



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ENERGÍA

**PRODUCCIÓN DE PELLETS COMBUSTIBLES DE CASCABILLO DE CAFÉ CON
MÁXIMO PODER CALORÍFICO**

TESIS

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

PRESENTA

ING. LUIS ANTONIO RODRÍGUEZ ROMERO

DIRIGIDO POR

DR. JUAN FERNANDO GARCÍA TREJO

Santiago de Querétaro, Querétaro, Octubre, 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ENERGÍA

**PRODUCCIÓN DE PELLETS COMBUSTIBLES DE CASCABILLO DE CAFÉ
CON MÁXIMO PODER CALORÍFICO**

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

PRESENTA
ING. LUIS ANTONIO RODRÍGUEZ ROMERO

DIRIGIDO POR:
DR. JUAN FERNANDO GARCÍA TREJO

Dr. Juan Fernando García Trejo
Presidente

Firma

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio
Secretario

Firma

Dra. Ana Angélica Feregrino Pérez
Vocal

Firma

Dr. Julio Armando de Lira Flores
Suplente

Firma

Dr. Rufino Nava Mendoza
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.
Octubre, 2021.

DEDICATORIAS

*A ti mi **Lucero Selene**, que sin ti esto no hubiera sido posible. Tú amor, cariño y apoyo en todo momento me dio los ánimos necesarios para seguir adelante y cumplir con esta meta.*

La mujer más maravillosa y fantástica que pude conocer, y que tuve el placer que eligiera estar conmigo. Porque cada meta que realizamos unidos nos une más para cumplir nuestros sueños juntos.

Por todo lo bueno que has hecho por mí, muchas gracias, amor.

Te amo mucho corazón.

Dirección General de Bibliotecas UAO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a **Dios padre**, quien me da la vida y salud todos los días para seguir cumpliendo mis metas, quien cuida y protege a mi familia y a las personas que más me importan en esta vida, gracias por todas tus bendiciones Dios mío.

Muchas gracias a la **Virgencita de Guadalupe** y al **Divino niño Jesús** por haber cuidado de Lucero y de mí en este viaje fuera de nuestro hogar y lejos de nuestras familias, por permitir que realicemos y cumplamos nuestros sueños juntos, por darnos su protección, gracias.

Gracias a mi familia por todo su apoyo, a mi madre **Erika** y mi hermano **Oscar Alexis**, ustedes dos han sido por lo que siempre he querido superarme y seguir esforzándome cada día, para lograr y cumplir mis sueños, y apoyarlos en todo momento siempre; sobre todo a mi madre, quien dejó de lado sus propias metas para cuidar y sacarnos adelante a mi hermano y a mí, todo se lo debo a Dios y a usted mami Erika.

Te agradezco infinitamente todo tu apoyo **Lucero Selene**, amor, gracias por levantarte cada mañana para hacer mi desayuno, por preocuparte que tuviera una comida y sólo me concentrara en mis estudios, por cuidar de mí y hacerme tan feliz cada día, gracias por ayudarme cuando más lo necesitaba, esto si se midiera por porcentajes, tú sales ganando, sin duda eres la mejor cocha.

Agradezco a mi abuelita **María**, mi padre **José Luis**, a mis tías, mis primas y primos, a todos mis familiares por sus muestras de apoyo y cariño a lo largo de estos dos años, que cuando iba de vacaciones me daban ánimos y consejos para seguir adelante, a todos muchísimas gracias, los amo mucho familia.

Muchas gracias a la **Dra. Claudia Gutiérrez**, por confiar en mí para realizar este proyecto y darme todo su apoyo cuando me sentía confundido y no sabía que tenía que hacer con la tesis, pero que, con su guía, paciencia y amistad, logramos sacar adelante, gracias doctora, sin usted esto no se podría haber logrado.

Gracias al **Dr. Fernando García** por ayudarme y darme la oportunidad de colaborar con su grupo de trabajo y brindarme las facilidades en el laboratorio de Bioingeniería. Gracias a la **Mtra. Isabel Nieto** por toda su ayuda con las pruebas de caracterización y procesos en el laboratorio, a las **Mtra. Montserrat** y **Vanesa** por su ayuda con los procesos de pelletizado. Y a todos los compañeros del laboratorio de Bioingeniería por su amistad, muchas gracias.

Agradezco a los miembros de mi comité, **Dra. Ana Angelica**, **Dr. Julio** y al **Dr. Rufino** por su disposición y entrega en este proyecto, y dar seguimiento a la tesis para lograr terminarla.

Muchas gracias a mis compañeros de maestría por todos esos momentos de diversión que pasamos juntos, que la pandemia hizo que nos dejemos de ver, pero eso no borrara la amistad que logramos forjar.

Por último, gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACyT**) por su ayuda con la beca de maestría con número de apoyo 741538.

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE TABLAS..... | IV |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | VI |
| RESUMEN..... | VIII |
| ABSTRACT | IX |
| DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE | X |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 5 |
| 2.1 Pellets combustibles..... | 5 |
| 2.1.1 Proceso de peletizado | 6 |
| 2.1.1.1 Materia prima | 6 |
| 2.1.1.2 Acondicionamiento de humedad..... | 6 |
| 2.1.1.3 Molienda..... | 7 |
| 2.1.1.4 Densificado..... | 7 |
| 2.1.1.5 Enfriamiento | 8 |
| 2.1.2 Parámetros que influyen en la producción de pellets..... | 8 |
| 2.1.2.1 Contenido de humedad | 9 |
| 2.1.2.2 Temperatura de peletización | 9 |
| 2.1.2.3 Tamaño de partícula..... | 10 |
| 2.1.3 Normativas | 10 |
| 2.2 Estudios previos | 11 |
| 2.3 Residuos de café..... | 17 |
| 3. HIPÓTESIS | 21 |
| 4. OBJETIVOS | 21 |
| 4.1 Objetivo general | 21 |
| 4.2 Objetivos específicos | 21 |
| 5. METODOLOGÍA..... | 22 |
| 5.1 Materiales..... | 22 |
| 5.2 Equipos | 22 |
| 5.3 Métodos..... | 22 |
| 5.3.1 Recolección de biomasa..... | 22 |

| | | |
|----------|---|----|
| 5.3.2 | Descripción de laboratorio | 23 |
| 5.3.3 | Equipo de seguridad..... | 23 |
| 5.3.4 | Molienda del cascabillo de café | 23 |
| 5.3.5 | Caracterización fisicoquímica de la biomasa y pellets combustibles..... | 24 |
| 5.3.5.1 | Determinación de humedad..... | 25 |
| 5.3.5.2 | Determinación de cenizas | 27 |
| 5.3.5.3 | Determinación de sólidos volátiles..... | 28 |
| 5.3.5.4 | Determinación de contenido de carbono | 29 |
| 5.3.5.5 | Determinación de poder calorífico | 30 |
| 5.3.6 | Análisis de propiedades físicas a los pellets combustibles | 31 |
| 5.3.6.1 | Medición de longitud y diámetro | 31 |
| 5.3.6.2 | Densidad individual | 32 |
| 5.3.6.3 | Densidad a granel | 33 |
| 5.3.6.4 | Durabilidad mecánica | 33 |
| 5.3.7 | Diseño de experimentos | 34 |
| 5.3.8 | Producción de pellets combustibles..... | 36 |
| 5.3.8.1 | Pellets con diseño experimental | 36 |
| 6. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 38 |
| 6.1 | Caracterización de la materia prima (cascabillo de café) | 38 |
| 6.2 | Pellets combustibles de cascabillo de café | 41 |
| 6.2.1 | Pellets con diseño experimental | 41 |
| 6.2.1.1 | Análisis de los pellets con respecto a la humedad final | 47 |
| 6.2.1.2 | Análisis de los pellets con respecto a las cenizas..... | 51 |
| 6.2.1.3 | Análisis de los pellets con respecto a los sólidos volátiles | 53 |
| 6.2.1.4 | Análisis de los pellets con respecto al carbono total (COT) | 55 |
| 6.2.1.5 | Análisis de los pellets con respecto al poder calorífico (HHV)..... | 57 |
| 6.2.1.6 | Análisis de los pellets con respecto al diámetro..... | 60 |
| 6.2.1.7 | Análisis de los pellets con respecto a la longitud | 62 |
| 6.2.1.8 | Análisis de los pellets con respecto a la densidad individual | 64 |
| 6.2.1.9 | Análisis de los pellets con respecto a la densidad a granel | 66 |
| 6.2.1.10 | Análisis de los pellets con respecto a la durabilidad | 68 |
| 6.2.1.11 | Análisis de los pellets con respecto al rendimiento | 70 |

| | | |
|----------|--|----|
| 6.2.1.12 | Análisis de las mejores propiedades de los pellets | 73 |
| 6.2.2 | Producción de pellets con mezcla de agua y suero de leche | 76 |
| 6.2.2.1 | Análisis de los pellets con respecto a la humedad final | 78 |
| 6.2.2.2 | Análisis de los pellets con respecto a las cenizas..... | 80 |
| 6.2.2.3 | Análisis de los pellets con respecto a los sólidos volátiles | 82 |
| 6.2.2.4 | Análisis de los pellets con respecto al carbono total (COT) | 84 |
| 6.2.2.5 | Análisis de los pellets con respecto al poder calorífico (HHV)..... | 85 |
| 6.2.2.6 | Análisis de los pellets con respecto a las propiedades físicas | 87 |
| 7. | CONCLUSIONES..... | 89 |
| 8. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 91 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Producción y residuos generados de los 8 principales cultivos en México en 2019 | 3 |
| Tabla 2. Especificaciones de los pellets no leñosos clasificados | 10 |
| Tabla 3. Resumen de condiciones óptimas para la producción de pellets a partir de diferentes biomásas residuales..... | 13 |
| Tabla 4. Métodos para la caracterización de biomasa y pellets | 25 |
| Tabla 5. Diseño de experimentos 3 ² con tres réplicas totalmente aleatorizado..... | 35 |
| Tabla 6. Resultados de la caracterización del cascabillo de café | 38 |
| Tabla 7. Caracterización de los pellets combustibles de cascabillo de café..... | 44 |
| Tabla 8. Propiedades físicas de pellets de cascabillo de café | 45 |
| Tabla 9. Resultados promedios de la caracterización de pellets de cascabillo de café.... | 46 |
| Tabla 10. Propiedades físicas promedios de pellets de cascabillo de café | 46 |
| Tabla 11. Valores requeridos de la norma ISO 17225-6 | 47 |
| Tabla 12. Análisis de varianza de la humedad final | 47 |
| Tabla 13. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para la humedad final de los pellets de cascabillo de café..... | 48 |
| Tabla 14. Análisis de varianza de las cenizas | 51 |
| Tabla 15. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para las cenizas de los pellets de cascabillo de café | 51 |
| Tabla 16. Análisis de varianza de los sólidos volátiles..... | 53 |
| Tabla 17. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para los sólidos volátiles de los pellets de cascabillo de café..... | 53 |
| Tabla 18. Análisis de varianza del COT..... | 55 |
| Tabla 19. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para el COT de los pellets de cascabillo de café | 56 |
| Tabla 20. Análisis de varianza del poder calorífico | 58 |
| Tabla 21. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para el poder calorífico de los pellets de cascabillo de café..... | 58 |
| Tabla 22. Análisis de varianza del diámetro | 60 |
| Tabla 23. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para el diámetro de los pellets de cascabillo de café | 61 |
| Tabla 24. Análisis de varianza de la longitud..... | 62 |

| | |
|---|----|
| Tabla 25. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para la longitud de los pellets de cascabillo de café | 63 |
| Tabla 26. Análisis de varianza de la densidad individual | 64 |
| Tabla 27. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para la densidad individual de los pellets de cascabillo de café..... | 64 |
| Tabla 28. Análisis de varianza de la densidad a granel | 66 |
| Tabla 29. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para la densidad a granel de los pellets de cascabillo de café..... | 66 |
| Tabla 30. Análisis de varianza de la durabilidad | 69 |
| Tabla 31. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para la durabilidad de los pellets de cascabillo de café | 69 |
| Tabla 32. Análisis de varianza del rendimiento..... | 71 |
| Tabla 33. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para el rendimiento de producción de los pellets de cascabillo de café | 71 |
| Tabla 34. Resultados de la caracterización de pellets de cascabillo de café con mezcla de agua y suero de leche | 78 |
| Tabla 35. Propiedades físicas de pellets de cascabillo de café con mezcla de agua y suero de leche | 78 |
| Tabla 36. Análisis de varianza de la humedad final | 79 |
| Tabla 37. Análisis de varianza de las cenizas | 80 |
| Tabla 38. Análisis de varianza de los sólidos volátiles..... | 82 |
| Tabla 39. Análisis de varianza del COT..... | 84 |
| Tabla 40. Análisis de varianza del poder calorífico | 85 |
| Tabla 41. Tabla comparativa de la producción de pellets | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Emisiones de CO ₂ por fuente de energía en 2018 | 1 |
| Figura 2. Etapas de la producción de pellets combustibles | 6 |
| Figura 3. Proceso de densificado en peletizadora de rodillos..... | 7 |
| Figura 4. Partes del fruto del café | 17 |
| Figura 5. Granos de café arábica (izquierda) y café robusta (derecha) | 18 |
| Figura 6. Métodos de secado de los cultivos de café | 18 |
| Figura 7. Residuos del cultivo de café..... | 19 |
| Figura 8. Biomasa de estudio, cascabillo de café..... | 22 |
| Figura 9. Proceso de molienda y tamizado del cascabillo de café..... | 24 |
| Figura 10. Balanza, Precisa 321 | 25 |
| Figura 11. Horno de secado, AIR..... | 25 |
| Figura 12. Desecador, Numak | 26 |
| Figura 13. Muestras dentro de la mufla..... | 27 |
| Figura 14. Muestras después de la prueba de sólidos volátiles..... | 28 |
| Figura 15. Muestras después de la prueba COT (lado derecho) | 29 |
| Figura 16. Calorímetro isoperibólico 6200 Parr | 30 |
| Figura 17. Proceso para prueba de poder calorífico..... | 31 |
| Figura 18. Dimensiones de un pellet..... | 32 |
| Figura 19. Vernier, Mitutoyo..... | 32 |
| Figura 20. Porcentaje de humedad para cada tamaño de partícula de 0.42 mm, 1.00 mm y 3.00 mm..... | 36 |
| Figura 21. Peletizadora de rodillos | 37 |
| Figura 22. Matriz de formación plana..... | 37 |
| Figura 23. Enfriamiento de pellets..... | 37 |
| Figura 24. Pellets resguardados | 37 |
| Figura 25. Pellets de 0.42 mm con 25 % (lado izquierdo), 27 % (centro) y 30 % (lado derecho) de humedad..... | 41 |
| Figura 26. Pellets de 1.00 mm con 25 % (lado izquierdo), 27 % (centro) y 30 % (lado derecho) de humedad..... | 42 |
| Figura 27. Pellets de 3.00 mm con 25 % (lado izquierdo), 27 % (centro) y 30 % (lado derecho) de humedad..... | 42 |
| Figura 28. Gráfico de interacción entre factores para la humedad final..... | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 29 Gráfico de interacción entre factores para las cenizas | 52 |
| Figura 30. Gráfico de interacción entre factores para los sólidos volátiles | 54 |
| Figura 31. Gráfico de interacción entre factores para el carbono total..... | 56 |
| Figura 32. Gráfico de interacción entre factores para el poder calorífico..... | 59 |
| Figura 33. Gráfico de interacción entre factores para el diámetro | 62 |
| Figura 34. Gráfico de interacción entre factores para la longitud..... | 63 |
| Figura 35. Gráfico de interacción entre factores para la densidad individual..... | 65 |
| Figura 36. Gráfico de interacción entre factores para la densidad a granel..... | 67 |
| Figura 37. Gráfico de interacción entre factores para la durabilidad..... | 70 |
| Figura 38. Gráfico de interacción entre factores para el rendimiento..... | 72 |
| Figura 39. Gráfico comparativo entre la humedad final y la norma ISO 17225-6..... | 73 |
| Figura 40. Gráfico comparativo entre las cenizas y la norma ISO 17225-6..... | 74 |
| Figura 41. Gráfico comparativo entre el poder calorífico y la norma ISO 17225-6..... | 74 |
| Figura 42. Gráfico comparativo entre la densidad a granel y la norma ISO 17225-6..... | 74 |
| Figura 43. Gráfico comparativo entre la durabilidad y la norma ISO 17225-6..... | 75 |
| Figura 44. Proporciones de agua y suero de leche | 76 |
| Figura 45. Pellets mezcla 75:25..... | 77 |
| Figura 46. Pellets mezcla 50:50..... | 77 |
| Figura 47. Pellets mezcla 25:75..... | 77 |
| Figura 48. Pellets mezcla 0:100..... | 77 |
| Figura 49. Diagrama de caja para la humedad final de los tratamientos de agua y suero de leche, y prueba de Tukey..... | 79 |
| Figura 50. Diagrama de caja de cenizas finales de los tratamientos de agua y suero de leche, y prueba de Tukey..... | 81 |
| Figura 51. Diagrama de caja para sólidos volátiles de los tratamientos de agua y suero de leche, y prueba de Tukey..... | 83 |
| Figura 52. Diagrama de caja para carbono (COT) de los tratamientos de agua y suero de leche, y prueba de Tukey..... | 84 |
| Figura 53. Diagrama de caja, histograma y gráfico normal para poder calorífico de los tratamientos de agua y suero de leche | 86 |
| Figura 54. Gráfico de Tukey para poder calorífico entre los tratamientos de agua y suero de leche..... | 86 |

RESUMEN

El cambio climático junto con el declive en la producción de los pozos petroleros ha originado la búsqueda de fuentes alternas de energía. En este contexto, los biocombustibles sólidos se han propuesto como reemplazo del carbón mineral, y han recibido una gran atención debido a que pueden producirse de residuos agrícolas. La producción de biocombustibles sólidos se ha estudiado considerando diversos tipos de biomásas; sin embargo, los residuos del cultivo de café no han sido explorados. Dichos desechos presentan un problema por su lenta degradación e inadecuada disposición, además de ser poco utilizados en la generación de nuevos productos. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo de investigación es la producción de pellets combustibles a partir del cascabillo de café.

