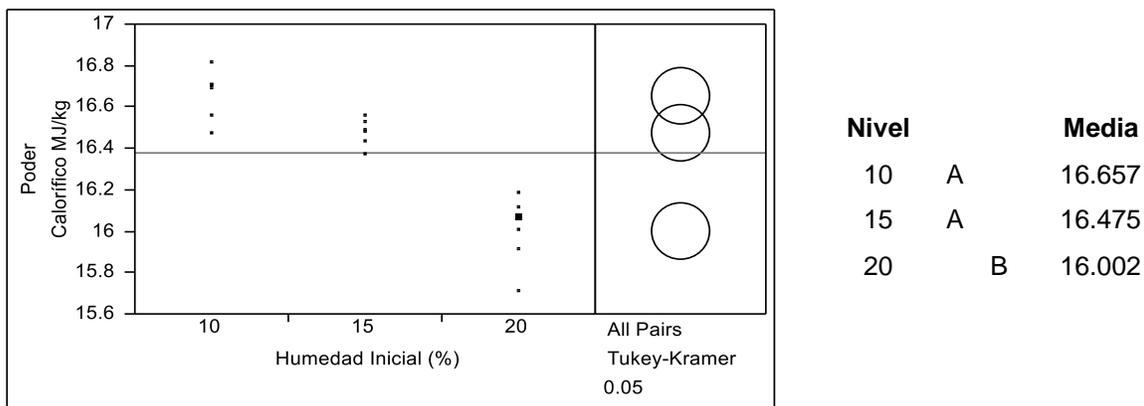
Es importante indicar que el contenido de carbono final en el pellet se mantuvo por encima del 53.6 %, lo que es bueno debido a que supera el contenido de carbono de gramíneas como el trigo (50.2 % de carbono), residuos de madera como el pino (50.9 %) (Kijo-Kleczkowska et al., 2016), y bambú (49.71 %) (Liu et al., 2016); el alto contenido de carbono puede ayudar a tener un alto poder calorífico al disponer de mayor cantidad de carbono que las anteriores biomásas.

8.2.9. Análisis del poder calorífico superior

Por último, se analizó la variable de respuesta correspondiente al poder calorífico superior o como algunos autores la llaman poder calorífico bruto; esta variable es de vital importancia debido a que da la pauta para saber en qué condiciones es posible obtener más energía con el biocombustible, y sobre todo tener un balance positivo en relación a la energía que se consume durante su producción.

Para ello se analizó, primero, el efecto de la humedad sobre el poder calorífico superior; como se observa en la Figura 54 el efecto de la humedad es muy notorio, debido a que al aumentar la cantidad de humedad inicial en la biomasa se tiene una reducción en el poder calorífico de manera casi lineal. Esto se debe a que tener altos valores de humedad implica que parte del calor es inicialmente consumido o

desperdiciado 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, rondando entre los 15.6 y 16.2 MJ/kg. Con la humedad de 10.0 % fue posible obtener poder caloríficos de hasta 16.8 MJ/kg; sin embargo, como se ve en la Figura 54, no se tiene una diferencia significativa con los tratamientos realizados a 15.0 % de humedad inicial. Además, con este valor de humedad se tiene menor dispersión entre los resultados, lo que en la práctica favorecería su empleo, tanto por el ahorro de agua como la obtención de mejores rendimientos. También en la Figura 54 se observa que estadísticamente, gracias a la prueba Tukey, si existen diferencias entre los tratamientos, siendo los tratamientos llevados a cabo con 20.0 % de humedad inicial los de mayor diferencia. Esto se debe principalmente a que, como se mostró con anterioridad, a mayor humedad inicial en la biomasa mayor humedad final, por lo que durante la combustión existe menos material para ser combustionado; parte de este material es agua, la cual se evapora por el proceso de combustión, por lo que parte de la energía generada por la combustión del pellet es empleada para este proceso. Por lo tanto, como el calor específico del agua es de 1 cal/g °C o de 4.186 J/g K se estaría perdiendo esta energía para elevar la temperatura en un grado para cada gramo de agua contenida en el pellet; por ello entre mayor humedad hay mayor pérdida de energía.

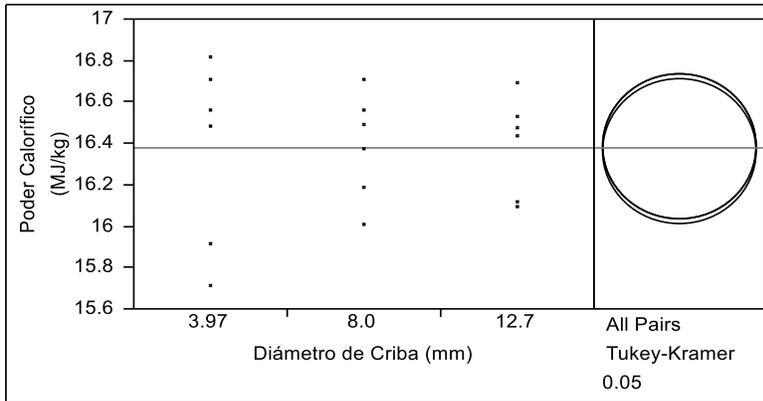


Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 54. Análisis del poder calorífico (MJ/kg) en función de la humedad inicial (%) y prueba Tukey.

En el caso del análisis realizado para el efecto del diámetro de la criba empleada durante la molienda se observó que por sí solo no tiene un efecto diferente en cada uno de los tratamientos, y éstos son similares con medias casi iguales. En la Figura 55 se puede comprobar la información anterior tanto en la gráfica como en la prueba Tukey. Por lo que fue necesario un análisis Full Factorial para determinar si existía una interacción entre los efectos de ambos factores de control.

Los resultados del análisis de los efectos para ambos factores se muestran en la Tabla 31.



Nivel		Media
12.7	A	16.387
8.0	A	16.385
3.97	A	16.362

Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Figura 55. Análisis del poder calorífico (MJ/kg) en función del diámetro de criba (mm).

Tabla 31. Análisis de los efectos en el poder calorífico.

Fuente de Variación	Nparm	GL	Suma de Cuadrados	Fc	Prob > F
Humedad Inicial (%)	2	2	1.3700830	66.8177	<.0001*
Diámetro de Criba (mm)	2	2	0.0022630	0.1104	0.8967
Humedad Inicial (%) * Diámetro de Criba (mm)	4	4	0.1498170	3.6532	0.0493*

En la Tabla 31 se aprecia que el factor con mayor efecto sobre el poder calorífico superior es la humedad con un valor P de <0.0001, el cual es muy significativo; por otra parte, el diámetro de criba no representa un efecto significativo, pero la interacción de ambos tiene un valor P de 0.0493, lo cual permite considerarlo como el efecto de interacción más importante. Al mismo tiempo, en la Figura 56 se puede ver la interacción de los factores, sobre todo por la pérdida de paralelismo en cada una de las líneas que representan a los tratamientos; el tratamiento con 20.0 % de humedad inicial y diámetro de criba de 3.97 mm fue el que menos poder calorífico

tuvo, debido a que fue el pellet con mayor humedad final también. Además, el pellet con mayor poder calorífico fue el obtenido con 10.0% de humedad inicial y 3.97 mm para el diámetro de la criba, ya que contenía baja humedad final; cabe añadir que el tamaño pequeño de partícula favorecía tener mayor cantidad de material para ser combustionado, sin embargo, hay que recordar que fue uno de los pellets con menor rendimiento. Para el caso de los tratamientos con 15.0 % de humedad inicial cuando se cambia el diámetro de la criba el efecto no es muy grande; aunque por los rendimientos y humedades finales una buena opción sería emplear las cribas de 3.97 mm y de 8.00 mm.

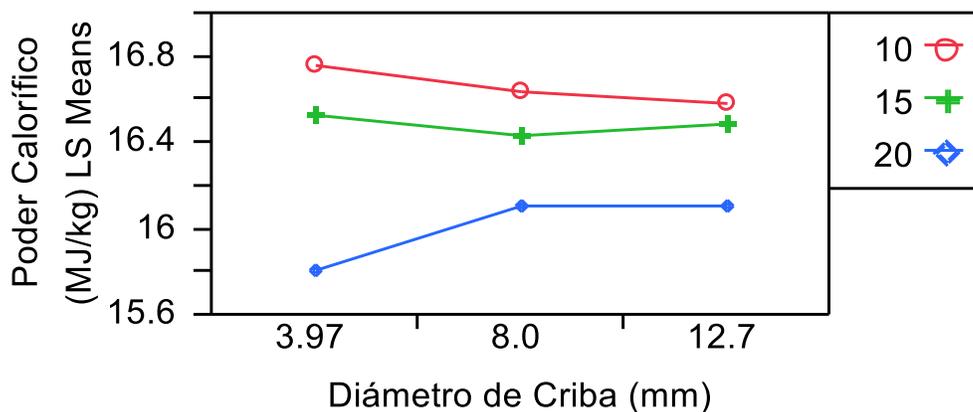


Figura 56. Gráfico de interacción entre diámetro de criba y humedad Inicial para la variable de respuesta de Poder Calorífico Superior.

Para validar la prueba se analizaron los residuales, los cuales se muestran la Figura 57, donde se observa que los residuales no se desvían de la normalidad; tampoco se ven valores atípicos dentro de la prueba, por lo que se consideran que los datos obtenidos durante la investigación y el análisis de éstos fueron los correctos.

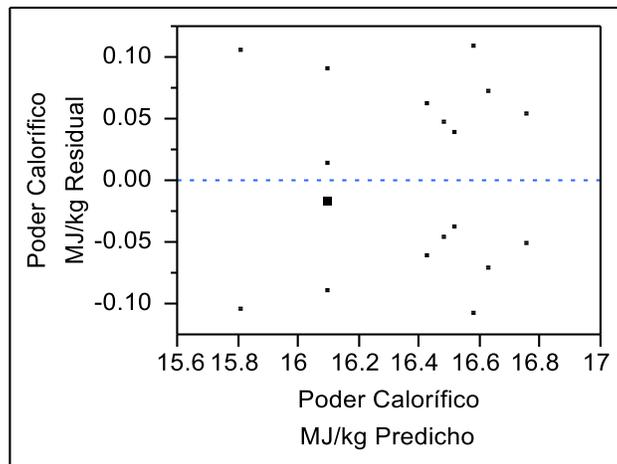


Figura 57. Gráfico de residuales para análisis de Poder Calorífico.

Para todos los casos es necesario el análisis de poder calorífico neto, el cual es el valor de referencia en la norma. Para ello sería necesario conocer la cantidad de oxígeno de la muestra, determinación que no fue posible realizar. Sin embargo, el valor de referencia de acuerdo a ISO es de 14.5 MJ/kg y el valor más bajo obtenido en la investigación fue de 15.70 MJ/kg, por lo que es posible que se pueda cumplir el valor de norma al restarle el valor del calor latente de condensación del agua. Si se considera la investigación en la cual se toma como base el valor de 15.80 MJ/kg para el poder calorífico superior para pellets convencionales para un análisis económico, podría esperarse que los pellets obtenidos en esta investigación sean económicamente viables dado que todos superan el valor del poder calorífico antes indicado (Agar, 2017). Incluso en Francia, se requiere de un poder calorífico superior mayor a 15.5 MJ/kg para poder comercializar pellets que tengan el fin de ser empleados en calentadores domésticos.