La densificación del residuo se realizó en una peletizadora de rodillos de matriz plana, siguiendo un diseño de experimentos 3^2 , mediante el control de los factores de tamaño de partícula con niveles de 0.42, 1.00 y 3.00 mm, y la humedad inicial en niveles de 25, 27 y 30 %. Al final de la investigación se obtuvo un pellet con poder calorífico superior de 18.07 MJ/kg, 5.92 % de humedad final, 3.96 % de cenizas, pero con una baja densidad a granel de 407.33 kg/m³, además de un bajo rendimiento del 51.86 % sin recirculación. Con base en lo anterior, se realizó una segunda etapa experimental, agregando mezclas de suero de leche y agua, para mejorar las propiedades fisicoquímicas y energéticas de los pellets. Los resultados muestran que se obtienen pellets de alta calidad con un poder calorífico superior de 18.75 MJ/kg, 8.54 % de humedad final, 8.37 % de cenizas, una densidad a granel de 714.0 kg/m³ y un rendimiento del 81.62 %; lo anterior como resultado de emplear tamaño de partícula de 0.42 mm, humedad del 27 % resultante de una mezcla de agua (50 %) y suero de leche (50 %). Así, los pellets combustibles de residuos de café cumplen con especificaciones de la Norma ISO 17225-6.

Palabras claves: Biomasa, pellets combustibles, residuos del cultivo de café, biocombustible sólido, energía renovable.

ABSTRACT

Climate change coupled with the decline in oil well production has prompted the search for alternative sources of energy. In this context, solid biofuels have been proposed as a replacement for coal, and have received a great deal of attention because they can be produced from agricultural residues. The production of solid biofuels has been studied by considering different types of biomasses; however, coffee crop residues have not been explored. These wastes present a problem due to their slow degradation and inadequate disposal, in addition to being little used in the generation of new products. Therefore, the objective of the present research work is the production of fuel pellets from coffee husks.

The densification of the residue was carried out in a flat die roller pelletizer, following a design of experiments 3^2 , by controlling the particle size factors with levels of 0.42, 1.00 and 3.00 mm, and the initial moisture at levels of 25, 27 and 30 %. At the end of the investigation, a pellet was obtained with a higher calorific value of 18.07 MJ/kg, 5.92 % final moisture, 3.96 % ash, but with a low bulk density of 407.33 kg/m³, in addition to a low yield of 51.86 % without recirculation. Based on the above, a second experimental stage was carried out by adding mixtures of whey and water to improve the physicochemical and energetic properties of the pellets. The results show that high quality pellets are obtained with a higher calorific value of 18.75 MJ/kg, 8.54 % final moisture, 8.37 % ash, a bulk density of 714.0 kg/m³ and a yield of 81.62 %; this is the result of using a particle size of 0.42 mm, 27 % moisture resulting from a mixture of water (50 %) and whey (50 %). Thus, the coffee residue fuel pellets comply with the specifications of ISO Standard 17225-6.

Key words: Biomass, fuel pellets, coffee crop residues, solid biofuel, renewable energy.

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética, y que reporto detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras.

Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la generación de energía eléctrica y/o calorífica proviene principalmente de los combustibles fósiles, como el petróleo, carbón y gas natural. En 2019, el 81 % de la producción mundial de energía se generó a partir de la quema de combustibles fósiles, siendo el petróleo la fuente más usada (IEA, 2020). En particular, en México, durante el primer semestre del 2018, el 75.88 % de la generación de energía eléctrica se derivó de la quema de combustibles fósiles (SENER, 2018). Por otra parte, el uso excesivo de tales combustibles ha originado problemas de contaminación y de cambio climático; en especial, derivado del uso de estos combustibles se ha liberado a la atmósfera una gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, en su mayoría dióxido de carbono (CO₂). Como referencia, en el año 2018 se produjeron 33,513.3 millones de toneladas de CO₂ derivadas de la quema de carbón (44 %), petróleo (34 %), y gas natural (22 %) (IEA, 2019), ver Figura 1.

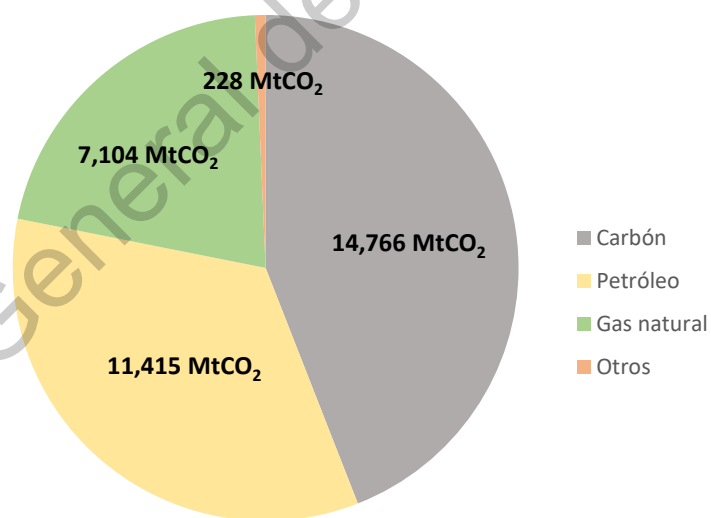


Figura 1. Emisiones de CO₂ por fuente de energía en 2018 (IEA, 2019)

La acumulación de las emisiones de CO₂ ha generado un incremento de la temperatura terrestre, la cual está asociada con los cambios climáticos. Por lo que uno de los grandes retos en materia energética es encontrar fuentes de energías alternativas de menor impacto ambiental que los combustibles fósiles; cabe

mencionar que la producción de dichos combustibles fósiles se encuentra en declive, por lo que las nuevas fuentes de energía deben ser tanto renovables como competitivas económicamente.

Algunas de las fuentes alternativas que se han estudiado incluyen la radiación solar, el flujo de viento, las corrientes de agua, o el calor del subsuelo, las cuales pueden usarse para generar energía eléctrica y/o calorífica. Otra fuente alternativa es la biomasa, la cual es muy atractiva, ya que permite obtener energía eléctrica, calorífica y/o biocombustibles. En particular, los biocombustibles son aquellos producidos a partir de la biomasa mediante diferentes procesos de conversión; esta forma de bioenergía se puede presentar en estado líquido, sólido y gaseoso (Guo et al., 2015). Por otra parte, los combustibles renovables se pueden producir de biomasa comestibles (caña de azúcar, sorgo), no comestibles (jatropha, higuera), residuos (pajas, cascarillas), así como microorganismos (microalgas).

Para obtener biocombustibles sólidos, la biomasa se somete a procesos físicos, tales como la compactación, astillado o trituración. Existen diferentes tipos de biocombustibles sólidos, tales como pellets, briquetas, astillas o carbón vegetal. En particular, los pellets son biocombustibles sólidos hechos de biomasa molida con o sin aditivos y unificados en forma de cilindros, obtenidos por compresión mecánica (ISO, 2014); los pellets se producen principalmente de biomasa residual, como los residuos forestales, de la industria maderera, agroindustriales y del procesamiento de alimentos (Hossain et al., 2016).

En México, en el año 2019, la superficie cultivada fue de 20.6 millones de hectáreas con una producción agrícola de 704 millones de toneladas. Algunos cultivos se encuentran ampliamente diseminados en el país; el maíz representa el 37.3 % de la superficie total cultivada, mientras que los pastos y praderas, frijol, sorgo, caña de azúcar, avena, café cereza, y trigo ocuparon casi el 40 % (SIAP, 2020). La biomasa residual generada a partir de estos cultivos tiene actualmente diversos usos, entre los que se incluyen alimentación y lecho de animales, mantillo, quema para producir energía, y, finalmente, compostaje.

La Tabla 1 muestra un resumen de los cultivos más producidos en México; considerando la producción agrícola se puede estimar la cantidad de residuos generados, mediante los coeficientes reportados por el Atlas Nacional de Biomasa (ANBIO, 2020); de la Tabla 1 se observa la cantidad de biomasa residual de los cultivos que se producen, y que en su mayoría no tienen otros usos. La utilización de la biomasa para la obtención de energía es una opción atractiva para el sector rural, debido a sus múltiples beneficios sociales, económicos y ambientales (Demirbas, 2008; Alemán-Nava et al., 2014). Por lo tanto, México se convertiría en un foco central de atención para la producción de biocombustibles, campo que aún se encuentra en las primeras etapas de exploración (Alemán-Nava et al., 2014). En particular, los residuos de café no han sido explorados para la generación de biocombustibles sólidos, y resultan de interés ya que no compiten con la alimentación y no genera conflictos éticos por su uso; dentro de los residuos de café se encuentran la pulpa, mucílago y el cascabillo.

Tabla 1. Producción y residuos generados de los 8 principales cultivos en México en 2019 (ANBIO, 2020)

| Cultivo | Superficie cosechada (ha) | Producción (Toneladas) | Residuos (Toneladas) |
|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Avena forrajera | 696,548.18 | 10,477,189.23 | 1,152,490.82 |
| Café cereza | 629,300.47 | 900,215.33 | 315,075.37 |
| Caña de azúcar | 781,549.87 | 58,893,351.37 | 6,478,268.65 |
| Frijol | 1,209,693.59 | 894,368.80 | 760,213.48 |
| Maíz | 7,198,788.93 | 42,798,685.23 | 36,378,882.45 |
| Pastos y praderas | 2,487,154.32 | 52,069,061.68 | 5,727,596.79 |
| Sorgo | 1,324,782.64 | 4,352,947.01 | 3,700,004.96 |
| Trigo | 587,476.55 | 3,271,334.46 | 2,780,634.29 |

En los países productores de café, los desechos y subproductos del café constituyen una fuente de grave contaminación. Las unidades de procesamiento de café que se encuentran en casi todas las fincas cafeteras representan una amenaza para el medio ambiente, debido a la eliminación insegura de la pulpa y la cáscara. En México, muy pocas o ninguna industria controla los residuos generados de la

producción del café, y por lo tanto sigue siendo un problema de contaminación (SAGARPA, 2015). Cabe añadir que en México existe una gran cantidad de pequeños productores de café; para ellos el cascabillo del café representa un residuo sin uso y un problema de contaminación que los impacta severamente. Por lo que el uso del cascabillo en la producción de pellets combustibles permitirá resolver estos problemas, y proveer de una fuente energética a dichos productores. Adicionalmente, la producción de pellets combustibles de cascabillo de café ayudará a reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

Los pellets han recibido cada vez más atención internacional debido a su potencial como fuentes de energía limpias y renovables, especialmente cuando se producen a partir de residuos agrícolas y forestales con un potencial energético elevado (Tauro et al., 2016). En particular, la producción de pellets a partir de residuos de café permitirá reducir la dependencia de combustibles fósiles en la industria del sector cafetalero; además, posibilitará incrementar la rentabilidad del proceso de aprovechamiento del café. Para ello, es necesario determinar las condiciones de humedad y tamaño de partícula que maximicen el poder calorífico de los pellets elaborados a partir de residuos de café. Así, la generación de pellets combustibles de máximo poder calorífico, a partir de residuos de café, permitirá revalorizar estos residuos, contribuyendo a resolver el problema del cambio climático.

Adicionalmente, Pradhan et al. (2018a) señalan que la producción y el uso de pellets combustibles de diversas materias primas no se ha explorado por completo en todo el mundo, y, por lo tanto, el tema requiere más investigación. Así, el estudio de diversas biomásas permitirá la comprensión general del proceso de producción de pellets combustibles, y amplificará el potencial de utilización de biomasa para eventualmente contribuir al desarrollo de una red de bioenergía sostenible. Por lo tanto, en este proyecto se estudiará el efecto de la humedad y el tamaño de partícula en el poder calorífico de pellets combustibles de cascabillo de café.

2. ANTECEDENTES

En la actualidad, el uso excesivo de los combustibles fósiles para la producción de energía ha ocasionado grandes problemas de contaminación, por lo que se han tenido que buscar fuentes alternas para su generación. Las energías renovables provienen del aprovechamiento de los recursos naturales, tales como la radiación solar, el flujo de viento, las corrientes de agua, o el calor del subsuelo; estos recursos pueden transformarse en energía eléctrica o calorífica. Otro recurso natural es la biomasa, que se define como la materia orgánica que se origina durante procesos biológicos como la fotosíntesis (Guo et al., 2015); la conversión de la biomasa posibilita producir energía eléctrica, energía calorífica, productos de valor agregado y biocombustibles. Los biocombustibles pueden encontrarse en estado gaseoso, líquido o sólido, siendo éstos últimos de interés en el presente proyecto. Para la producción de biocombustibles sólidos, en particular pellets combustibles, se han explorado algunos residuos agroindustriales; la producción de pellets combustibles a partir de residuos agroindustriales permite su revalorización, y, al mismo tiempo, resuelve el problema de contaminación asociado a los grandes volúmenes en los que éstos son generados.

2.1 Pellets combustibles

Los pellets combustibles son los biocombustibles sólidos más populares en la actualidad. Los pellets combustibles se obtienen mediante la densificación, por medio de presión y temperatura, de biomasa para obtener un aglomerado en forma de cilindro. La norma ISO 17225-6, biocombustibles sólidos, especificaciones y clases de combustible, define a los pellets como biocombustibles densificados hechos de biomasa molida o con o sin aditivos y unificados en forma de cilindros, generalmente de diámetro menor a 25 mm, de longitud aleatoria y típicamente de 3.15 mm a 40 mm con extremos rotos, obtenidos por compresión mecánica (ISO, 2014).

2.1.1 Proceso de peletizado

En el proceso de producción de pellets se consideran varias etapas, las cuales se muestran en la Figura 2 y se describen a continuación; la presencia de todas las etapas dependerá de la caracterización de la biomasa.

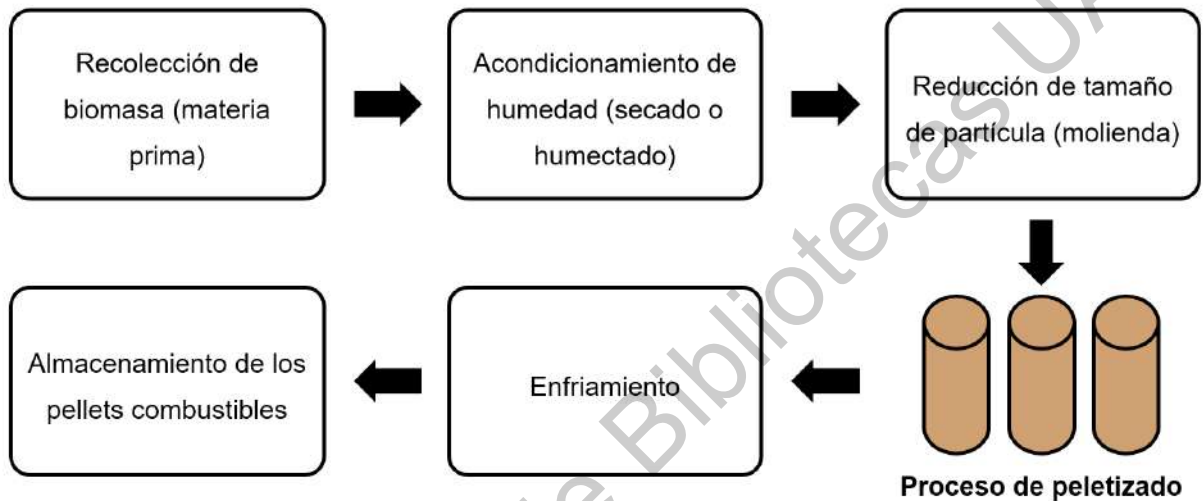


Figura 2. Etapas de la producción de pellets combustibles

2.1.1.1 Materia prima

La recepción de la materia prima contempla la medición del contenido de humedad, característica que se utiliza como criterio de almacenaje. Es importante que la biomasa se encuentre almacenada bajo techo para evitar la exposición a factores climáticos que eleven el contenido de humedad, dado que el proceso de peletización es continuo. Se espera que las condiciones iniciales de humedad de la materia prima sean entre un 8-15 %, con contenido de lignina alrededor del 25 % (Pradhan et al., 2018b).

2.1.1.2 Acondicionamiento de humedad

La primera etapa incluye el acondicionamiento de la humedad del residuo; esta etapa puede o no ser necesaria dependiendo de los valores de humedad del residuo, por lo que se podría tener que secar o bien humectar. Si es necesario secar

la materia prima, ésta debe alcanzar un máximo de 10 % de humedad residual. Algunas materias primas utilizadas en el proceso ya pueden contener dicho porcentaje, por lo que podrán procesarse directamente.