En cuanto a comparación con otros pellets, en la presente investigación se obtuvieron pellets con un poder calorífico superior alrededor de 16.0 MJ/kg, valor superior a la cascarilla de arroz (13.90 MJ/kg), hidrochar de cascarilla de arroz (15.08 MJ/kg) y muy cercano al pellet de aserrín de madera de pino (16.13 MJ/kg)

(Liu et al., 2014). Por ello se considera que los pellets elaborados a partir de los residuos de cultivo de frijol puedan competir con pellets de poda de olivos (18.20 MJ/kg), hojas de oliva (19.63 MJ/kg) (Garcia-Maraver et al., 2015), desechos de jardín (16.8 MJ/kg) (Pradhan et al., 2018), y micro algas (20.31 MJ/kg) (Miranda et al., 2018). Si se hacen mezclas con otras biomásas o se agrega un aditivo para favorecer a la densidad y la durabilidad del pellet obtenido de este residuo.

8.2.10. Análisis de perfiles

Por último, se realizó un análisis de perfil en JMP, con el objetivo de explorar gráficamente las ecuaciones de predicción y encontrar las mejores condiciones para obtener un pellet que cumpliera las especificaciones y además ofreciera obtener el mayor rendimiento. Para dicho análisis se establecieron las funciones para cada respuesta. En el caso del diámetro se consideró que éste fuera lo más cercano a la media obtenida durante la investigación; para la longitud se consideró que se acercara al valor medio obtenido, ya que como se mencionó las longitudes medias dan mejores resultados en los equipos donde son combustionados. En cuanto a la densidad individual se decidió maximizar los valores obtenidos, mientras que para la densidad a granel también se decidió maximizar con un valor mínimo de 600 kg/m³, la cual es la especificación de la norma ISO 17225-6. Para el rendimiento también se indicó maximizar, con un mínimo de 50 % de rendimiento, considerando que no hay recirculación; mientras que para la humedad se decidió minimizar con un valor máximo de 15.0 % que es la indicada en la norma para pellets clase B. En el caso de las cenizas se requirió la minimización de éstas, con un máximo de 10.0 % para la especificación de pellets clase B; en cuanto al contenido de carbono y el poder calorífico se decidió maximizar los valores obtenidos. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 58, donde se puede observar cada una de las funciones establecidas y la deseabilidad, que entre más cercana sea a 1, mayor cumple con las especificaciones. En esta misma imagen se observa que las mejores condiciones para obtener el mejor pellet se logran con una humedad de 20.0 % inicial y 8.00 mm de diámetro de criba, con una deseabilidad del 0.5411, condiciones con las que se puede alcanzar un poder calorífico superior de 16.097 MJ/kg. Con

tan solo 5.3185 % de cenizas en peso seco, una humedad final de 11.679 %, una densidad a granel de 607 kg/m³ y rendimiento del 60.7 %; además de longitudes y diámetros medianos y una densidad individual de 1.1978 g/cm³. Con estos resultados el pellet incluso podría ser clasificado como A de acuerdo con la Norma ISO 17225-6, en la cual se requiere una humedad máxima de 12.0 %, una densidad a granel mínima de 600 kg/m³ y contenido de cenizas de 6.0 % máximo; aunque es necesario analizar el poder calorífico neto, la durabilidad y contenido de metales pesados, y con estos datos se obtiene una densidad energética de 9770.679 MJ/m³. En la Figura 59 se observan los pellets obtenidos con una humedad inicial de 20.0 % y con un tamaño de partícula en función de la criba de 8 mm de diámetro; se observan pellets con longitudes aleatorias, con promedio de 18.5 mm y diámetros de 8.12 mm, los cuales mostraron brillo y durabilidad durante el almacenaje.

Los resultados anteriores son muy prometedores, incluso para producirlos a escala industrial; sin embargo, los resultados de los pellets para la humedad de 15.0 % y con las cribas de 8.00 mm y 3.97 mm también son buenos, Figuras 60 y 61, ya que para la criba de 8.00 mm se alcanza una deseabilidad del 0.4829 y para la de 3.97 mm una deseabilidad de 0.5098. Esto favorecería en el ahorro de agua, aunque en comparación con el resultado anterior los rendimientos son bajos; las cenizas son mayores, aunque las densidades a granel son similares y se tienen poderes caloríficos superiores más altos, incluso de 16.518 para el caso de la criba de 3.97 mm.

En la Figura 62 se muestran los pellets obtenidos con una humedad inicial en la alimentación de 15.0 % y tamaño de partícula de 3.97 mm, los cuales presentaron una coloración más opaca que los pellets elaborados con 20.0 % de humedad inicial; sin embargo, el brillo no es una característica de calidad del pellet. De acuerdo al análisis, este pellet cuenta con características muy competitivas en cuanto al poder calorífico al igual que el pellet elaborado con 15.0 % de humedad inicial y criba de 8 mm, mostrado en la Figura 63.