2.1.1.3 Molienda

Una vez que la humedad ha sido ajustada, se debe reducir el tamaño de partícula. Para ello puede ser necesario una trituración o una molienda; la condición óptima depende de la morfología de la biomasa y de cómo ésta afecta la resistencia mecánica y densidad del pellet. Esta etapa tiene como objetivo la homogenización y disminución del tamaño de la materia prima a fin de lograr un tamaño de partícula homogéneo; esto estabiliza el proceso de peletización, reduce el desgaste (variaciones de presión sobre los rodillos), y mejora la calidad del pellet (presión uniforme de compactación).

2.1.1.4 Densificado

El proceso de densificado, o peletizado, de la biomasa se lleva a cabo en la máquina peletizadora, ver Figura 3. En el proceso de densificado, la biomasa pasa a través de una matriz agujereada con la ayuda de rodillos giratorios, que ejercen una presión constante sobre ella. La materia prima atraviesa la matriz al mismo tiempo que se comprime, obteniéndose a la salida un diámetro característico a la matriz empleada. A la salida de la matriz, un dispositivo compuesto por cuchillas corta los cilindros, aún blandos, a la medida de la longitud deseada.

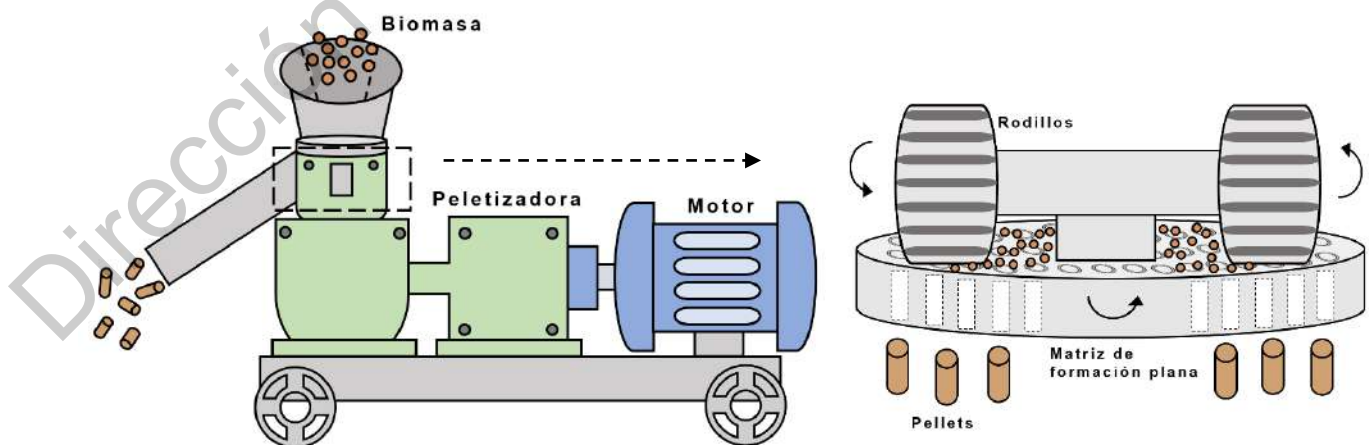


Figura 3. Proceso de densificado en peletizadora de rodillos

Cabe mencionar que la combustión mejora significativamente cuando la biomasa se encuentra densificada en forma de pellets, que cuando ésta se encuentra en su estado natural (Zeng et al., 2016; Zeng et al., 2018; Pradhan et al., 2018a); es decir, se aprovecha de manera más eficiente la biomasa cuando está densificada. En comparación con la biomasa de la cual provienen, los pellets ocupan poco espacio debido al incremento significativo en la densidad; asimismo, los costos de transportación son menores y de fácil manejo (Mock et al., 2020).

2.1.1.5 Enfriamiento

Al finalizar el proceso de compactación, los pellets tienen una temperatura aproximada de 80 °C, característica que los hace muy blandos y se desarmen con facilidad; por esta razón es necesario enfriarlos hasta una temperatura cercana al ambiente, de manera que la lignina se endurezca y los pellets adopten la forma cilíndrica y compacta típica. A partir de ahí los pellets adquieren su durabilidad final.

Las etapas de proceso anteriormente descritas deben adecuarse en función de las características de la biomasa, siendo su composición y morfología las de mayor efecto en la producción de pellets (Pradhan et al., 2018a). Por otra parte, las condiciones óptimas del proceso de producción de pellets dependen de la materia prima, y no puede conocerse a priori si los pellets resultantes cumplirán o no con el estándar. En pocas palabras, las etapas del proceso de producción de pellets combustibles y las condiciones óptimas en cada una de ellas deben determinarse para cada materia prima que se desee utilizar, para garantizar que el pellet combustible cumple con la norma ISO 17225-6 (ISO, 2014).

2.1.2 Parámetros que influyen en la producción de pellets

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.

2.1.2.1 Contenido de humedad

La humedad es quizás uno de los parámetros más importantes en la elaboración de los pellets. De ella dependen características como el poder calorífico del biocombustible, la estructura del pellet, su resistencia a la deformación, la aglomeración de la biomasa, entre otras propiedades. La humedad de la biomasa se debe controlar en dos momentos del proceso, cada uno dependiente de la otra. La primera etapa es la humedad inicial de la biomasa; es decir, la cantidad de agua que tiene la materia prima en el momento de su recolección. En la segunda etapa, el proceso de peletizado, es necesario controlar nuevamente la humedad puesto que también se deben considerar pérdidas de agua al momento de utilizar la máquina peletizadora; ésta última ha sido precalentada previamente a una temperatura recomendada por el fabricante. Los rangos reportados por Serrano et al. (2011) en la producción de pellets a partir de paja de cebada incluían rangos entre un 12-20 %, al final el pellet producido cumplió con la norma; no obstante, como se mencionó en un principio los rangos recomendables de humedad inicial deberían estar entre un 8-15 %, pero claro esto dependerá de la biomasa utilizada en cada proceso.

2.1.2.2 Temperatura de peletización

La temperatura de peletización hace referencia a la temperatura de la chaqueta que recubre la recámara donde es alimentada la biomasa, permitiendo el incremento de la temperatura en la biomasa utilizada. Algunos autores reportan un efecto significativo en el aumento de la temperatura de la máquina peletizadora. A mayor temperatura, componentes como la lignina sufren cambios estructurales que permiten aglomerar la biomasa. Adicionalmente, se produce un aumento de la temperatura por el roce entre las partículas debido a la presión ejercida por la máquina. El intervalo de temperaturas de acondicionamiento óptimas depende del tipo de biomasa, y oscila entre 65 y 100 °C (Lisowski et al., 2017).

2.1.2.3 Tamaño de partícula

El tamaño de partícula determina los espacios libres entre las partículas que forman el pellet, así mismo, su durabilidad y resistencia mecánica. Cuando el tamaño de partícula es menor, el área superficial aumenta, facilitando la densificación. Las partículas grandes son un punto de fractura del material. El tamaño de los granos debe tener un diámetro medio, determinado en procesos de adecuación previos de la biomasa, como lo es la molienda. Los intervalos para un buen tamaño de partícula varían entre los 3.15 a 7.00 mm, esto reportado por autores como Theerarattananon et al. (2011), Miranda et al. (2018) y Ramírez et al. (2019).

2.1.3 Normativas

Existen principalmente dos tipos de normas que regulan los parámetros de calidad que deben cumplir los pellets combustibles. La norma más usada es la ISO 17225-6, Biocombustibles sólidos, especificaciones y clases de combustible, Parte 6: Pellets no leñosos graduados (ISO, 2014). En la norma ISO 17225 se establece el uso de pellets no leñosos clasificados para edificios residenciales, comerciales pequeños y públicos, así como aplicaciones industriales de generación de energía. En la Tabla 2 se pueden ver los requisitos para el cumplimiento de la norma ISO 17225-6.

Tabla 2. Especificaciones de los pellets no leñosos clasificados (ISO, 2014)

| PARÁMETRO | UNIDAD | TIPO | |
|-----------------------------|-------------------|---|------|
| | | A | B |
| Diámetro | mm | 6 a 25, D±1 | |
| Longitud | mm | 3.15 < L ≤ 40 (6 a 10 de diámetro) 3.15 < L ≤ 50 (12 a 25 de diámetro) | |
| Humedad | % base humedad | ≤12 | ≤15 |
| Cenizas | % | ≤6.0 | ≤10 |
| Durabilidad mecánica | % | ≥97.5 | ≥96 |
| Finos | % | ≤2.0 | ≤3.0 |
| Aditivos | % | ≤5.0 | ≤5.0 |
| Densidad a granel | kg/m ³ | ≥600 | ≥600 |

| | | | |
|------------------------------|-----------------|-------|-------|
| Poder calorífico neto | MJ/kg | ≥14.5 | ≥14.5 |
| N | % base seca | ≤1.5 | ≤2.0 |
| S | % base seca | ≤0.2 | ≤0.3 |
| Cl | % base seca | ≤0.1 | ≤0.3 |
| As | mg/kg base seca | | ≤1.0 |
| Cd | mg/kg base seca | | ≤0.5 |
| Cr | mg/kg base seca | | ≤50 |
| Cu | mg/kg base seca | | ≤20 |
| Pb | mg/kg base seca | | ≤10 |
| Hg | mg/kg base seca | | ≤0.1 |
| Ni | mg/kg base seca | | ≤10 |
| Zn | mg/kg base seca | | ≤100 |

*D: Diámetro; L: Longitud

2.2 Estudios previos

En la literatura científica se han realizado estudios para la determinación del proceso y las condiciones óptimas de operación para la producción de pellets de diversas materias primas. 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 humedad de la biomasa, el tamaño de partícula y la presión de formación (Stelte et al., 2011). De los factores anteriormente mencionados, la presión, humedad y el tamaño de partícula son los principales factores estudiados de acuerdo con Mani et al. (2006) 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).

La reducción de tamaño de partícula de la biomasa aumenta la densidad a granel, lo que mejora la fluidez de la biomasa durante la peletización. Existe una tendencia reciente a la reducción de tamaño antes del transporte. El suministro de materia prima de biomasa en forma de partículas es más conveniente en comparación con el suministro convencional de pacas, debido a la facilidad de la logística de transporte y manipulación. Además, la reducción de tamaño es

importante porque aumenta la superficie total y, por tanto, el número de puntos de contacto para la unión entre partículas antes del proceso de peletización (Mani et al., 2004; Miao et al., 2011; Pradhan et al., 2018b).

Por otra parte, la humedad ha resultado, en algunos casos, un serio factor de control; los pellets con alto contenido de humedad provocan una pérdida de materia seca durante el almacenamiento y el transporte, además están sujetos a una pronta descomposición (Tumuluru et al., 2011; Graham et al., 2017). Mani et al. (2006) y Poddar et al. (2014) informaron de un descenso en la densidad de los pellets a medida que el contenido de humedad aumenta del 12 al 15 % para diversas muestras de biomasa (paja de trigo, paja de cebada, rastrojo de maíz y pasto varilla); por consiguiente se requiere mayor presión para la formación del pellet. Por lo que el contenido de humedad influye en el poder calorífico y la combustión final de los pellets, además que una alta humedad genera problemas en los equipos donde la presión de formación no puede ser controlada.

La Tabla 3 concentra las condiciones óptimas de producción de pellets, como el máximo poder calorífico, así como su cumplimiento respecto de la norma ISO 17225-6. De la Tabla 3 puede observarse que los esfuerzos que la comunidad científica se han enfocado en la producción de pellets de materia no leñosa. Las materias primas para obtener mejores resultados en el proceso de peletización deben tener rangos entre un 8-12 % de humedad inicial y un tamaño de partícula de 3.15 a 7.00 mm; los valores puntuales dependen de la biomasa utilizada. Se puede observar que la adición de aglutinantes afecta positivamente a los pellets, brindándoles un mayor poder calorífico.

Otro aspecto para destacar es que la producción de pellets a partir de residuos agrícolas, forestales, y del procesamiento de alimentos es una alternativa de revalorización que contribuye a mitigar la contaminación ocasionada por estos desechos; no obstante, los pellets obtenidos con algunos residuos no cumplen con las normas, por lo que se necesita más investigación para determinar las variables que permitan conseguir mejores resultados.

Tabla 3. Resumen de condiciones óptimas para la producción de pellets a partir de diferentes biomásas residuales

| BIOMASA | | | PELLETS COMBUSTIBLES | | | | | Referencia |
|---|-------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|---|---|
| Tipo | Humedad (%) | Tamaño de partícula (mm) | Poder calorífico (MJ/kg) | Humedad (%) | Densidad (kg/m ³) | Cenizas (%) | Norma ISO 17225-6 | |
| Paja de cebada | 20.2 | 4 y 7 | 16.23 | 7.2 | 1300 | 10.51 | No cumple cenizas Cumple | Serrano et al. (2011) |
| Paja de cebada con aserrín de pino | 12.0 | 4 y 7 | 16.61 | 7.8 | 1400 | 9.64 | | |
| Rastrojos de maíz | 10.0 | 3.2 y 6.5 | N.D. | 9.0 | 624.6 | N.D. | Cumple | Theerarattananon et al. (2011) Tumuluru (2014) |
| | 8.39 | 4.8 | | 15.0 | 626.0 | | | |
| Tallo de sorgo | 10.0 | 3.2 y 6.5 | N.D. | 14.0 | 478.6 | N.D. | No cumple densidad | Theerarattananon et al. (2011) |
| Paja de trigo | 10.0 | 3.2 y 6.5 | N.D. | 9.1 | 649.2 | N.D. | Cumple | Theerarattananon et al. (2011) |
| Fibra de coco (CF) | 10.10 | 0.15 | 17.64 | 10.70 | 984 | 4.45 | No cumple RH con poder calorífico y RH, RH-HC con cenizas | Liu et al. (2014) |
| Cáscara de arroz (RH) | 8.22 | | 13.90 | 8.03 | 1093 | 15.01 | | |
| Corteza de coco (CS) | 5.24 | | 17.59 | 4.61 | 1101 | 1.14 | | |
| Aserrín de pino (PS) | 8.16 | | 16.13 | 5.46 | 1141 | 0.75 | | |
| CF-HC | 4.8 | | 21.55 | 3.92 | 1153 | 1.24 | | |
| RH-HC | 5.07 | | 15.08 | 5.02 | 1334 | 23.28 | | |
| CS-HC | 5.86 | | 21.49 | 4.86 | 1153 | 0.41 | | |
| PS-HC | 3.86 | | 21.74 | 1.86 | 1191 | 0.36 | | |

Tabla 3. Resumen de condiciones óptimas para la producción de pellets a partir de diferentes biomásas residuales

| Tipo | Humedad (%) | Tamaño de partícula (mm) | Poder calorífico (MJ/kg) | Humedad (%) | Densidad (kg/m ³) | Cenizas (%) | Norma ISO 17225-6 | Referencia | |
|---|-------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|---|---------------------------|------------------------------|
| Residuos de cocos nuficera caídos: | | | | | | | | | |
| • Tronco (base) | 13-15 | 4.0 | 20.19 | 5.10 | 656.5 | 2.38 | Cumple | Acda (2015) | |
| • Tronco (medio) | | | 19.02 | 5.46 | 645.5 | 2.14 | | | |
| • Tronco (superior) | | | 18.31 | 4.15 | 624.6 | 1.76 | | | |
| • Parte de la palma | | | 18.08 | 5.72 | 623.2 | 2.45 | | | |
| Residuos de madera | N.D. | N.D. | 17.10 | 5.10 | 624.0 | 1.20 | Cumple | Hossain et al. (2016) | |
| Carbón marrón (lignito) y salvado de arroz | | | | | | | | | |
| 10:0 | 50.6 | N.D. | 11.0 | 48.8 | 600.0 | 12.0 | No cumple poder calorífico, humedad y cenizas | Tsuchiya y Yoshida (2017) | |
| 8:2 | 43.3 | | 12.5 | 41.5 | 600.0 | 11.1 | | | |
| 5:5 | 32.4 | | 15.0 | 30.1 | 580.0 | 10.2 | | | |
| 2:8 | 21.4 | | 17.0 | 19.5 | 580.0 | 9.50 | | | No cumple humedad y densidad |
| 0:10 | 14.1 | | 18.0 | 12.6 | 530.0 | 8.90 | | | No cumple densidad |
| Hojas de palma aceitera | | | | | | | | | |
| Parte foliar de la palma | N.D. | 1.0 | 17.68 | N.D. | 905.63 | 9.64 | Cumple | Wattana et al. (2017) | |
| Ramas de la palma | | | 16.05 | | 935.00 | 2.81 | | | |
| Hojarasca de palma | | | 18.71 | | 1119.29 | 2.25 | | | |
| | | | 19.64 | | 991.27 | 7.77 | | | |

Tabla 3. Resumen de condiciones óptimas para la producción de pellets a partir de diferentes biomásas residuales

| Tipo | Humedad (%) | Tamaño de partícula (mm) | Poder calorífico (MJ/kg) | Humedad (%) | Densidad (kg/m ³) | Cenizas (%) | Norma ISO 17225-6 | Referencia |
|--|--------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|--------------------|------------------------|
| Residuos municipales con aglutinante Novo Gro | | | 17.41 | 11.7 | | 20.64 | No cumple cenizas | Wang et al. (2018) |
| | | | 19.62 | 10.3 | | 8.74 | | |
| • Excremento de perro | 65.9 70.2 | N.D. | 16.55 | 12.6 | N.D. | 17.81 | No cumple cenizas | |
| • Residuos de té | 84.5 | | | | | | | |
| • Estiércol de caballo • Residuos de orujo de manzana | 87.1 | | 16.02 | 18.9 | | 5.31 | No cumple humedad | |
| Aserrín de pino (PIN) | | | 18.16 | | 212.0 | | | García et al. (2018) |
| Aserrín de pino torrefactado (PINT) | 13.0 | 1.0 | 20.08 | | 203.0 | | No cumple densidad | |
| PIN-GP | | | 17.29 | 13.0 | 499.0 | N.D. | | |
| PIN-OP | | | 17.70 | | 443.0 | | | |
| Residuos de microalga <i>Scenedesmus</i> | 10.0 | N.D. | 17.98 | 6.10 | 788.0 | 18.02 | No cumple cenizas | Miranda et al. (2018a) |
| Desechos de jardín | 10.0 | 6.25 y 25.4 | 16.80 | 10.1 | 617.0 | 14.5 | No cumple cenizas | Pradhan et al. (2018a) |
| Residuos de mazorca de maíz | 10.2 | 3.15 | 15.68 | 11.5 | >600.0 | 1.30 | Cumple | Miranda et al. (2018b) |