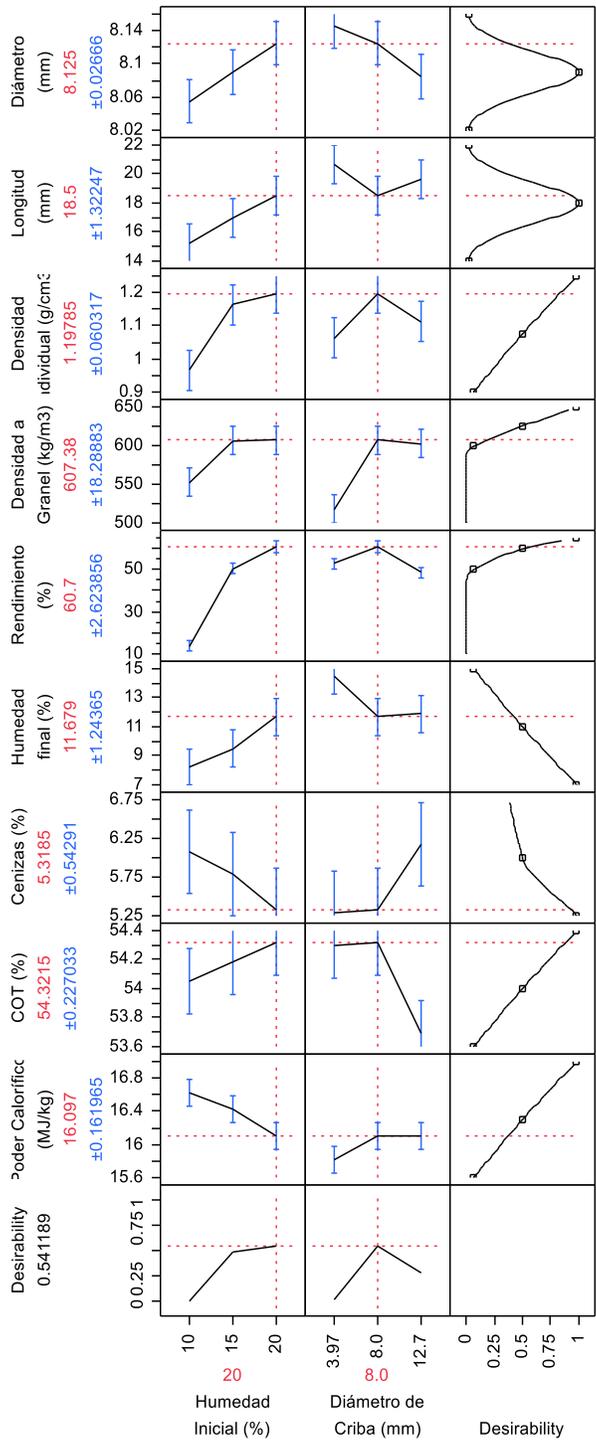


Figura 58. Resultado de predicción de perfiles, para condiciones de 20.0 % humedad inicial y criba de 8.0 mm.



Figura 59. Pellets de biomasa al 20.0 % de humedad inicial y criba de 8.0 mm.

Por último, las condiciones menos favorables obtenidas durante la presente investigación fueron con una humedad inicial de 10.0 % y criba de 8.0 mm; si bien se pudo obtener un poder calorífico superior o bruto de 16.631 MJ/kg, el rendimiento fue de tan solo 13.7 %, las cenizas de 6.07 % y con una densidad a granel de 551.95 kg/m³. Además, como se muestra en la Figura 64, los pellets que se obtuvieron eran opacos y con fracturas en su cuerpo, lo que significó que la lignina de la biomasa no se movilizó adecuadamente y existió baja aglomeración de partículas, lo que tuvo como consecuencia una baja durabilidad aunque los pellets no hayan sido estresados mecánicamente.

Cabe mencionar que los pellets elaborados con 20.0 % de humedad inicial y criba de 3.97 mm, en ambos experimentos, presentaron problemas durante el almacenamiento. Lo anterior dado que a los 14 días de ser almacenados presentaron crecimiento de hongos, como se aprecia en la Figura 65; esto debido a la humedad final que presentaron la cual fue de 14.517 % y 14.481 %, y que se vio reflejado en el poder calorífico más bajo, de 15.706 MJ/kg y 15.915 MJ/kg.

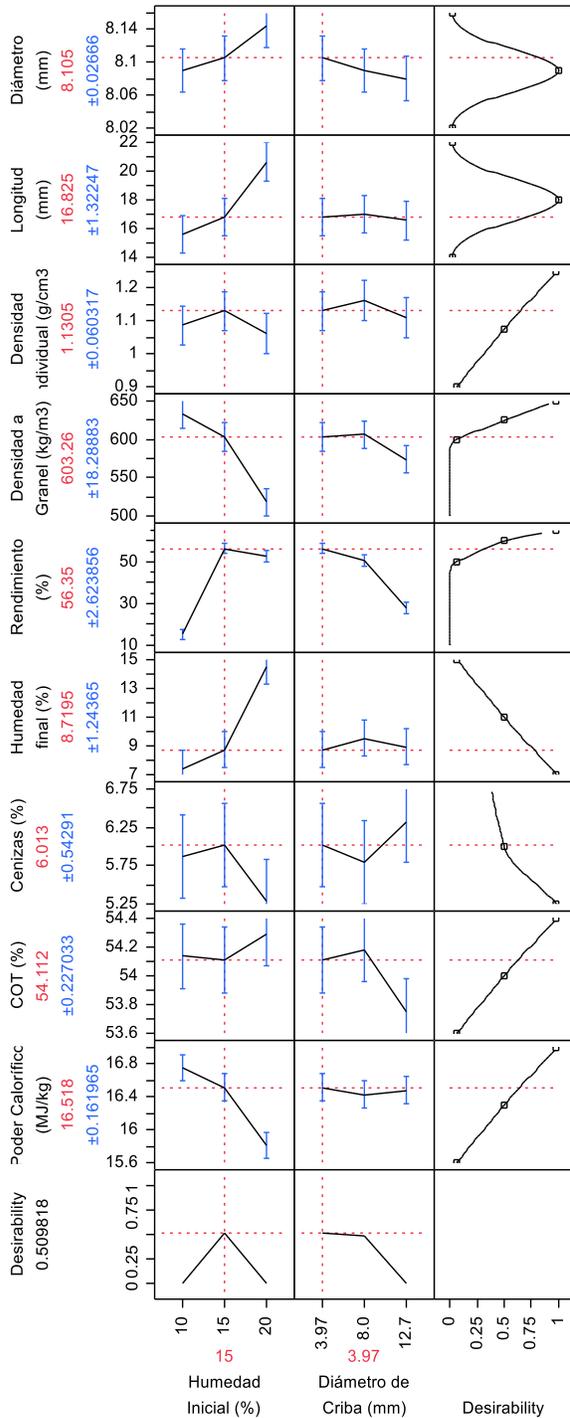


Figura 60. Resultados de deseabilidad para las condiciones de 15.0 % de humedad inicial y criba de 3.97 mm de diámetro.

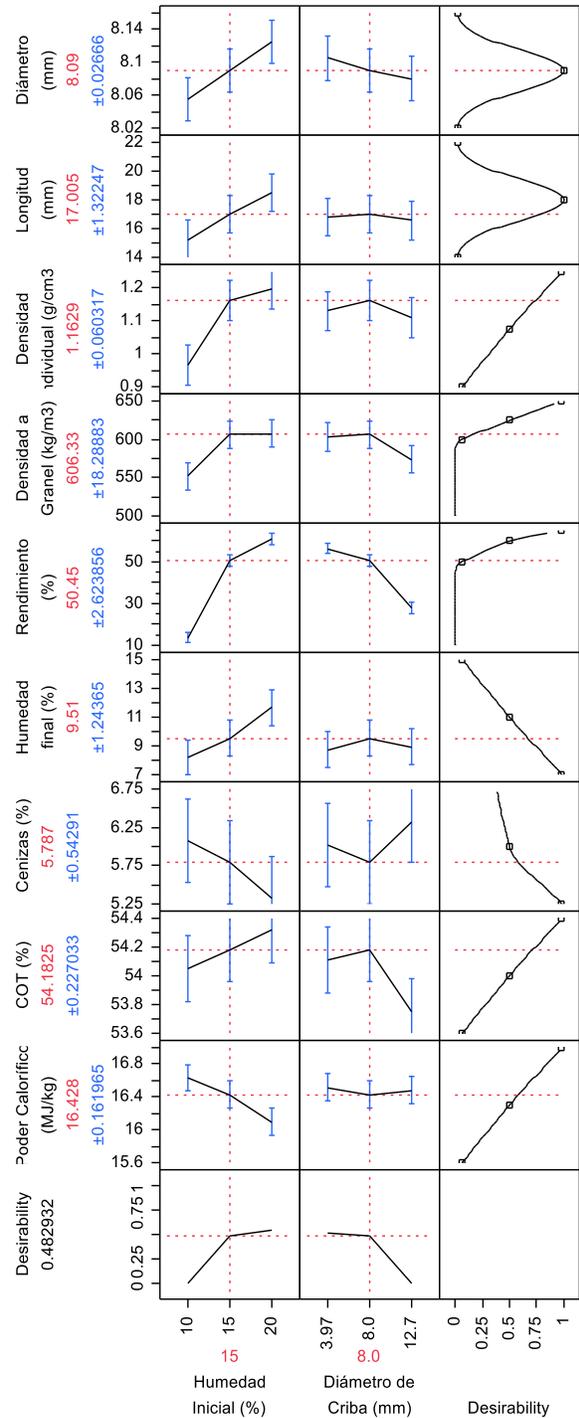


Figura 61. Resultados de deseabilidad para las condiciones de 15.0 % de humedad inicial y criba de 8.00 mm de diámetro.



Figura 62. Pellets elaborados con humedad inicial de 15.0 % y tamaño de partícula de 3.97 mm.



Figura 63. Pellets elaborados con humedad inicial de 15.0 % y tamaño de partícula de 8.00 mm.



Figura 64. Pellets elaborados con humedad inicial de 10.0 % y tamaño de partícula de 8.00 mm.



Figura 65. Crecimiento de microorganismos en pellets producidos con 20% de humedad inicial y criba de 3.97 mm.

9. CONCLUSIONES

Se realizó una investigación para determinar el uso potencial de los residuos del cultivo de frijol en la producción de biocombustibles sólidos en forma de pellet; para ello se emplearon residuos de cosechas de 2016 y 2017 de la especie conocida como Frijol Flor de Mayo.

Mediante la caracterización y exploración de condiciones se estableció un diseño experimental de 2 factores y tres niveles para obtener pellets que cumplieran con la norma ISO-17225-6; lo anterior con la expectativa de que éstos pudieran producirse y comercializarse en México. Los factores de control considerados fueron la humedad inicial y el tamaño de partícula, el cual estuvo en función del diámetro de la criba empleada en el molino de martillos.

Mediante el análisis con JMP se determinó que las mejores condiciones fueron el empleo de 20.0 % de humedad inicial y un diámetro de criba de 8.00 mm; con las cuales se obtuvo un pellet con un poder calorífico superior de 16.097 MJ/kg, 5.3185 % de cenizas en peso seco, una humedad final de 11.679 %, una densidad a granel de 607 kg/m³, rendimiento del 60.7 %, y una densidad energética final de 9770.879 MJ/m³. Los pellets obtenidos cumplen con las especificaciones de la norma ISO-17225-6. El empleo de humedades de 15.0 % también es prometedor, ya que ofrece mayor contenido de energía; sin embargo, los rendimientos son menores y el contenido de cenizas aumenta un poco, lo que puede ser perjudicial sobre todo por el manejo del residuo.

Es importante mencionar que los pellets elaborados a partir de este residuo deben ser producidos a partir de una biomasa limpia, sin semillas o grandes cantidades de raíz; que pudieran aumentar la cantidad de nitrógeno y por consecuencia aumentar la cantidad de óxidos de nitrógeno durante la combustión, sobre todo al tratarse de una leguminosa, fenómeno no observado en gramíneas y biomasa leñosa.