Tabla 3. Resumen de condiciones óptimas para la producción de pellets a partir de diferentes biomásas residuales

| Tipo | Humedad (%) | Tamaño de partícula (mm) | Poder calorífico (MJ/kg) | Humedad (%) | Densidad (kg/m ³) | Cenizas (%) | Norma ISO 17225-6 | Referencia |
|---|--|---------------------------------|--|--|--|--|--|---------------------------|
| Paja de trigo Paja de trigo torrefactada | 15.0 | 0.1 y 1.2 | 15.43 16.01 | 9.57 7.12 | 469.0 568.0 | 2.64 3.19 | No cumple densidad | Azócar et al. (2019) |
| Cáscara de canola | 8.1 | 0.1 y 1.75 | 16.73 | N.D. | 898.0 | 8.30 | Cumple | Azargohar et al. (2019) |
| Cascarilla de arroz y paja de trigo | 21.0 (50:50) 75:25) | 0.25 | 15.43 14.72 | 15.95 14.16 | 104.0 109.0 | 11.50 14.09 | No cumple densidad y cenizas | Ríos-Badrán et al. (2020) |
| Residuos lignocelulósicos | 15.34 (CW) 8.56 (BS) 10.77 (PW) 7.67 (SW) | 0.25, 0.5, 1.0, 1.4, 2.8 y 3.15 | 17.62 17.87 16.71 17.10 17.86 17.99 | 12.80 12.27 12.07 11.56 12.59 11.12 | 489.67 506.13 606.83 584.13 567.83 544.83 | 6.27 1.93 4.40 2.30 5.62 2.89 | No cumple densidad (sólo cumple CW-PW) | Zawislak et al. (2020) |
| Racimo de fruto vacío de palma aceitera (90%): cáscaras de durián (10%), y 1% de almidón de maíz | 5.84 | 1.0 y 2.0 | 22.37 | 6.90 | N.D. | 1.44 | Cumple | Selvarajoo et al. (2021) |

Nota: *N.D.: No disponible; HC: carbonización hidrotérmica; GP: Orujo de uva; OP: Orujo de oliva; CW: Residuos de camomila; BS: Aserrín de abedul; PW: Residuos de guisantes; SW: Residuos de soja.

Para que los pellets puedan comercializarse deben cumplir con los estándares requeridos por la norma ISO 17225-6; el cumplimiento de dichos estándares garantiza un producto de calidad en términos de poder energético, durabilidad, y el mínimo de emisiones liberadas en la quema de éste, además que se asegura que los pellets no dañarán los equipos en los cuales se vayan a emplear.

De la revisión de la literatura puede observarse que se ha reportado el uso de residuos agroindustriales para la producción de pellets combustibles. En particular, el uso de residuos de biomasa de la industria del café ha sido menos explorado, especialmente el uso del cascabillo de café para pellets combustibles.

2.3 Residuos de café

El café es una bebida estimulante y aromática ampliamente consumida a nivel mundial. Esta bebida se produce a partir de los granos del café o cafeto, el cual es un importante cultivo de plantación. Una de las partes importantes del árbol de café es su fruto, al cual se le dice cereza, uva o capulín; cuando el fruto madura se torna rojo o amarillo, con dos semillas, ver Figura 4. La cereza se compone de la pulpa y el café pergamino; la pulpa está formada por el epicarpio, o cáscara, y representa el 46 % del fruto, mientras que el café pergamino está constituido por el endocarpio, o pajilla, que constituye el 18-20 %.

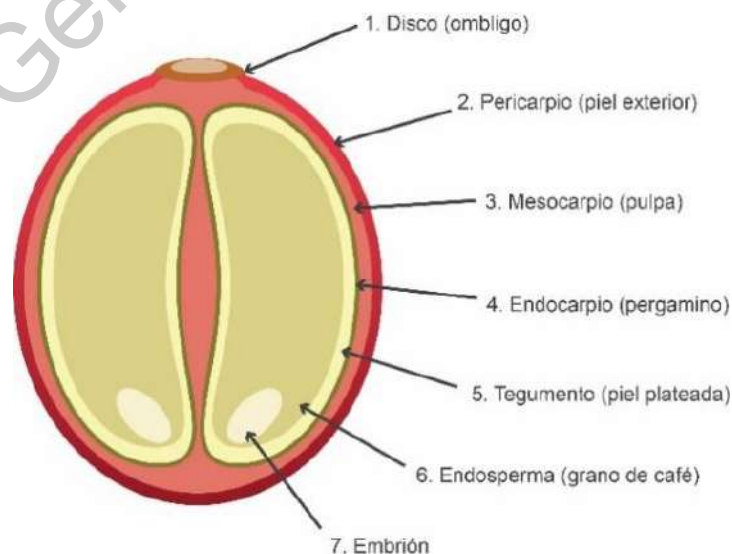


Figura 4. Partes del fruto del café

Dentro de las especies que se cultivan del café existen dos principales: el café arábica y café robusta, ver Figura 5.

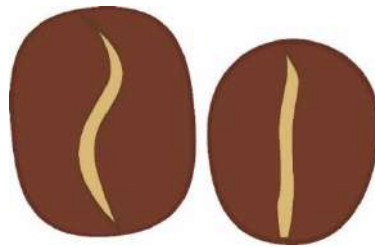


Figura 5. Granos de café arábica (izquierda) y café robusta (derecha)

En el cultivo de café se generan una gran cantidad de residuos durante el procesamiento de la fruta a la taza. Aproximadamente se generan 350 gramos de residuo por cada kilogramo de grano de café; dependiendo del método empleado para la obtención del grano de café, será el tipo de residuo liberado (Esquivel et al., 2012). Los dos métodos básicos para el procesamiento de café son el método húmedo y el método seco, ver Figura 6.

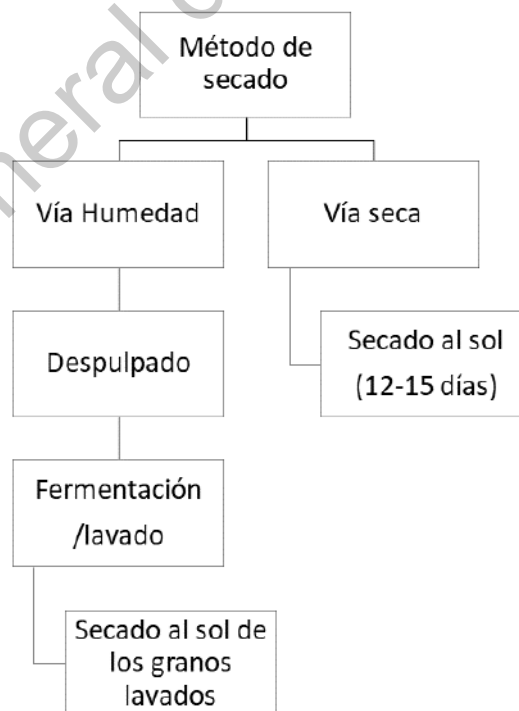


Figura 6. Métodos de secado de los cultivos de café

El café procesado por el método húmedo, también se le llama café lavado o café pergamino. En el método húmedo se elimina la pulpa de la fruta que cubre las semillas/granos con una despulpadora antes de que se sequen. Una vez obtenidos los granos de café del despulpe, éstos pasan a la fermentación, etapa en la cual se elimina el mucílago del grano, debido a que el mucílago es insoluble en agua. El lavado correcto se asegura mediante el tacto de la mano, donde el pergamino no se pegará a la mano después del lavado. El pergamino lavado se escurre del exceso de humedad, se transporta a las barbacoas de secado y se extiende uniformemente hasta un grosor de 5 cm. Los granos de café se secan hasta que la humedad alcanza alrededor del 10 % (Murthy et al., 2001; Murthy y Naidu, 2012).

Por otro lado, el método seco se considera el más antiguo y simple; este método consta de pocas etapas: la cosecha de las cerezas, el secado (mayormente al sol), clasificado y ensacado. El café cereza normalmente se seca completamente en 12-15 días bajo condiciones de clima brillante.

Si el procesado es realizado en seco, los principales residuos generados son la piel, la pulpa, el mucílago y cascarilla; todos estos residuos se agrupan en una misma fracción llamada cáscara o cascabillo de café. Por otra parte, en el procesado en húmedo se recupera la piel y la pulpa en una sola fracción, el mucílago y azúcares solubles en una segunda fracción, y la cascarilla en una tercera fracción. De los varios residuos del procesado del café, la pulpa de café es el que se genera en mayor cantidad (43 % en procesado en húmedo) (Mussatto et al, 2011). La cascarilla y la pulpa de café comprenden cerca del 45 % de la cereza, y son los principales subproductos de la industria del café, Figura 7.



Figura 7. Residuos del cultivo de café

La pulpa de café es el principal residuo de los cultivos, representa el 29 % del peso seco de la fruta entera, y su alto contenido de humedad hace que sea difícil su eliminación. Por otro lado, las cascarillas de la cereza del café representan alrededor del 12 % de la fruta entera, y se compone de agua (15 %), celulosa (24.5 %), hemicelulosa (29.7 %), lignina (23.7 %) y cenizas (6.2 %) (Gouvea et al., 2009; Bekalo y Reinhardt, 2010).

En 2020 se produjeron 9.9 millones de toneladas de café verde a nivel mundial, de las cuales cerca del 3 % fue generado en México (ICO, 2021). Por otra parte, de acuerdo con la SAGARPA, por cada kilogramo de café se producen 350 gramos de residuos (SAGARPA, 2015). Por lo que, en México, en el año 2019 se generaron 315 mil toneladas de residuos de café cereza, de acuerdo con la Tabla 1. Los procesos de biodegradación de los residuos de café requieren tiempos muy largos y una gran demanda de oxígeno; por ello, su incorporación directa en el ambiente representa un alto riesgo para la flora y fauna de esos ecosistemas. Al respecto, en México muy pocas o ninguna industria controla los residuos generados de la producción del café, y por lo tanto sigue siendo un problema de contaminación (Wong et al., 2013). Por ello, se requiere de estrategias que posibiliten su revalorización.

De los residuos del café, la pulpa y la cáscara sólo habían sido utilizados como fertilizante, alimento para el ganado, composta, así como adsorbente para la remoción de compuestos tóxicos para la manufactura de ácido giberélico; no obstante, en estas aplicaciones se emplea sólo una pequeña fracción de la cantidad disponible de residuos, ya que los procesos exhiben eficiencias bajas. Por ello es necesario encontrar otros usos para este residuo sólido. No obstante, no se ha estudiado la producción de pellets combustibles a partir de residuos de café, los cuales podrían usarse en el mismo proceso de producción de café, convirtiendo a esta industria en sostenible y de bajo impacto ambiental. Por ello que se requiere más investigación sobre la revalorización de los desechos o subproductos generados de la industria del café.

3. HIPÓTESIS

Los residuos agroindustriales del cultivo de café (cascabillo de café) pueden utilizarse para la producción de pellets combustibles, cuyo poder calorífico se ve afectado por la humedad y tamaño de partícula de la biomasa, que serán competitivos con respecto a pellets de madera.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Determinar las condiciones de humedad y tamaño de partícula que maximicen el poder calorífico de pellets combustibles elaborados a partir del cascabillo de café arábica.

4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar fisicoquímica y energéticamente la biomasa.
- Realizar un diseño de experimentos considerando la humedad y el tamaño de partícula como factores, determinando los niveles requeridos para la producción de pellets combustibles de cascabillo de café de máximo contenido energético.
- Determinar el efecto de la humedad y el tamaño de partícula del cascabillo de café en el diámetro, longitud, densidad individual, densidad a granel, humedad final, cenizas, contenido de carbono y poder calorífico de los pellets combustibles elaborados.
- Evaluar el cumplimiento de la norma ISO 17225-6 de los pellets combustibles de cascabillo de café; en caso de incumplimiento, proponer el uso de otro residuo disponible para poder satisfacer lo establecido en el estándar.

5. METODOLOGÍA

5.1 Materiales

Los materiales empleados se listan a continuación.

- Cascabillo de café
- Bolsa resellable
- Guantes de látex
- Crisol de porcelana
- Pinzas metálicas
- Máscara respiratoria
- Agua
- Gafas de laboratorio

5.2 Equipos

Los equipos que fueron utilizados son los siguientes:

- Balanza, Precisa 321
- Calorímetro, 6200 Parr
- Prensa manual, Parr 2811
- Vernier, Stainless 784EC
- Mufla, modelo FE-361-Felisa
- Juego de tamices, Mont-Inox
- Desecador HACH, Numak
- Peletizadora, Pellets Machine
- Horno secado, Air
- Nutribullet, Pro 900
- Higrómetro, AR991

5.3 Métodos

5.3.1 Recolección de biomasa

La materia prima seleccionada para la elaboración de los pellets combustibles fue el cascabillo de café arábica (*coffea arabica*), Figura 8; los residuos fueron donados por la empresa Eco Café Neblinas de Guadalupe, localizada en el estado de Querétaro, México. Los residuos fueron colocados en costales sellados para evitar su degradación por la humedad, y la proliferación de microorganismos antes de la caracterización fisicoquímica.



Figura 8. Biomasa de estudio, cascabillo de café

5.3.2 Descripción de laboratorio

Las pruebas de caracterización fisicoquímica de la biomasa y de los pellets se llevaron a cabo en el Laboratorio de Bioingeniería, perteneciente a la Facultad de Ingeniería en el Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro; dicho laboratorio se encuentra ubicado en la comunidad de Amazcala, municipio de El Marqués, Querétaro. De igual manera en este laboratorio se realizó el densificado de la biomasa, ya que el equipo de peletizado se encuentra a un costado del Laboratorio de Bioingeniería.

5.3.3 Equipo de seguridad

Para evitar posibles accidentes como cortes, quemaduras, derrame de productos tóxicos o inhalación de químicos peligrosos se utilizó el equipo de seguridad necesario para prevenirlos; dicho equipo consistió en gafas de seguridad, protección auditiva, guantes de nylon para el proceso de molienda, guantes de látex para el densificado, zapato cerrado, y bata de laboratorio. También fue necesario utilizar protección respiratoria (cubrebocas 3M-N95-8210) para evitar aspirar polvos resultantes de la molienda del cascabillo de café. Algunos otros instrumentos y equipo de seguridad que se usaron fueron las pinzas para crisoles, guantes para altas temperaturas y guantes de látex para la humidificación de la biomasa.

5.3.4 Molienda del cascabillo de café

Para realizar las pruebas fisicoquímicas y de densificado del cascabillo de café fue necesario realizar una disminución del tamaño de partícula; esto consistió en moler el cascabillo en el Nutribullet Pro 900. Posteriormente se utilizó el juego de tamices de acero inoxidable marca Mont-Inox para separar los tamaños de partícula, para lo cual se utilizaron tres diferentes tamaños de malla, de 0.42 mm (malla número 40), 1.00 mm (malla número 18) y 3.00 mm (malla número 6), la equivalencia de malla es de acuerdo con la American Society for Testing Materials.

La Figura 9 muestra el proceso de molienda y tamizado que se realizó para obtener los tamaños de partícula necesarios para la investigación. Del lado izquierdo se muestran los materiales y equipos que se usaron en la molienda; en la

parte central se observa el proceso de tamizado, donde sólo partículas de un tamaño igual o menor al diámetro de la malla podrían pasar a través de la misma; y del lado derecho se ven las muestras separadas y homogenizadas de acuerdo a los tamaños de malla de cada tamiz. Una vez molidas, las muestras fueron guardadas en bolsas herméticas, hasta la realización de las pruebas fisicoquímicas y de peletizado.



Figura 9. Proceso de molienda y tamizado del cascabillo de café

5.3.5 Caracterización fisicoquímica de la biomasa y pellets combustibles

Se realizó la caracterización del cascabillo de café para conocer sus propiedades químicas y físicas, las cuales pudieran tener alguna influencia en el proceso de peletizado. Las pruebas de caracterización del cascabillo de café y los pellets combustibles incluyeron la determinación del análisis proximal (contenido de humedad, cenizas y de sólidos volátiles) y del análisis último (contenido de carbono), así como la medición del poder calorífico.

Los métodos para cada prueba se realizaron con base en los ya establecidos en el Laboratorio de bioingeniería, y los cuales se implementaron con fundamento en normas e instructivos, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Métodos para la caracterización de biomasa y pellets

| 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) |
| Poder calorífico | Calorímetro Isoperibólico |

Con el fin de reducir la variabilidad en los resultados cada prueba de caracterización se realizó por triplicado. A continuación, se describen con más detalle cada prueba de determinación mostrada en la Tabla 4.