Por último es recomendable que en investigaciones futuras se analice el efecto de la presión y la temperatura en esta biomasa, para determinar si estos factores

podieran afectar de manera positiva en las características finales del pellet. También se sugiere realizar un análisis de la durabilidad del pellet, empleando un equipo certificado para esta prueba; así como la inclusión de un aglutinante como el aceite vegetal usado o glicerol residual de la producción de biodiésel para aumentar el poder calorífico y durabilidad. Finalmente, se sugiere elaborar pellets de residuos del cultivo de frijol con mezclas otras biomásas residuales, ya que se ha demostrado que mezclas de biomásas pueden impactar positivamente en las características del pellet combustible.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abuelnuor, A. A. A., M. A. Wahid, S. Ehsan, A. Saat, K. M. Saqr, H. H. Sait, y M. Osman. 2014. Characteristics of biomass in flameless combustion : A review. 33:363–370. doi:10.1016/j.rser.2014.01.079.
- Acda, M. N. 2015. Biomass and Bioenergy Fuel pellets from downed coconut (*Cocos nucifera*) in super typhoon Haiyan. Biomass and Bioenergy. 83:539–542. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.005. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.005>
- Agar, D. A. 2017. A comparative economic analysis of torrefied pellet production based on state-of-the-art pellets. Biomass and Bioenergy. 97:155–161. doi:10.1016/j.biombioe.2016.12.019. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.019>
- Agencia Informativa Conacyt. 2015. Obtienen biogás a partir de paja de frijol. Obtienen biogás a partir de paja de frijol. Available from: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/biotecnologia/3741-investigan-produccion-de-biogas-a-partir-de-paja-de-frijol>
- APHA. 1999. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. En: American Public Health Association, Washington DC.
- Arzola, N., A. Gómez, S. Rincón, a Gomez, S. Rincón, A. Gómez, y S. Rincón. 2012. The effects of moisture content, particle size and binding agent content on oil palm shell pellet quality parameters. Ingenieria Investigation. 32:24–29.
- Bartocci, P., A. Anca-couce, K. Slopiecka, S. Nefkens, N. Evic, y S. Retschitzegger. 2017. Biomass and Bioenergy Pyrolysis of pellets made with biomass and glycerol : Kinetic analysis and evolved gas analysis. Biomass and Bioenergy. 97:11–19. doi:10.1016/j.biombioe.2016.12.004. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.004>

- Carone, M. T., A. Pantaleo, y A. Pellerano. 2010. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea*. *Biomass and Bioenergy*. 35:402–410. doi:10.1016/j.biombioe.2010.08.052. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.052>
- Castaño Tostado, E. 2014. *Diseño Estadístico de Experimentos*. Querétaro.
- Castellano, J. M., M. Gómez, M. Fernández, L. S. Esteban, y J. E. Carrasco. 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. 139:629–636.
- Celma, A. R., F. Cuadros, y F. López-Rodríguez. 2012. Food and Bioproducts Processing Characterization of pellets from industrial tomato residues. *Food and Bioproducts Processing*. 90:700–706. doi:10.1016/j.fbp.2012.01.007. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2012.01.007>
- Chen, W.-H., J. Peng, y X. T. Bi. 2015. A state-of-the-art review of biomass torrefaction , densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 44:847–866. doi:10.1016/j.rser.2014.12.039. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- Chou, C., S. Lin, y W. Lu. 2009. Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran. *Fuel Processing Technology*. 90:980–987. doi:10.1016/j.fuproc.2009.04.012. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.04.012>
- Crawford, N. C., A. E. Ray, N. A. Yancey, y N. Nagle. 2015. Evaluating the pelletization of “pure” and blended lignocellulosic biomass feedstocks. *Fuel Processing Technology*. 140:46–56. doi:10.1016/j.fuproc.2015.08.023. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.08.023>

- Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. 2015. Panorama Agroalimentario. Frijol 2015.
- FIRA. 2016. Panorama Agroalimentario. Frijol 2016. 36. Available from: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200636/Panorama_Agroalimentario_Caf__2016.pdf
- García-Maraver, A., M. L. Rodríguez, F. Serrano-Bernardo, L. F. Díaz, y M. Zamorano. 2015. Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees. *Fuel Processing Technology*. 129:1–7. doi:10.1016/j.fuproc.2014.08.018. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.08.018>
- García, R., M. P. González-Vázquez, C. Pevida, y F. Rubiera. 2018. Pelletization properties of raw and torrefied pine sawdust: Effect of co-pelletization, temperature, moisture content and glycerol addition. *Fuel*. 215:290–297. doi:10.1016/j.fuel.2017.11.027.
- Gil, M. V., P. Oulego, M. D. Casal, C. Pevida, J. J. Pis, y F. Rubiera. 2010. Bioresource Technology Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. *Bioresource Technology*. 101:8859–8867. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.062. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.062>
- Gilbert, P., C. Ryu, V. Sharifi, y J. Swithenbank. 2009. Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. 88:1491–1497. doi:10.1016/j.fuel.2009.03.015.
- Guo, M., W. Song, y J. Buhain. 2015. Bioenergy and biofuels : History , status , and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 42:712–725. doi:10.1016/j.rser.2014.10.013.

- Harun, N. Y., y M. T. Afzal. 2016. Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Pellets Made from Biomass Blends. *Procedia Engineering*. 148:93–99. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.445. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.445>
- Huang, Y., M. Finell, S. Larsson, X. Wang, J. Zhang, R. Wei, y L. Liu. 2017. Biofuel pellets made at low moisture content – Influence of water in the binding mechanism of densified biomass. *Biomass and Bioenergy*. 98:8–14. doi:10.1016/j.biombioe.2017.01.002. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.01.002>
- International Energy Agency. 2015. CO2 Emissions from fuel combustion. Highlights. 2015a ed. Available from: www.iea.org
- Ishii, K., y T. Furuichi. 2014. Influence of moisture content , particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets. *Waste Management*. 34:2621–2626. doi:10.1016/j.wasman.2014.08.008. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.008>
- ISO. 2014. 17225-6:2014(en) Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 6: Graded non-woody pellets.
- Kaliyan, N., y R. V. Morey. 2010. Bioresource Technology Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*. 101:1082–1090. doi:10.1016/j.biortech.2009.08.064. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>
- Kalra, Y. P., y D. G. Maynard. 1991. *Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis*. Available from: <https://books.google.com/books?id=QhEjKAAACAAJ&pgis=1>
- Karkania, V., E. Fanara, y A. Zabaniotou. 2012. Review of sustainable biomass pellets production – A study for agricultural residues pellets ’ market in Greece. 16:1426–1436. doi:10.1016/j.rser.2011.11.028.

- Kijo-Kleczkowska, A., K. Sroda, M. Kosowska-Golachowska, T. Musial, y K. Wolski. 2016. Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass. *Fuel*. 170:141–160. doi:10.1016/j.fuel.2015.12.026.
- Kirsten, C., V. Lenz, H. Schröder, y J. Repke. 2016. Hay pellets — The influence of particle size reduction on their physical – mechanical quality and energy demand during production. *Fuel Processing Technology*. 148:163–174. doi:10.1016/j.fuproc.2016.02.013. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.02.013>
- 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. doi:10.1016/j.egypro.2014.01.229. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.229>
- Lisowski, A., M. Dąbrowska-Salwin, E. Ostrowska-Ligęza, A. Nawrocka, M. Stasiak, A. Świętochowski, J. Klonowski, M. Sypuła, y B. Lisowska. 2017. Effects of the biomass moisture content and pelleting temperature on the pressure-induced agglomeration process. *Biomass and Bioenergy*. 107:376–383. doi:10.1016/j.biombioe.2017.10.029.
- Liu, Z., B. Fei, Z. Jiang, Z. Cai, y Y. Yu. 2013. The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. *Renewable Energy*. 55:1–5. doi:10.1016/j.renene.2012.12.014. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.014>
- Liu, Z., B. Mi, Z. Jiang, B. Fei, y Z. Cai. 2016. Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. *Renewable Energy*. 86:1–7. doi:10.1016/j.renene.2015.08.011. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.011>

- Liu, Z., A. Quek, y R. Balasubramanian. 2014. Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass , agro-residues and their corresponding hydrochars. *Applied Energy*. 113:1315–1322. doi:10.1016/j.apenergy.2013.08.087. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.087>
- Lu, D., L. G. Tabil, D. Wang, y G. Wang. 2014. Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders. 9:2–11.
- Mani, S., L. G. Tabil, y S. Sokhansanj. 2008. Effects of compressive force , particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. 30:648–654. doi:10.1016/j.biombioe.2005.01.004.
- McKeown, M. S., S. Trabelsi, y E. W. Tollner. 2016. Effects of temperature and material on sensing moisture content of pelleted biomass through dielectric properties. *Biosystems Engineering*. 149:1–10. doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.06.002. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.002>
- Miranda, M. T., F. J. Sepúlveda, J. I. Arranz, I. Montero, y C. V. Rojas. 2018. Physical-energy characterization of microalgae *Scenedesmus* and experimental pellets. *Fuel*. 226:121–126. doi:10.1016/j.fuel.2018.03.097. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.097>
- Monedero, E., H. Portero, y M. Lapuerta. 2015. Pellet blends of poplar and pine sawdust: Effects of material composition, additive, moisture content and compression die on pellet quality. *Fuel Processing Technology*. 132:15–23. doi:10.1016/j.fuproc.2014.12.013. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.12.013>
- Niedzióka, I., M. Szpryngiel, M. Kachel Jakuba, A. Kraszkiwicz, K. Zawislak, P. Sobczak, y R. Nadulski. 2015. Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. *Renewable Energy*. 76:312–317. doi:10.1016/j.renene.2014.11.040.

- 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. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.213>
- Poddar, S., M. Kamruzzaman, S. M. A. Sujan, M. Hossain, M. S. Jamal, y M. A. Gafur. 2014. Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value. *FUEL*. 131:43–48. doi:10.1016/j.fuel.2014.04.061. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.061>
- Pradhan, P., A. Arora, y S. M. Mahajani. 2018. Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass. *Energy for Sustainable Development*. 43:1–14. doi:10.1016/j.esd.2017.11.005. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.11.005>
- Rambo, M. K. D., F. L. Schmidt, y M. M. C. Ferreira. 2015. Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. *Talanta*. 144:696–703. doi:10.1016/j.talanta.2015.06.045. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2015.06.045>
- Real Academia Española. 2017. Biomasa. *Diccionario de la lengua española*. Available from: <http://dle.rae.es/?id=5YtOE4H>
- Reyes-Muro, L., T. C. Camacho-Villa, y F. (Coords. . Guevara-Hernández. 2013. *Rastrojos: Manejo, uso y mercado en el centro y sur de México*. Primera Ed. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México.
- SAGARPA. 2015. Frijol: regalo de México para el mundo. Available from: <http://www.gob.mx>
- SAGARPA. 2016. Frijol, todo un privilegio mexicano. Available from: www.gob.mx

- SAGARPA. 2017. Frijol Mexicano. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030.
- Saidur, R., E. . Abdelaziz, A. Demirbas, M. S. Hossain, y S. Mekhilef. 2011. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15:2262–2289. doi:10.1016/j.rser.2011.02.015. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. 1978. NMX-F-066-S-1978. DETERMINACIÓN DE CENIZAS EN ALIMENTOS. Dirección General de Normas.
- Secretaría de Salud. 2003. PROY-NOM-211-SSA1-2002. PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA, PRODUCTOS Y SERVICIOS. METODOS DE PRUEBA FISICOQUIMICOS. DETERMINACION DE HUMEDAD Y SOLIDOS TOTALES EN ALIMENTOS POR SECADO EN ESTUFA. DETERMINACION DE ARSENICO, CADMIO, COBRE, CROMO, ESTAÑO, HIERRO, MERCURIO, NIQUEL, PLATA, PLOMO, SELENIIO Y ZINC EN ALIMENTOS, AGUA Y HIELO APTOS PARA CONSUMO HUMANO, BEBIDAS Y ADITIVOS ALIMENTARIOS POR ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORCION ATOMICA. *Diario Oficial de la Federación*.
- Singh, R., B. B. Krishna, G. Mishra, J. Kumar, y T. Bhaskar. 2016. Strategies for selection of thermo-chemical processes for the valorisation of biomass. *Renewable Energy*. 98:226–237. doi:10.1016/j.renene.2016.03.023. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.023>
- Ståhl, M., J. Berghel, y H. Williams. 2016. Energy efficiency, greenhouse gas emissions and durability when using additives in the wood fuel pellet chain. *Fuel Processing Technology*. 152:350–355. doi:10.1016/j.fuproc.2016.06.031. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.06.031>