5.3.5.1 Determinación de humedad

Se entiende por humedad a la pérdida en peso que sufre un material al someterlo a condiciones de tiempo y temperatura determinados por la norma. La primera parte de la prueba consistió en tener 3 crisoles y llevarlos a peso constante; para ello se registró el peso de cada crisol con ayuda de la balanza, Precisa 321 (ver Figura 10). Los tres crisoles fueron introducidos en la estufa (horno de secado, Air) a una temperatura de 100 ± 2 °C (ver Figura 11), y cada treinta minutos fueron pesados hasta llevarlos a peso constante.



Figura 10. Balanza, Precisa



Figura 11. Horno de secado, AIR

Una vez que se tenían los crisoles a peso constante se añadieron 2 gramos de cascabillo de café ya tamizado con anterioridad. Se registró el peso del crisol más la muestra de biomasa molida; se volvieron a colocar los crisoles dentro del horno que sigue manteniendo la temperatura de $100 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, y se dejaron las muestras por 5 horas. Posteriormente se sacaron los crisoles y se colocaron en el desecador (ver Figura 12) para evitar que ganarán nuevamente humedad.



Figura 12. Desecador, Numak

Una vez que las muestras estaban frías, se pesaron en la balanza y se registró su peso; posteriormente se introdujeron nuevamente al horno de secado por 1 hora, se volvieron a sacar y colocar en el desecador para que se enfriaran. Este procedimiento se realizó hasta tener las muestras a peso constante.

El contenido de agua de la muestra se calcula por diferencia de peso y se expresa en % de humedad como se muestra en la ecuación 1:

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{P2 - P3}{P2 - P1} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

- P1 = Peso de crisol (g)
- P2 = Peso de crisol más muestra húmeda (g)
- P3 = Peso de crisol más muestra seca (g)

5.3.5.2 Determinación de cenizas

El principio de la determinación de cenizas es que la materia seca se carboniza o incinera, y posteriormente se calcina en ausencia de flama en un rango de temperatura determinado para destruir la materia orgánica de la misma, permitiendo así la cuantificación de cenizas totales. El cálculo de las cenizas se realizó conforme a la norma NMX-F-066-S-1978, para la cual fue necesario tener 3 crisoles a peso constante; una vez tomado el peso de los crisoles vacíos se colocaron 2 gramos de cascabillo de café ya molido a cada uno, y se registró su peso nuevamente.

Los crisoles con las muestras se colocaron en la mufla, modelo FE-361-Felisa (ver Figura 13), la cual se programó para alcanzar una temperatura de 800 °C, y en ella se dejaron los crisoles por 10 horas. Una vez pasado el tiempo de incineración se apagó la mufla, permitiendo que las muestras se enfríen; con ayuda de las pinzas para crisol se sacaron de la mufla los crisoles, y se colocaron en el desecador para evitar que absorban humedad. Posteriormente, se pesaron nuevamente los crisoles con la muestra ya calcinada en la balanza analítica, y se registró su peso.



Figura 13. Muestras dentro de la mufla

El contenido de cenizas se calculó por medio de la ecuación 2, y se expresa en porcentaje como se menciona a continuación:

$$\% \text{ Cenizas} = \left(\frac{P2 - P1}{M} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

- P1 = Peso de crisol (g)
- P2 = Peso de crisol más las cenizas (g)
- M = Peso de la muestra (g)

5.3.5.3 Determinación de sólidos volátiles

Los sólidos volátiles son los compuestos perdidos durante la calcinación a 550 °C de una muestra sólida. La prueba consistió en tener 3 crisoles a peso constante; posteriormente se colocaron 2 gramos de biomasa molida de cascabillo de café y se colocaron dentro del horno de secado durante 1 hora; los crisoles se dejaron enfriar por unos minutos, y se pesaron nuevamente, este proceso se realizó hasta tener los crisoles con la biomasa ya seca a peso constante.

El siguiente paso consistió en colocar los crisoles dentro de la mufla, la cual ya estaba programada a una temperatura de 550 °C, y cada 30 minutos se midió el peso hasta que éste se mantuvo constante. La pérdida de masa de la muestra posterior a la ignición equivale a los sólidos volátiles (ver Figura 14).



Figura 14. Muestras después de la prueba de sólidos volátiles

El contenido de sólidos volátiles se determinó utilizando la ecuación 3.

$$\% \text{ Sólidos volátiles} = \left(\frac{A - D}{A - B} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

donde:

- A = Peso de crisol más muestra seca (g)
- B = Peso de crisol (g)
- D = Peso de crisol más la muestra incinerada (g)

5.3.5.4 Determinación de contenido de carbono

El carbono orgánico total (COT) se determinó con base en el método descrito en el manual “Methods manual for forest soil and plant analysis” por Kalra y Maynard (1991). Este procedimiento consiste en calcular la pérdida por ignición (Loss on Ignition, LOI por sus siglas en inglés). Se tomaron 3 crisoles que se encontraban a peso constante, y se le colocaron 2 gramos de biomasa a cada uno; se colocaron los crisoles con la biomasa dentro del horno de secado hasta llevarlos a peso constante, registrando su peso; posteriormente se pusieron las muestras dentro de la mufla a una temperatura de 375 °C por 16 horas. Transcurrido el tiempo se apagó la mufla y se dejaron enfriar, con ayuda de las pinzas se colocaron en el desecador para después pesar las muestras en la balanza analítica (ver Figura 15).



Figura 15. Muestras después de la prueba COT (lado derecho)

La cantidad de materia orgánica se calculó por medio de la ecuación 4, recordando que el 50% de la materia orgánica está compuesta por carbono; por lo tanto, para convertir el LOI a COT se utilizó un factor de 1.724 propuesto por Van Bemmelen (Rosell et al., 2001), ecuación 5.

$$\% LOI = \left(\frac{A-B}{A} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\% COT = \left(\frac{LOI}{1.724} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

donde:

- A = Peso de muestra seca (g)
- B= Peso de la muestra incinerada (g)

5.3.5.5 Determinación de poder calorífico

La energía que aporta la biomasa puede determinarse mediante la medida del calor desprendido durante su combustión (calorimetría directa); para ello se hizo uso de un calorímetro isoperibólico 6200 Parr (ver Figura 16) para realizar la medición.



Figura 16. Calorímetro isoperibólico 6200

El procedimiento consistió en lo siguiente; del cascabillo de café ya molido se tomaron unos gramos para realizar unas pastillas con ayuda de la prensa manual 2811 Parr, las cuales no tenían que pesar más de 1 gramo cada una, como la prueba fue por triplicado se hicieron tres pastillas en total. Teniendo las pastillas, éstas se colocaron en unos crisoles de calorimetría que vienen con el equipo, y el hilo de combustión alrededor de la pastilla; después se colocó el crisol en la bomba de combustión de oxígeno y se cerró cuidadosamente para evitar alguna fuga de la bomba. Posteriormente se colocaron dos litros de agua en una cubeta dentro del calorímetro, la cual provenía del dispensador automático que mantiene al agua con una temperatura constante de 25 °C aproximadamente. Una vez que la cubeta con agua estaba dentro del calorímetro, se introdujo la bomba cerrada para que fuera llenada con oxígeno, además de conectar los dos electrodos como marca el manual del equipo.

A continuación, se cierra la tapa del equipo y en la pantalla de mando del calorímetro se registra el peso de la pastilla, y se selecciona a la bomba número 2; la bomba se llena con oxígeno de manera automática para asegurar la combustión total de la muestra. El equipo opera de manera automática y después de la combustión, que tarda alrededor de 10-15 minutos en la pantalla, se mostró el poder calorífico en calorías/gramo. La Figura 17 muestra el proceso que se siguió para realizar las pruebas de poder calorífico.



Figura 17. Proceso para prueba de poder calorífico

5.3.6 Análisis de propiedades físicas a los pellets combustibles

5.3.6.1 Medición de longitud y diámetro

Una vez que los pellets estaban fríos se procedió a medir su longitud y su diámetro (ver Figura 18), para ello se utilizó el vernier digital de 200 mm, resolución de 0.01 mm, marca MITUTOYO, modelo CD-6PSX mostrado en la Figura 19.

Para realizar la medición se empleará el procedimiento descrito en la norma ISO 17225-6 (ISO, 2014).

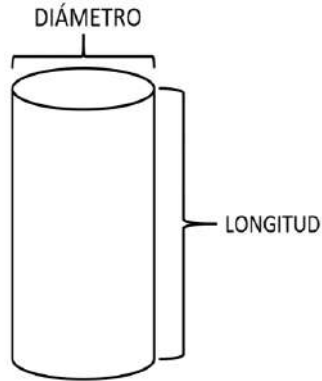


Figura 18. Dimensiones de un pellet



Figura 19. Vernier, Mitutoyo

5.3.6.2 Densidad individual

Una vez que se hayan medido los pellets se pesarán en la balanza, y con los datos de longitud y diámetro que se obtuvieron se determinó el volumen para los pellets; con el peso se calculará la densidad para cada uno de ellos. Las ecuaciones a utilizar son las siguientes:

Volumen del pellet (Ecuación 6)

$$V_p = \frac{1}{4} \pi D^2 L \quad (\text{Ec. 6})$$

donde:

- V_p = Volumen del pellet (cm^3)
- D = Diámetro (cm)
- L = Longitud (cm)

Densidad Individual (Ecuación 7)

$$\rho_p = m_p / V_p \quad (\text{Ec. 7})$$

donde:

- ρ_p = Densidad del pellet (g/cm^3)
- m_p = Peso del pellet (g)

5.3.6.3 Densidad a granel

Para calcular la densidad a granel de los pellets se utilizó un vaso de precipitado de 100 cm³, y para comprobar que fue el volumen real se empleó el mismo volumen de agua destilada. Una vez validado el volumen, el vaso se colocó en la balanza y se taró; posteriormente se llenó con los pellets correspondientes al experimento, hasta la marca de 100 cm³, cuidando que los pellets no fueran a sobresalir; por lo que con un poco de presión se fueron acomodando los pellets en el vaso, procurando cubrir todo el espacio disponible del mismo. Posterior a esta operación, el vaso se colocó en la balanza y se registró el peso marcado. La densidad a granel se calculó con la ecuación 8:

donde:
$$\rho_g = \frac{m_{ps}}{100 \text{ cm}^3} \quad (\text{Ec. 8})$$

- ρ_g = Densidad a granel (g/cm³)
- m_{ps} = Peso de los pellets que ocupan un volumen de 100 cm³ en (g)

5.3.6.4 Durabilidad mecánica

Para determinar la durabilidad mecánica se utilizó la norma ASTM D3038-93 con ligeras modificaciones. Antes de la determinación, se cuantificó la masa del pellet utilizando la balanza de precisión. Posteriormente, se dejó caer el pellet desde una altura de 1.85 m sobre una baldosa de plástico; acto siguiente se pesó nuevamente el pellet, registrando su peso como masa final del pellet. Este procedimiento se realizó para todos los tratamientos. La resistencia al impacto se calculó mediante la ecuación 9:

$$\% \text{Durabilidad mecánica} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (\text{Ec. 9})$$

donde:

- A = Masa final (g)
- B = Masa inicial (g)

5.3.7 Diseño de experimentos

De los resultados obtenidos de la caracterización del cascabillo de café, y para conocer las condiciones óptimas de peletización se seleccionaron dos factores para su estudio, la humedad y tamaño de partícula.

Para el factor humedad, con el resultado de la determinación de humedad de la biomasa se realizaron unas pruebas preliminares para conocer el valor mínimo con que la peletizadora podría producir los pellets de cascabillo; una vez conocido el valor se determinaron dos niveles más para el estudio. Los tres niveles son:

- 25 % de humedad
- 27 % de humedad
- 30 % de humedad

El tamaño de partícula fue seleccionado de acuerdo con los datos obtenidos de la literatura de trabajos similares y expuestos en la Tabla 3; los niveles que se utilizaron fueron los siguientes:

- 0.42 mm
- 1.00 mm
- 3.00 mm

Al tener dos factores y tres niveles por factor se tendrá un diseño de experimentos factorial de 3^2 . Con ayuda del programa RStudio se diseñó el experimento de forma aleatorizada; esto con el fin de disminuir el sesgo presente en el experimento, permitiendo cancelar efectos de factores externos (ruidos). Los tratamientos se realizaron por triplicado como lo muestra la Tabla 5, teniendo un total de 27 tratamientos.

Tabla 5. Diseño de experimentos 3² con tres réplicas totalmente aleatorizado

| Humedad inicial (%) | Tamaño de partícula (mm) |
|---------------------|--------------------------|
| 27 | 0.42 |
| 25 | 3.00 |
| 30 | 3.00 |
| 27 | 3.00 |
| 27 | 1.00 |
| 27 | 3.00 |
| 25 | 1.00 |
| 30 | 1.00 |
| 30 | 0.42 |
| 30 | 3.00 |
| 30 | 1.00 |
| 25 | 0.42 |
| 30 | 0.42 |
| 25 | 3.00 |
| 27 | 0.42 |
| 30 | 3.00 |
| 25 | 0.42 |
| 27 | 0.42 |
| 27 | 1.00 |
| 25 | 1.00 |
| 25 | 0.42 |
| 27 | 3.00 |
| 30 | 1.00 |
| 30 | 0.42 |
| 25 | 3.00 |
| 27 | 1.00 |
| 25 | 1.00 |

Las variables de respuesta serán las siguientes:

- **Químicas:** humedad final (%), cenizas (%), sólidos volátiles (%), contenido de carbono en COT (%).
- **Energéticas:** poder calorífico (MJ/kg).
- **Físicas:** diámetro (mm), longitud (mm), densidad individual (g/cm³), densidad a granel (kg/m³), durabilidad mecánica (%), rendimiento (%).

Por último, los resultados fueron analizados por medio de un ANOVA (Fisher), seguido por un análisis de comparación de medias de los distintos tratamientos del experimento para detectar diferencias entre ellos, por medio de la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) utilizando el programa RStudio.

5.3.8 Producción de pellets combustibles

5.3.8.1 Pellets con diseño experimental

Una vez que se tenían las 27 muestras de la molienda del cascabillo de café, cada una correspondiente con los tamaños de partícula del diseño de experimentos, se realizó el acondicionamiento de la humedad; con ayuda de un higrómetro modelo AR991 se fue tomando el porcentaje de la humedad de cada muestra hasta alcanzar los valores de cada nivel propuesto (Figura 20) y correspondiente al de la Tabla 5.



Figura 20. Porcentaje de humedad para cada tamaño de partícula de 0.42 mm, 1.00 mm y 3.00 mm

Posteriormente se procedió a realizar el proceso de peletizado; para ello se hizo uso de una peletizadora de rodillos de capacidad máxima de 150 a 250 kg/h, con un motor de 5 HP marca Magne Tek (ver Figura 21); además se utilizó una matriz de formado plana de 8 mm de diámetro (ver Figura 22).



Figura 21. Peletizadora de rodillos

Figura 22. Matriz de formación

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

Una vez producidos los pellets de cascabillo de café estos se dejaron enfriar en las charolas (ver Figura 23), para que obtengan dureza y firmeza; una vez que alcanzaron la temperatura ambiente fueron colocados en bolsas resellables, para posteriormente realizar las pruebas correspondientes en el laboratorio (Figura 24).



Figura 23. Enfriamiento de pellets

Figura 24. Pellets resguardados

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Caracterización de la materia prima (cascabillo de café)

A continuación, la Tabla 6 concentra los resultados obtenidos de los análisis realizados para la caracterización del cascabillo de café.

Tabla 6. Resultados de la caracterización del cascabillo de café

| Determinación | Unidad | Cascabillo de café |
|-------------------|--------|--------------------|
| Humedad | % | 9.484 ± 0.09 |
| Cenizas | % | 7.675 ± 0.11 |
| Sólidos volátiles | % | 90.461 ± 0.13* |
| Carbono | % | 51.764 ± 0.04* |
| Poder calorífico | MJ/kg | 16.960 ± 0.01* |

Nota: *Respecto a peso seco

De la Tabla 6 puede notarse que la humedad inicial del cascabillo de café tiene un valor de 9.48%; la humedad inicial de la biomasa es un indicador importante, ya que éste afecta el poder calorífico de los pellets. Los porcentajes altos de humedad reducen el efecto de compresión en la peletizadora, debido a la mayor presión de vapor dentro de los pellets; esto genera una disminución del efecto de la lignina como agente aglutinante, y provocando el desmoronamiento de los pellets fabricados. En contraparte, una biomasa con bajo contenido de humedad no posibilita la aglomeración de los pellets; en consecuencia, en la matriz de formación la temperatura se incrementa, lo cual genera que la superficie de los pellets sufra un proceso acelerado de descomposición térmica de la superficie de los pellets. Por tanto, existe un rango de humedad en el que la densificación es factible (Miranda et al., 2018b).

De acuerdo con Van Loo y Koppejan (2003) reportan que las materias primas deben tener un contenido de humedad inicial de alrededor del 15 % para que los pellets combustibles puedan ser de calidad. El valor reportado por Van Loo y Koppejan (2003) contrasta con los resultados de otras investigaciones, en las cuales

se considera que un contenido de humedad inicial entre 6 y 12% permite llevar cabo un proceso óptimo de densificado (Sokhansanj et al., 2005; Obernberger y Thek, 2010). En estudios previos se han reportado valores que van entre 8.39 % para rastrojos de maíz (Tumuluru, 2014), 10.0 % para la paja de trigo (Pradhan et al. 2018b), y 8.1 % para cáscara de canola (Azargohar et al. 2019). Gouvea et al. (2009) reportan que un valor de 15 % para el contenido de humedad inicial del cascabillo del café es adecuado para realizar un adecuado proceso de densificado; por lo que para esta investigación el valor promedio de 9.484 ± 0.09 % de humedad está dentro del rango óptimo para ser densificado.