- Stelte, W., C. Clemons, J. K. Holm, J. Ahrenfeldt, U. B. Henriksen, y A. R. Sanadi. 2011a. Fuel Pellets from Wheat Straw: The Effect of Lignin Glass Transition and Surface Waxes on Pelletizing Properties. *Bioenergy Research*. 5:450–458. doi:10.1007/s12155-011-9169-8.
- Stelte, W., J. K. Holm, A. R. Sanadi, S. Barsberg, J. Ahrenfeldt, y U. B. Henriksen. 2011b. Fuel pellets from biomass : The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*. 90:3285–3290. doi:10.1016/j.fuel.2011.05.011. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>
- Sultana, A., y A. Kumar. 2012. Ranking of biomass pellets by integration of economic , environmental and technical factors. *Biomass and Bioenergy*. 39:344–355. doi:10.1016/j.biombioe.2012.01.027. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.027>
- Taylor, G. 2010. Biofuels and the biorefinery concept. *Energy Policy*. 36:4406–4409. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.069.
- Theerarattananoon, K., F. Xu, J. Wilson, R. Ballard, L. . Mckinney, S. Staggenborg, P. Vadlani, Z. J. Pei, y D. Wang. 2011. Physical properties of pellets made from sorghum stalk , corn stover , wheat straw , and big bluestem. 33:325–332. doi:10.1016/j.indcrop.2010.11.014.
- Tilay, A., R. Azargohar, M. Drisdelle, A. Dalai, y J. Kozinski. 2015. Canola meal moisture-resistant fuel pellets : Study on the effects of process variables and additives on the pellet quality and compression characteristics. 63:337–348.
- Ullah, K., V. Kumar, S. Dhingra, G. Braccio, M. Ahmad, y S. Sofia. 2015. Assessing the lignocellulosic biomass resources potential in developing countries : A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 51:682–698. doi:10.1016/j.rser.2015.06.044.

- Valdez-Vazquez, I., J. A. Acevedo-Benítez, y C. Hernández-Santiago. 2010. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14:2147–2153. doi:10.1016/j.rser.2010.03.034.
- Vargas-Moreno, J. M., A. J. Callejón-Ferre, J. Pérez-Alonso, y B. Velázquez-Martí. 2012. A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16:3065–3083. doi:10.1016/j.rser.2012.02.054. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.054>
- Wang, T., Y. Li, J. Zhang, J. Zhao, Y. Liu, L. Sun, B. Liu, H. Mao, Y. Lin, W. Li, M. Ju, y F. Zhu. 2018. Evaluation of the potential of pelletized biomass from different municipal solid wastes for use as solid fuel. *Waste Management*. 74:260–266. doi:10.1016/j.wasman.2017.11.043. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.043>
- Whittaker, C., y I. Shield. 2017. Factors affecting wood , energy grass and straw pellet durability – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 71:1–11. doi:10.1016/j.rser.2016.12.119. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119>
- Whöler, M., D. Jaeger, G. Reichert, C. Shmidl, y S. K. Pelz. 2017. Influence of pellet length on performance of pellet room heaters under real life operation conditions. *Renewable Energy*. 105:66–75. doi:10.1016/j.renene.2016.12.047.
- Zamorano, M., V. Popov, M. L. Rodríguez, y A. García-maraver. 2011. A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues. *Renewable Energy*. 36:3133–3140. doi:10.1016/j.renene.2011.03.020. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.020>

11. ANEXOS

Anexos 1. Humedades iniciales de algunos experimentos



Figura A1. 1. Experimento con la criba de 12.7 mm y la humedad inicial de 20.0 %.



Figura A1. 2. Experimento Criba 8.00 mm y Humedad 20.0 %.



Figura A1. 3. Experimento Criba de 3.97 mm y Humedad 20.0 %.



Figura A1. 4. Experimento Criba 12.7 mm y Humedad Inicial de 15.0 %.



Figura A1. 5. Experimento Criba de 8.00 mm y Humedad Inicial de 15.0 %.



Figura A1. 6. Experimento Criba de 3.97 mm y Humedad Inicial de 15.0 %.



Figura A1. 7. Experimento Criba 12.7 mm y Humedad Inicial 10.0 %.



Figura A1. 8. Experimento Criba de 8.00 mm y Humedad de 10.0%.



Figura A1. 9. Experimento Criba de 3.97 mm y Humedad de 10.0 %.

Anexo 2. Temperatura de densificado



Figura A2. 1.
Temperatura de densificado, humedad inicial de 20.0 % y criba de 12.70 mm.



Figura A2. 2.
Temperatura de densificado, humedad inicial de 20.0 % y criba de 3.97 mm.



Figura A2. 3.
Temperatura de densificado, humedad inicial de 10.0 % y criba de 12.70 mm



Figura A2. 4.
Temperatura de densificado, humedad inicial de 15.0 % y criba de 3.97 mm.



Figura A2. 5.
Temperatura de densificado, humedad inicial de 15.0 % y criba de 8.00 mm.



Figura A2. 6.
Temperatura de densificado, humedad inicial de 10.0 % y criba de 8.00 mm