Ahora bien, otra variable importante que se reporta en la Tabla 6 es el contenido de cenizas; particularmente en aplicaciones de calefacción industrial o residencial un porcentaje alto de cenizas afecta el desempeño del biocombustible. Las materias primas con alto contenido en cenizas suelen ser problemáticas durante la conversión térmica, debido a los problemas asociados con la eliminación de las cenizas, la formación de escorias, la corrosión de los equipos y la formación de sedimentos en el horno (Obernberger et al., 2006; Gil et al., 2010; Hossain et al., 2016); por esta razón, un porcentaje pequeño de cenizas implica que los costos asociados a la limpieza de los equipos térmicos que emplean pellets combustibles serán menores. De acuerdo con Wang et al. (2018), en los biorresiduos se determinaron contenidos de ceniza que oscilaban entre 3.1 % y el 7.9 %. Gouvea et al. (2009) reportaron en su estudio que el contenido de cenizas del cascabillo de café era de 5.4 %. En este trabajo el cascabillo de café mostró un valor de 7.675 ± 0.11 % en las cenizas, por lo que al ser peletizada la materia prima este valor se debería reducir; lo anterior en consecuencia de la disminución de humedad, ya que permite la quema de la materia inorgánica presente en las cenizas (Hossain et al., 2016). Así, se obtienen condiciones apropiadas para el uso de los pellets en aplicaciones como calderas para la generación de energía.

Los sólidos volátiles, también conocidos como materias volátiles, del cascabillo de café se presentan en la Tabla 6. Un valor alto de sólidos volátiles contribuye a la

combustión al facilitar la ignición; además, en el proceso de combustión se puede obtener una llama de mayor longitud cuando el porcentaje de sólidos volátiles es elevado (González-Castillo et al., 2014; Ramírez et al., 2019). Por lo que, una biomasa se quema con mayor facilidad, y con una llama de buena calidad, cuando contiene un porcentaje de volatilidad mayor al 50 % (González-Castillo et al., 2014). El cascabillo de café mostró resultados (90.461 ± 0.13 %) de sólidos volátiles, los cuales son mucho mayores comparados con otras materias primas como los desechos de jardín con un 67.1 % (Pradhan et al., 2018a), y 71.52 % de cáscara de *jatropha* (Ramírez et al., 2019).

También en la Tabla 6 se reporta el contenido de carbono del cascabillo de café, el cual es un indicador de ignición; este indicador, al estar relacionado con la reactividad de la materia orgánica, permite predecir si se tendrá un alto poder calorífico. En la literatura se han reportado contenidos de carbono en la biomasa desde 43 a 58% (Montero et al., 2013). Con un valor de 51.764 ± 0.04 % para el contenido de carbono del cascabillo de café, éste está por arriba del valor obtenido por Ríos-Badrán et al. (2019) para la cascarilla de arroz (31.13 %) y paja de trigo (49.10 %).

Por último, unos de los parámetros más importantes de la biomasa, y por consiguiente del pellet combustible, es el poder calorífico, ya que es el contenido energético liberado por la biomasa cuando ésta es quemada en aire. Demirbas (2004) reportó que el contenido de lignina se relaciona de manera lineal con el poder calorífico de la biomasa; el poder calorífico de la lignina es de unos 23-27 MJ/kg. Por otra parte, los contenidos de celulosa y la hemicelulosa no contribuyen de manera significativa al poder calorífico global (19 MJ/kg). De acuerdo con los estudios realizados por Bekalo y Reinhardt (2010), las cáscaras de café contienen 23.7 % de lignina, por lo que podría esperarse un poder calorífico elevado en este tipo de biomasa. Cabe mencionar que la lignina es un componente aglutinante que se encuentra de manera natural en la biomasa y que contribuye a la formación de los pellets combustibles. En otras investigaciones se han reportado valores para el

poder calorífico de 11.81 MJ/kg para el bagazo de caña de azúcar, 10.72 MJ/kg para la cáscara de arroz (Marrugo et al., 2019), 14.37 MJ/kg para la cáscara de jatropha (Ramírez et al., 2019). Por lo que, los resultados obtenidos para el cascabillo de café (16.96 MJ/kg) indican que su poder calorífico es mayor en comparación con otros residuos previamente estudiados; por ello, puede afirmarse que el cascabillo de café es fuente con potencial para la generación de biocombustibles.

6.2 Pellets combustibles de cascabillo de café

6.2.1 Pellets con diseño experimental

A continuación, se muestran los pellets obtenidos con las 27 combinaciones resultantes del diseño experimental de los tres niveles tanto de tamaños de partícula como de humedad; para fines de comparación, los pellets se mostrarán para cada tamaño de partícula, ver Figuras 25, 26 y 27.



Figura 25. Pellets de 0.42 mm con 25 % (lado izquierdo), 27 % (centro) y 30 % (lado derecho) de humedad



Figura 26. Pellets de 1.00 mm con 25 % (lado izquierdo), 27 % (centro) y 30 % (lado derecho) de humedad



Figura 27. Pellets de 3.00 mm con 25 % (lado izquierdo), 27 % (centro) y 30 % (lado derecho) de humedad

De las Figuras 25-27 se nota que los pellets generados con un tamaño de partícula de 0.42 mm son los de mayor dureza, firmeza y resistencia; los pellets de 3.00 mm, aunque son un poco más cortos en tamaño comparados a los de 0.42 mm, siguen siendo resistentes. En cambio, los pellets de 1.00 mm son los de menor longitud, y también son los más frágiles comparados a los otros dos tamaños de

partícula; estos pellets presentan una menor aglomeración, por lo que tienden a romperse con mayor facilidad.

Las Tablas 7 y 8 concentran los resultados derivados de las pruebas de la caracterización, tanto fisicoquímica como energética, de los pellets combustibles, así como sus propiedades físicas; la información de las Tablas 7 y 8 fue empleada para realizar un análisis estadístico en el programa Rstudio. Los resultados del análisis servirán para encontrar los valores de humedad y tamaño de partícula que permiten generar pellets combustibles que satisfacen las especificaciones de la norma ISO 17225-6; de la misma manera, las Tablas 9 y 10 muestran de forma sintetizada los valores promedios y la desviación estándar de los nueve tratamientos que se llevaron a cabo mediante el diseño experimental.

Tabla 7. Caracterización de los pellets combustibles de cascabillo de café

| T.P./H.I. | Humedad (%) | Cenizas (%) | Sólidos volátiles (%) | COT (%) | Poder calorífico (MJ/kg) |
|------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|----------------|---------------------------------|
| 0.42-27% | 8.273 | 8.462 | 89.333 | 50.238 | 17.114 |
| 3.00-25% | 6.259 | 5.145 | 93.042 | 53.626 | 18.032 |
| 3.00-30% | 6.426 | 4.724 | 93.140 | 52.305 | 17.837 |
| 3.00-27% | 6.665 | 4.933 | 93.610 | 53.395 | 17.890 |
| 1.00-27% | 6.288 | 5.137 | 93.338 | 53.023 | 17.723 |
| 3.00-27% | 6.776 | 4.962 | 93.759 | 54.167 | 17.638 |
| 1.00-25% | 7.586 | 4.498 | 94.221 | 54.308 | 17.753 |
| 1.00-30% | 9.628 | 3.940 | 94.711 | 53.526 | 17.181 |
| 0.42-30% | 10.654 | 6.440 | 88.705 | 50.944 | 17.064 |
| 3.00-30% | 11.209 | 5.063 | 92.904 | 53.502 | 16.640 |
| 1.00-30% | 8.393 | 4.594 | 93.601 | 54.031 | 17.235 |
| 0.42-25% | 10.687 | 8.673 | 88.771 | 51.580 | 16.523 |
| 0.42-30% | 12.295 | 8.782 | 88.182 | 50.511 | 15.916 |
| 3.00-25% | 8.076 | 4.903 | 93.785 | 53.652 | 17.426 |
| 0.42-27% | 13.520 | 8.142 | 88.737 | 51.290 | 15.693 |
| 3.00-30% | 9.537 | 4.984 | 93.237 | 53.802 | 17.235 |
| 0.42-25% | 10.713 | 9.258 | 88.037 | 49.862 | 16.362 |
| 0.42-27% | 12.520 | 9.175 | 87.947 | 52.643 | 15.948 |
| 1.00-27% | 10.281 | 5.591 | 92.371 | 52.991 | 16.696 |
| 1.00-25% | 5.951 | 2.936 | 96.010 | 54.228 | 18.016 |
| 0.42-25% | 7.282 | 8.214 | 89.246 | 51.580 | 17.099 |
| 3.00-27% | 4.649 | 5.464 | 92.906 | 53.420 | 18.157 |
| 1.00-30% | 4.998 | 5.204 | 93.251 | 54.049 | 18.018 |
| 0.42-30% | 8.268 | 7.598 | 90.232 | 50.793 | 16.987 |
| 3.00-25% | 5.299 | 4.749 | 93.433 | 54.292 | 18.129 |
| 1.00-27% | 4.305 | 4.357 | 94.333 | 55.791 | 18.595 |
| 1.00-25% | 4.229 | 4.433 | 94.293 | 54.393 | 18.445 |

Nota: T.P: Tamaño de partícula; H.I: Humedad inicial; COT: Contenido de carbono total.

Tabla 8. Propiedades físicas de pellets de cascabillo de café

| T.P./H.I. | D (mm) | L (mm) | DI (g/cm ³) | DG (kg/m ³) | Durabilidad (%) | R (%) |
|-----------|-----------|-----------|----------------------------|----------------------------|--------------------|----------|
| 0.42-27% | 7.95 | 30.61 | 1.171 | 732.40 | 99.438 | 97.773 |
| 3.00-25% | 7.95 | 23.84 | 0.997 | 603.40 | 99.576 | 80.925 |
| 3.00-30% | 7.89 | 24.84 | 1.145 | 601.00 | 98.561 | 81.618 |
| 3.00-27% | 7.86 | 22.31 | 1.109 | 614.40 | 99.167 | 92.793 |
| 1.00-27% | 7.96 | 21.60 | 1.116 | 587.20 | 99.875 | 88.968 |
| 3.00-27% | 7.97 | 22.74 | 1.146 | 594.00 | 99.231 | 86.447 |
| 1.00-25% | 8.05 | 22.89 | 0.970 | 495.20 | 99.558 | 58.755 |
| 1.00-30% | 7.96 | 21.59 | 1.015 | 572.20 | 98.165 | 75.970 |
| 0.42-30% | 7.80 | 25.87 | 1.246 | 689.20 | 99.351 | 98.796 |
| 3.00-30% | 7.97 | 23.64 | 1.009 | 575.20 | 98.319 | 98.732 |
| 1.00-30% | 8.01 | 19.72 | 1.047 | 444.20 | 99.038 | 79.842 |
| 0.42-25% | 7.99 | 23.14 | 1.215 | 739.60 | 98.582 | 93.105 |
| 0.42-30% | 7.83 | 22.90 | 1.188 | 722.80 | 99.618 | 97.132 |
| 3.00-25% | 7.92 | 19.09 | 1.148 | 470.60 | 99.074 | 49.291 |
| 0.42-27% | 7.98 | 27.01 | 1.221 | 710.60 | 99.394 | 98.305 |
| 3.00-30% | 8.05 | 21.80 | 1.027 | 465.00 | 99.561 | 82.000 |
| 0.42-25% | 7.99 | 23.92 | 1.276 | 700.40 | 99.346 | 87.303 |
| 0.42-27% | 7.97 | 26.94 | 1.280 | 734.40 | 99.419 | 96.029 |
| 1.00-27% | 8.17 | 21.98 | 0.833 | 444.00 | 99.141 | 71.166 |
| 1.00-25% | 8.12 | 18.07 | 0.930 | 353.40 | 96.552 | 56.412 |
| 0.42-25% | 7.88 | 23.93 | 1.242 | 708.00 | 99.310 | 97.333 |
| 3.00-27% | 8.09 | 21.09 | 1.042 | 452.20 | 99.115 | 81.586 |
| 1.00-30% | 8.06 | 25.03 | 1.120 | 405.00 | 99.301 | 85.384 |
| 0.42-30% | 7.82 | 28.64 | 1.149 | 713.00 | 99.367 | 96.987 |
| 3.00-25% | 8.17 | 19.45 | 0.981 | 431.00 | 99.000 | 78.467 |
| 1.00-27% | 8.21 | 20.27 | 0.885 | 401.60 | 99.355 | 32.187 |
| 1.00-25% | 8.07 | 19.77 | 0.850 | 373.40 | 96.512 | 40.420 |

Nota: D: Diámetro; L: Longitud; DI: Densidad individual; DG: Densidad a granel; R: Rendimiento.

Tabla 9. Resultados promedios de la caracterización de pellets de cascabillo de café

| T.P./H.I. | Humedad (%) | Cenizas (%) | Sólidos volátiles (%) | COT (%) | Poder calorífico (MJ/kg) |
|-----------|-------------|-------------|-----------------------|------------|--------------------------|
| 0.42-25% | 9.56±1.97 | 8.71±0.52 | 88.68±0.61 | 51.01±0.99 | 16.66±0.39 |
| 0.42-27% | 11.44±2.79 | 8.59±0.53 | 88.67±0.70 | 51.39±1.21 | 16.25±0.76 |
| 0.42-30% | 10.41±2.03 | 7.61±1.17 | 89.04±1.07 | 50.75±0.22 | 16.66±0.64 |
| 1.00-25% | 5.92±1.68 | 3.96±0.88 | 94.84±1.01 | 54.31±0.08 | 18.07±0.35 |
| 1.00-27% | 6.96±3.04 | 5.03±0.62 | 93.35±0.98 | 53.94±1.61 | 17.67±0.95 |
| 1.00-30% | 7.67±2.40 | 4.58±0.63 | 93.85±0.76 | 53.87±0.30 | 17.48±0.47 |
| 3.00-25% | 6.54±1.41 | 4.93±0.20 | 93.42±0.37 | 53.86±0.38 | 17.86±0.38 |
| 3.00-27% | 6.03±1.20 | 5.12±0.30 | 93.42±0.46 | 53.66±0.44 | 17.89±0.26 |
| 3.00-30% | 9.06±2.43 | 4.92±0.18 | 93.09±0.17 | 53.20±0.79 | 17.24±0.60 |

Tabla 10. Propiedades físicas promedios de pellets de cascabillo de café

| T.P./H.I. | D (mm) | L (mm) | DI (g/cm ³) | DG (kg/m ³) | Durabilidad (%) | R (%) |
|-----------|-----------|------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|------------|
| 0.42-25% | 7.95±0.06 | 23.66±0.45 | 1.24±0.03 | 716.00±20.8 | 99.08±0.43 | 92.58±5.04 |
| 0.42-27% | 7.97±0.02 | 28.19±2.10 | 1.22±0.05 | 725.80±13.2 | 99.42±0.02 | 97.37±1.19 |
| 0.42-30% | 7.82±0.02 | 25.80±2.87 | 1.19±0.05 | 708.33±17.3 | 99.45±0.15 | 97.64±1.01 |
| 1.00-25% | 8.08±0.04 | 20.24±2.44 | 0.92±0.06 | 407.33±76.8 | 97.54±1.75 | 51.86±9.98 |
| 1.00-27% | 8.11±0.13 | 21.28±0.90 | 0.94±0.15 | 477.60±97.3 | 99.46±0.38 | 64.11±29.0 |
| 1.00-30% | 8.01±0.05 | 22.11±2.69 | 1.06±0.05 | 473.80±87.4 | 98.83±0.59 | 80.40±4.73 |
| 3.00-25% | 8.01±0.14 | 20.79±2.64 | 1.04±0.09 | 501.67±90.3 | 99.22±0.31 | 69.56±17.6 |
| 3.00-27% | 7.97±0.12 | 22.05±0.86 | 1.10±0.05 | 553.53±88.4 | 99.17±0.06 | 86.94±5.62 |
| 3.00-30% | 7.97±0.08 | 23.43±1.53 | 1.06±0.07 | 547.07±72.2 | 98.81±0.66 | 87.45±9.77 |

Nota: D: Diámetro; L: Longitud; DI: Densidad individual; DG: Densidad a granel; R: Rendimiento.

Ahora bien, enseguida se compararán cada una de las variables de respuesta contra el estándar ISO 17225-6; en la Tabla 11 se presentan los valores establecidos en la norma ISO 17225-6 para considerar a un biocombustible en la clase A, que indica una mejor calidad, o en la clase B, con sus respectivas unidades.

Tabla 11. Valores requeridos de la norma ISO 17225-6 (ISO, 2014)

| Parámetro | Unidad | A | B |
|-------------------|-------------------|---------|---------|
| Humedad | % | ≤12 | ≤15 |
| Cenizas | % | ≤6.0 | ≤10 |
| Poder calorífico | MJ/kg | ≥14.5 | ≥14.5 |
| Diámetro | mm | 6-10 | 6-10 |
| Longitud | mm | 3.15-40 | 3.15-40 |
| Densidad a granel | kg/m ³ | ≥600 | ≥600 |
| Durabilidad | % | ≥97.5 | ≥96.0 |

6.2.1.1 Análisis de los pellets con respecto a la humedad final

La primera variable analizada fue la humedad final de los pellets, ya que esta variable permite conocer el contenido energético que podría presentar el combustible. Para ello, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) con ayuda del programa Rstudio con el objetivo de determinar el efecto que presentan los dos factores en la variable de respuesta; además, dicho análisis ayuda a identificar la existencia de interacción entre el tamaño de partícula y la humedad inicial en la fabricación de pellets de cascabillo de café, y su efecto en la humedad final.

A continuación, la Tabla 12 muestra los resultados del análisis ANOVA:

Tabla 12. Análisis de varianza de la humedad final

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|----------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------|-----------------|
| Tamñ.Part | 2 | 71.47 | 35.73 | 7.496 | 0.00428* |
| Humed.Ini | 2 | 13.07 | 6.54 | 1.371 | 0.27907 |
| Tamñ.Part* Humed.Ini | 4 | 12.63 | 3.16 | 0.662 | 0.62620 |

Puede observarse que los dos factores de manera individual, correspondiente al tamaño de partícula y a la humedad inicial, son una fuente de variación; en la última fila se presenta a la interacción entre ambos factores. De la Tabla 12 se nota que el tamaño de partícula presenta un efecto significativo en la humedad final de los pellets, ya que el resultado obtenido en el p-valor está por debajo del 0.05; este valor, de acuerdo con los diferentes métodos estadísticos, considera que por lo menos una de las medias de los tratamientos no es igual. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, la cual planteaba que los tratamientos entre el tamaño de partícula y la humedad inicial tienen la misma media, lo que se interpretaba diciendo que, las diferentes combinaciones entre el tamaño de partícula y la humedad inicial producen la misma humedad final. Posteriormente, se realizó la prueba de Tukey para determinar el nivel del tamaño de partícula que presentaba las diferencias significativas, así como su efecto en la humedad final.

Tabla 13. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para la humedad final de los pellets de cascabillo de café

| Tamñ. Part. | Grupo | Media | Humed. Ini. | Grupo | Media |
|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 0.42 mm | A | 10.47 | 25%H | A | 7.34 |
| 1.00 mm | B | 6.85 | 27%H | A | 8.14 |
| 3.00 mm | B | 7.21 | 30%H | A | 9.05 |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Método de Tukey y una confianza del 95 %.

En la Tabla 13 se advierte que el tamaño de partícula de 0.42 mm no comparte medias semejantes con los otros dos niveles del factor, ya que tiene una diferencia entre la media más pequeña (6.85 %) al valor de su media (10.47 %) de 3.62 %; por otro parte, de la Tabla 7 se observa que con el tamaño de partícula de 0.42 mm, con las diferentes combinaciones de humedad inicial, se tienen los mayores valores de humedad final; el tratamiento de 0.42 mm-27%H, experimento número quince, presentó el valor más grande de humedad de 13.52 % de los veintisiete experimentos realizados, pero por debajo del límite (15 %) que permite la norma. Considerando el análisis de varianza y la prueba de Tukey se concluye que la

humedad inicial no tiene un efecto en la humedad final de los pellets; lo anterior ya que al utilizar cualquiera de los tres niveles de humedad inicial, éstos presentan valores de humedad final muy parecidos entre sí. No obstante, el tamaño de partícula tiene un efecto significativo en la variable de respuesta, por lo cual se analizó visualmente.

A continuación, la Figura 28 muestra el efecto sobre la humedad final de los pellets con una gráfica de interacción entre los dos factores.

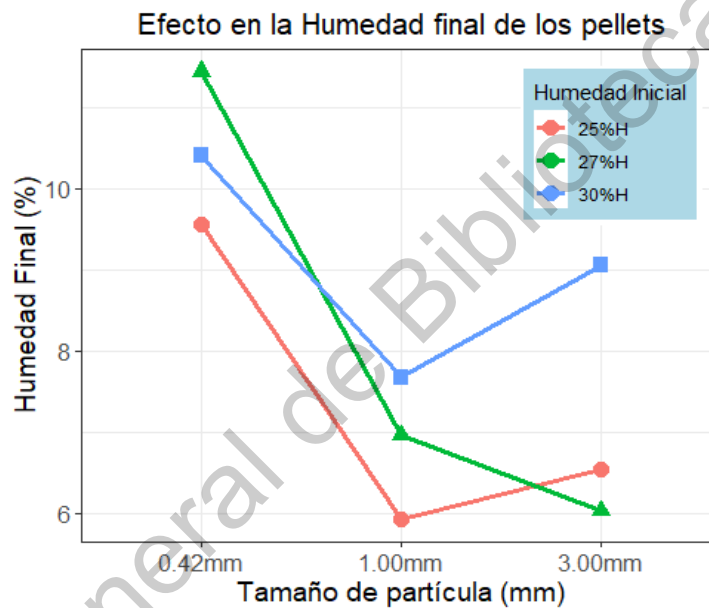


Figura 28. Gráfico de interacción entre factores para la humedad final

De la Figura 28 se nota que los mayores valores de humedad final en los pellets se presentan con el tamaño de partícula de 0.42 mm; pero, todavía cumpliendo el límite permitido por la norma de 15 % de humedad; por otro lado, al cambiar de un tamaño de partícula 0.42 mm a 1.00 mm la humedad final disminuye, y luego ésta vuelve a incrementarse en 1 % si se cambia de un tamaño de 1.00 mm a 3.00 mm para los valores de humedad inicial de 25 % y 30 %; los menores valores de humedad final se presentan con un tamaño de partícula de 1.00 mm y cualquier porcentaje de humedad inicial. De acuerdo con Serrano et al. (2011), los pellets de paja de cebada tienen una mayor longitud y durabilidad, así como una menor densidad individual cuando el contenido de humedad del pellet varía del 6 al 8 %.

Por otro lado, Said et al. (2015) densificaron paja de arroz utilizando una peletizadora de matriz plana (50 kg/h); ellos reportaron que los pellets eran más durables y con menor densidad, tanto individual como a granel, cuando el contenido de humedad de los pellets variaba del 10 al 17 %.

En el proceso de peletización, una parte importante de la humedad inicial de la materia prima se evapora debido a la alta temperatura que provoca la fricción entre la matriz plana y los rodillos, por lo cual los pellets fabricados deben tener una humedad menor a la de la biomasa (Miranda et al., 2018b). Los valores promedio de los pellets para los diferentes tamaños de partícula y porcentajes de humedad inicial fueron de 10.47 % para 0.42 mm, 6.85 % para 1.00 mm y 7.21 % para 3.00 mm; por lo que, los pellets resultantes exhibieron valores de humedad menores al 12 %, siendo el valor máximo permitido en la norma de 15 %. Los pellets de cascabillo de café presentaron valores de humedad final menores a los reportados para pellets elaborados a partir de carbón marrón (lignito) y salvado de arroz (8:2) con 41.5 % (Tsuchiya y Yoshida, 2017), aserrín de pino con 13.0 % (García et al., 2018), así como de residuos lignocelulósicos de camomila con 12.8 %, y aserrín de abedul con 12.27 % (Zawislak et al., 2020).

El poder calorífico útil de un pellet, así como su combustión, dependen del valor de humedad (Zamorano et al., 2011). Cuando los pellets poseen elevados contenidos de humedad presentan fenómenos de descomposición temprana, así como pérdidas de materia seca durante el almacenamiento y el transporte (Tumuluru et al., 2011; Graham et al., 2017); por ello, un pellet de buena calidad tiene un contenido de humedad que varía del 6 % al 12 %. Si el contenido de humedad de un pellet se encuentra fuera del rango previamente mencionado, su durabilidad y rendimiento energético serían deficientes (Li y Liu, 2000; Nielsen et al. 2009; Fei-Ling et al., 2020).

6.2.1.2 Análisis de los pellets con respecto a las cenizas

El contenido de cenizas en los pellets es una variable destacada que permite contar con una evaluación preliminar de la calidad de los pellets (Toscano et al., 2013). Un elevado contenido de cenizas en los pellets reduce el poder calorífico y crea problemas como la formación de clinker, la sinterización y las emisiones de polvo cuando son quemados en los hornos (Oberberger et al., 2004). La norma ISO 17225-6 establece un límite máximo de cenizas del 6.0 % para los pellets de biomasa de la clase A, y de 10.0 % para la clase B (ISO, 2014). A continuación, la Tabla 14 muestra el análisis ANOVA realizado para las cenizas producidas por los pellets de cascabillo de café.

Tabla 14. Análisis de varianza de las cenizas

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|----------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------|-----------------|
| Tamñ.Part | 2 | 76.54 | 38.27 | 94.261 | 2.9e-10* |
| Humed.Ini | 2 | 1.40 | 0.70 | 1.723 | 0.207 |
| Tamñ.Part* Humed.Ini | 4 | 2.63 | 0.66 | 1.620 | 0.212 |

En la Tabla 14 se nota que el tamaño de partícula presenta un efecto significativo en las cenizas; por lo tanto, se espera que al menos una media entre los diferentes tratamientos sea diferente. Este hallazgo se confirma con la Tabla 15, que muestra la comparación de medias para la prueba de Tukey; al comparar los resultados entre los tres diferentes tamaños de partícula, el tamaño de 0.42 mm presentó los valores más grandes (8.31 % promedio), mientras que los tamaños de 1.00 mm y 3.00 mm presentaron valores cercanos al 5.0 % promedio de cenizas.

Tabla 15. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para las cenizas de los pellets de cascabillo de café

| Tamñ. Part. | Grupo | Media | Humed. Ini. | Grupo | Media |
|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 0.42 mm | A | 8.31 | 25%H | A | 5.87 |
| 1.00 mm | B | 4.52 | 27%H | A | 6.25 |
| 3.00 mm | B | 4.99 | 30%H | A | 5.70 |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Método de Tukey y una confianza del 95 %.

De la prueba de Tukey se observa que la humedad inicial no presenta significancia, ya que los valores de sus medias para los tres niveles son muy cercanos entre sí. El contenido de ceniza de los pellets producidos con un tamaño de 0.42 mm es mayor al establecido para la clase A, pero está dentro del límite permitido para un pellet de clase B (10 %); por otro lado, en los pellets obtenidos con tamaños de 1.00 y 3.00 mm el contenido de cenizas es menor al 6.0 %, considerándolos pellets de clase A. En la Figura 29 se observa que el menor contenido de cenizas (3.96 %) en los pellets se obtiene con una humedad inicial de 25 % y un tamaño de 1.00 mm; mientras que, sin importar la humedad inicial, en los pellets elaborados con el tamaño de 0.42 mm tienen entre un 7 y 8.5 % de cenizas.

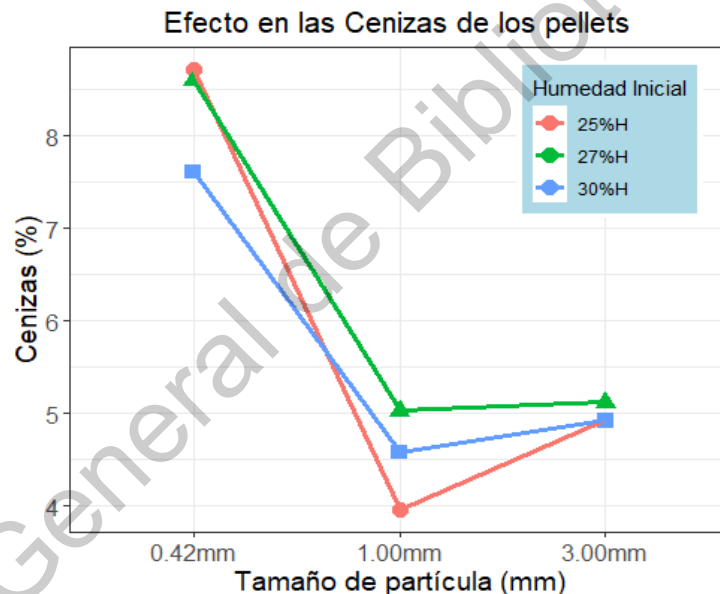


Figura 29 Gráfico de interacción entre factores para las cenizas

En todos los casos se cumple con lo establecido por la norma ISO; adicionalmente, los resultados son menores en comparación con otras biomásas como los residuos de microalga *Scenedesmus* con 18.02 % (Miranda et al., 2018a) y la cascarilla de arroz y paja de trigo (50:50) con 11.50 % y (75:25) con 14.09 % (Ríos-Badrán et al., 2020). Cabe mencionar que es deseable que los pellets presenten un contenido bajo de cenizas, ya que esto implica un menor costo por limpieza en los hornos y calderas donde se queme el pellet.

6.2.1.3 Análisis de los pellets con respecto a los sólidos volátiles

Los sólidos volátiles, aunque no se encuentran estandarizados en la norma ISO 17225-6, son importantes, ya que dan un resultado indirecto de la capacidad de combustión de la materia; es decir, a mayor cantidad de sólidos volátiles, mayor cantidad de materia combustible. Así, el cascabillo de café, tanto en su estado original como densificado, contiene una elevada cantidad de materia combustible, como se observa en las Tablas 6 y 7. En la Tabla 16 se aprecia que el tamaño de partícula tiene un efecto significativo en la materia volátil; en contraparte, la humedad inicial de la biomasa no influye de manera significativa.

Tabla 16. Análisis de varianza de los sólidos volátiles

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|----------------------|--------------------|-------------------|------------------|---------|-----------|
| Tamñ.Part | 2 | 144.20 | 72.10 | 131.552 | 1.81e-11* |
| Humed.Ini | 2 | 1.16 | 0.58 | 1.054 | 0.369 |
| Tamñ.Part* Humed.Ini | 4 | 2.79 | 0.70 | 1.271 | 0.318 |

Por otro lado, con los resultados de la Tabla 17 se puede cotejar lo analizado con la Tabla 16 (ANOVA), donde el tamaño de 0.42 mm presenta significancia estadística, ya que es la que muestra una media menor (88.80 %) comparada con los otros dos niveles del factor (93.31 y 94.01 %). Por otra parte, los tres niveles de humedad inicial no presentan significancia, ya que comparten una media prácticamente igual.

Tabla 17. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para los sólidos volátiles de los pellets de cascabillo de café

| Tamñ. Part. | Grupo | Media | Humed. Ini. | Grupo | Media |
|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 0.42 mm | A | 88.80 | 25%H | A | 92.31 |
| 1.00 mm | B | 94.01 | 27%H | A | 91.81 |
| 3.00 mm | B | 93.31 | 30%H | A | 91.99 |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Método de Tukey y una confianza del 95 %.

Ahora se deben analizar visualmente los cambios que ocurren al utilizar diferentes tamaños de partícula, y como éstos afectan el contenido de los sólidos volátiles de los pellets. De la Figura 30 se puede observar que con un tamaño de 0.42 mm, los sólidos volátiles se encuentran por debajo del 90 %; mientras que al utilizar un tamaño de 1.00 mm éstos llegan hasta un valor de 95 % con una humedad inicial de 25 %. Por otro lado, al cambiar de tamaño de 1.00 mm a 3.00 mm, los sólidos volátiles se reducen entre un 1 y 2 % con humedades de 25 y 30 %; mientras que al utilizar una humedad de 27 % se mantienen sin cambio significativo, ya sea utilizando un tamaño de 1.00 mm o 3.00 mm.

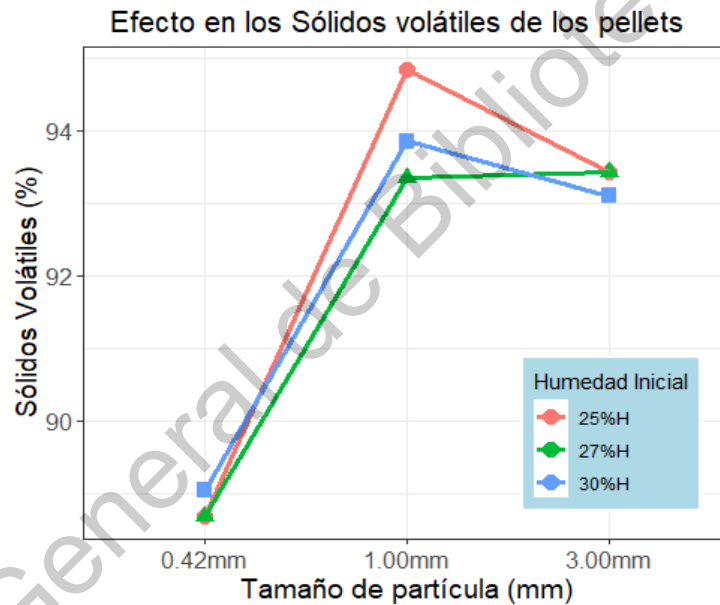


Figura 30. Gráfico de interacción entre factores para los sólidos volátiles

Comparando la gráfica de sólidos volátiles (Figura 30) con la de humedad final (Figura 28) se nota los sólidos volátiles disminuyen a medida que es mayor la humedad final del pellet, lo cual afecta la combustión del pellet. De acuerdo con Ibeto et al. (2016), la biomasa con un alto contenido de materia volátil la convierte en un combustible altamente reactivo y le da una velocidad de combustión más rápida. Los pellets de cascabillo de café poseen valores que rondan desde el 88 al 95 % promedio; en otros estudios, se reportan valores para otras biomásas tales como tronco de *cocos nucifera* con 70.23 % (Acda, 2015), paja de trigo con 70.8 %,

paja de trigo torrefactada con 70.2 % (Azócar et al., 2019), y cáscaras de canola con 70.4 % (Azargohar et al., 2019). Por ello, puede afirmarse que los pellets de cascabillo de café se quemarán rápidamente. Además, Pegoretti-Leite de Souza et al. (2020) mencionan que la materia volátil se considera favorable e importante en este tipo de combustible porque ayudan a la ignición de los pellets; ya que en el proceso de combustión se liberan los gases CO, CO₂, CH₄ y H₂, lo cual simplifica la ignición de éste.

6.2.1.4 Análisis de los pellets con respecto al carbono total (COT)

El carbono, al igual que la materia volátil, no se encuentra estandarizada en la norma ISO 17225-6; sin embargo, el contenido de carbono total (COT) es una variable importante dado que es un indicador de ignición; es decir, el COT se relaciona con la reactividad de la materia orgánica, lo cual implica que puede tenerse un alto poder calorífico. La Tabla 18 del análisis ANOVA para el contenido de carbono total muestra que el tamaño de partícula presenta un efecto en la variable de respuesta.

Tabla 18. Análisis de varianza del COT

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------|------------------|
| Tamñ.Part | 2 | 46.57 | 23.285 | 34.209 | 7.38e-07* |
| Humed.Ini | 2 | 1.07 | 0.537 | 0.789 | 0.469 |
| Tamñ.Part* Humed.Ini | 4 | 0.56 | 0.141 | 0.207 | 0.931 |

Analizando la Tabla 19 se nota que los pellets elaborados con partículas de tamaño de 0.42 mm no comparten media entre tratamientos, teniendo un valor menor en un 2.5 y 3.0 % respecto a los otros dos niveles del factor; por otro lado, la humedad inicial no tiene significancia para el carbono total de los pellets de cascabillo de café. Por ello, se puede utilizar cualquiera de los tres niveles del factor, y se obtendrían valores parecidos a los de esta investigación. Cabe añadir que el contenido de carbono depende tanto del tipo de biomasa como de la proporción que pueda densificarse de ésta (Montero et al., 2013).

Tabla 19. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para el COT de los pellets de cascabillo de café

| Tamñ. Part. | Grupo | Media | Humed. Ini. | Grupo | Media |
|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 0.42 mm | A | 51.05 | 25%H | A | 53.06 |
| 1.00 mm | B | 54.04 | 27%H | A | 52.99 |
| 3.0 mm | B | 53.57 | 30%H | A | 52.61 |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Método de Tukey y una confianza del 95 %.

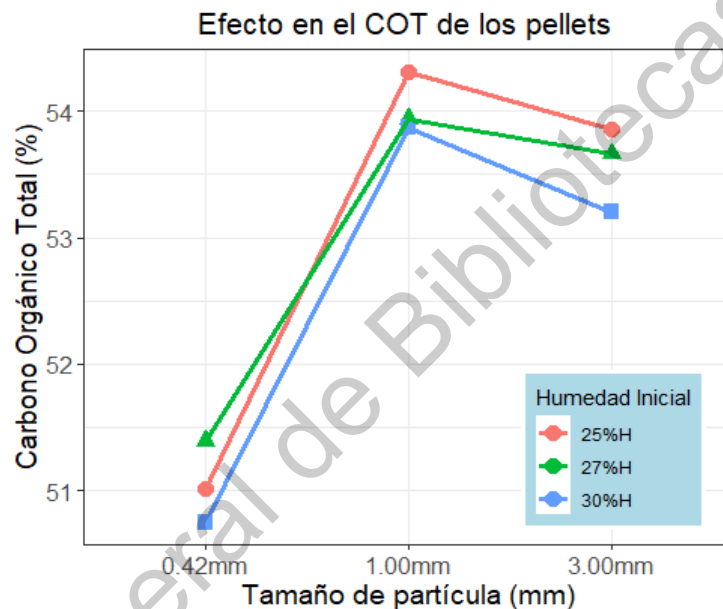


Figura 31. Gráfico de interacción entre factores para el carbono total

De la Figura 31 se nota una tendencia similar a la gráfica de sólidos volátiles (Figura 30). En la Figura 31 se tienen valores de contenido de carbono de 51 % en promedio para pellets producidos con partículas de tamaño de 0.42 mm, mientras que al cambiar de tamaño a 1.00 mm se incrementa en un 3 % el contenido de carbono total; este último alcanza hasta un 54 % promedio, mientras que al utilizar partículas de tamaño de 3.00 mm este se reduce ligeramente hasta un valor de 53.5 % en promedio. Por lo que los sólidos volátiles y el carbono total se ven influenciados por la humedad final que tenga el pellet, entre mayor sea la humedad, estos dos valores se irán reduciendo; por lo que afectan la combustión y reducen la ignición al momento de quemar los pellets de cascabillo de café.

Es importante destacar que el contenido de carbono final de los pellets, en promedio, varió entre un 51 y 54 %, lo cual supera el contenido de carbono de pellets de bambú (49.71 %) (Liu et al., 2016), desechos de jardín con 40.0 % (Pradhan et al., 2018a), cascarilla de arroz y paja de trigo con 35.81 % (Ríos-Badran et al., 2020). Un alto contenido de carbono contribuye a tener un mayor poder calorífico, al contar con una cantidad mayor de carbono que las anteriores biomásas.

6.2.1.5 Análisis de los pellets con respecto al poder calorífico (HHV)

El poder calorífico es la propiedad más importante de un combustible, y por ello se emplea para el diseño y el control de una cámara de combustión del biocombustible (Erol et al., 2010). Como expresa la norma ISO 18125 (Solid biofuels-Determination of calorific value) se tienen como variables el poder calorífico superior (HHV, high heating value por sus siglas en inglés), e inferior (LHV, low heating value por sus siglas en inglés) (ISO, 2017). El HHV, o también llamado poder calorífico bruto (GHV), es el calor liberado por la combustión completa de una unidad de volumen de combustible, que genera vapor de agua incluyendo su eventual condensación. Por otra parte, el LHV, o poder calorífico neto (NHV), no contempla el calor latente del agua que contienen los biocombustibles (Erol et al., 2010; ISO, 2017). La norma ISO 17225-6 para la evaluación de los pellets toma como parámetro al poder calorífico inferior (neto o útil). En la literatura, como en la presente investigación, usualmente se reporta el HHV; este parámetro si bien no es el que especifica la norma, sí permite tener una referencia sobre el poder calorífico de los pellets de cascabillo de café.

De manera análoga a la discusión previa, primero se realiza el análisis ANOVA; para ello, en la Tabla 20 se observa que el tamaño de partícula tiene un efecto significativo en el poder calorífico. Se espera observar este efecto en los pellets con tamaño de 0.42 mm, los cuales han presentado una significancia en los resultados de las pruebas realizadas. Es importante recordar que entre mayor sea el contenido de humedad final de los pellets, menor será el poder calorífico; ya que

reduce su potencial energético y presenta una menor liberación de energía cuando se combustiona.

Tabla 20. Análisis de varianza del poder calorífico

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------|------------------|
| Tamñ.Part | 2 | 8.374 | 4.187 | 12.766 | 0.000353* |
| Humed.Ini | 2 | 0.766 | 0.383 | 1.168 | 0.333384 |
| Tamñ.Part* Humed.Ini | 4 | 0.938 | 0.234 | 0.715 | 0.592685 |

La Tabla 21 confirma lo antes mencionado, ya que la prueba de Tukey arroja que el tamaño de 0.42 mm presenta la media diferente entre los tres niveles estudiados; por otra parte, se observa que la humedad inicial no presenta un efecto en el poder calorífico de los pellets, y de hecho se obtienen valores similares, y con un 25 % de humedad inicial se presentan valores elevados del poder calorífico (17.53 MJ/kg en promedio).

Tabla 21. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para el poder calorífico de los pellets de cascabillo de café

| Tamñ. Part. | Grupo | Media | Humed. Ini. | Grupo | Media |
|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 0.42 mm | A | 16.52 | 25%H | A | 17.53 |
| 1.00 mm | B | 17.74 | 27%H | A | 17.27 |
| 3.00 mm | B | 17.67 | 30%H | A | 17.12 |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Método de Tukey y una confianza del 95 %.

De acuerdo con Wang et al. (2018), el pellet más adecuado para su comercialización es el que tiene la combinación ideal de resistencia a los choques mecánicos y alto poder calorífico. Según la norma nacional China (Clasificación de la calidad del carbón. Parte 3: poder calorífico), el HHV y el LHV de los carbones de rango bajo son inferiores a 16.30 MJ/kg y 12.51 MJ/kg, respectivamente; teniendo esto en cuenta, los pellets de cascabillo de café serían competitivos en este aspecto.

A continuación, la Figura 32 presenta el efecto que ocurre en el poder calorífico de los pellets con una gráfica de interacción entre los dos factores.

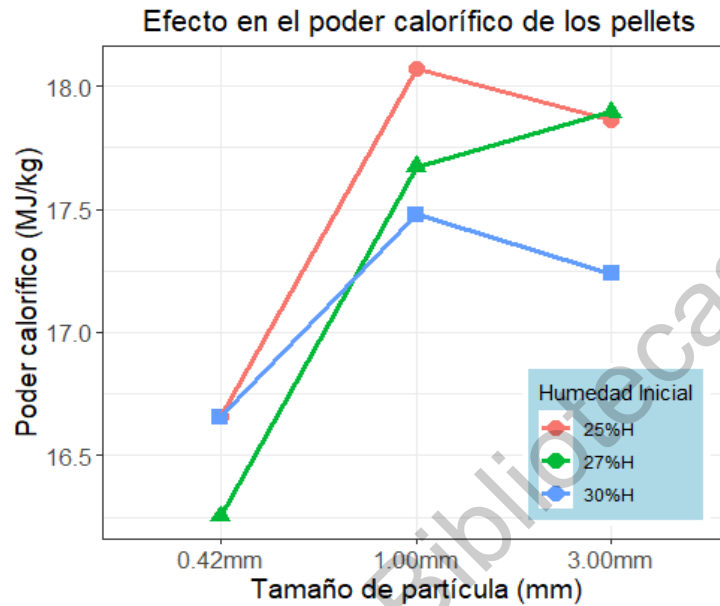


Figura 32. Gráfico de interacción entre factores para el poder calorífico

El porcentaje de humedad influye directamente en el poder calorífico, ya que se observan menores valores de éste cuando los pellets tienen un contenido elevado de humedad final (Figura 28). Observando la Figura 32 se nota que un comportamiento opuesto al observado en la gráfica de humedad final de los pellets, ya que al tener un elevado contenido de humedad para los tamaños de 0.42 mm, el poder calorífico es menor comparado con el tamaño de 1.00 mm que presentó valores menores de humedad, llegando a tener un alto contenido energético (18.00 MJ/kg).

La obtención de pellets que exhiban un alto poder calorífico implica que se liberará más energía con una menor cantidad de biocombustibles (densidad energética), la cual es una de las mayores bondades de la densificación. Sin embargo, es importante considerar que el poder calorífico también depende del contenido de cenizas y la humedad de la biomasa. Respecto al contenido de cenizas, algunos procesos termoquímicos reducen el poder calorífico debido a que

requieren mayor energía para lograr descomponer a los compuestos inorgánicos que las integran (Munawar y Subiyanto, 2014; Ishii y Furuichi, 2014).

Si se compara el poder calorífico de otros pellets se nota que los pellets de cascabillo de café presentan un poder calorífico superior (HHV) alrededor de 16.5 y 17.5 MJ/kg; este valor es superior al reportado para los pellets de cascarilla de arroz (13.90 MJ/kg), hidrochar de cascarilla de arroz (15.08 MJ/kg), y de aserrín de madera de pino (16.13 MJ/kg) (Liu et al., 2014). Por ello se considera que los pellets producidos a partir del cascabillo de café son competitivos con los pellets de carbón marrón (lignito) y salvado de arroz (5:5) con 15.0 MJ/kg, (2:8) con 17.0 MJ/kg (Tsuchiya y Yoshida, 2017), hojas de palma aceitera con 17.68 MJ/kg (Wattana et al., 2017), residuos de microalga *Scenedesmus* con 17.98 MJ/kg (Miranda et al., 2018a), desechos de jardín con 16.8 MJ/kg (Pradhan et al., 2018a), cáscaras de canola (16.73 MJ/kg) (Azargothar et al., 2019), y residuos lignocelulósicos (17.52 MJ/kg promedio) (Zawislak et al., 2020). De hecho, si se realizan mezclas con otras biomásas o bien se agrega un aditivo pueden mejorarse las propiedades tanto energéticas como químicas de los pellets de cascabillo de café.

6.2.1.6 Análisis de los pellets con respecto al diámetro

Respecto del análisis de las propiedades físicas de los pellets, se inició con el diámetro; ahora bien, se consideran los mejores diámetros aquellos que se acerquen a los 8.0 mm, el cual es el diámetro de perforado de la matriz de formación, ya que esto implica que existe menos expansión de los pellets. Por otra parte, de acuerdo con la norma se puede tener una tolerancia de ± 1 mm. A continuación, la Tabla 22 muestra el análisis de efectos para el diámetro.

Tabla 22. Análisis de varianza del diámetro

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------|-----------------|
| Tamñ.Part | 2 | 0.10901 | 0.05450 | 7.593 | 0.00406* |
| Humed.Ini | 2 | 0.04281 | 0.02140 | 2.982 | 0.07611 |
| Tamñ.Part* Humed.Ini | 4 | 0.01873 | 0.00468 | 0.652 | 0.63276 |

De la Tabla 22 se aprecia que el tamaño de partícula provoca un efecto en el tamaño del diámetro; pero, en este caso la humedad inicial está ligeramente cercana al p-valor de 0.05, lo cual podría implicar que también puede presentar un efecto de significancia, y cambiar el tamaño de los diámetros de los pellets. Por otro lado, en la Tabla 23, que concentra la media de los tratamientos, se nota que los pellets con partículas de tamaño de 3.00 mm son similares en la media a aquellos de los tamaños de 0.42 y 1.00 mm. Se observa que el tamaño de los diámetros se encuentra entre los 7.91 y 8.07 mm, lo cual cumple con el requerimiento de la norma ISO.

Por otra parte, partículas de tamaños grandes podrían incrementar el diámetro final del pellet dado que éste contiene una mayor cantidad de materia; lo anterior, en conjunto con una mayor humedad ocasionaría que el pellet, una vez enfriado, no recupere el diámetro con el que fue elaborado dentro de la matriz de formado.

Tabla 23. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para el diámetro de los pellets de cascabillo de café

| Tamñ. Part. | Grupo | Media | Humed. Ini. | Grupo | Media |
|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 0.42 mm | A | 7.91 | 25%H | A | 8.02 |
| 1.00 mm | B | 8.07 | 27%H | A | 8.02 |
| 3.00 mm | AB | 7.99 | 30%H | A | 7.93 |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Método de Tukey y una confianza del 95 %.

Por otro lado, el diámetro se relaciona con la densidad a granel; de acuerdo con Miranda et al. (2018a), diámetros pequeños indican la disminución del volumen de un producto como consecuencia de la peletización, y, por tanto, esto incrementa la densidad a granel. Por lo general, las densidades a granel más bajas implican diámetros mayores.

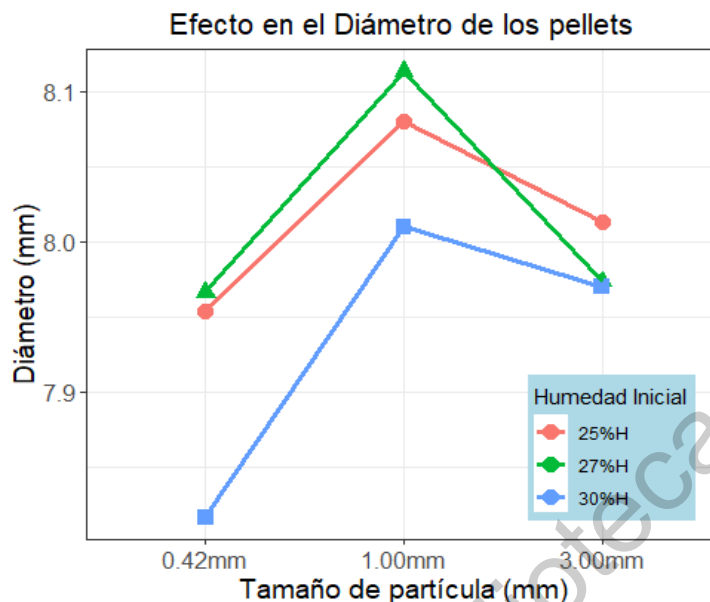


Figura 33. Gráfico de interacción entre factores para el diámetro

De acuerdo con la Figura 33, un diámetro apropiado se podría conseguir con partículas de tamaño de 0.42 mm y humedades entre el 25 y 27 %; esto ayudaría a no aumentar el volumen y que se reduzca la densidad a granel de los pellets.

6.2.1.7 Análisis de los pellets con respecto a la longitud

La Tabla 24 muestra que, para el caso de la longitud, tanto el tamaño de partícula como la humedad inicial afectan las dimensiones de los pellets.

Tabla 24. Análisis de varianza de la longitud

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------|------------------|
| Tamñ.Part | 2 | 110.98 | 55.49 | 13.512 | 0.000261* |
| Humed.Ini | 2 | 30.21 | 15.11 | 3.678 | 0.045776* |
| Tamñ.Part* Humed.Ini | 4 | 16.19 | 4.05 | 0.985 | 0.440334 |

Así como la matriz de formación tiene como medida 8 mm de diámetro de perforación, para la longitud ésta es de 30 mm; en la Tabla 25 se observa que la mayor longitud se obtiene con partículas de tamaño de 0.42 mm y una humedad inicial del 27 %, mientras que para tamaños más grandes de partícula la longitud se ve reducida. Otro fenómeno relacionado es la recuperación elástica de las

partículas, lo cual ocasiona que los pellets tengan poca resistencia y se fracturen, lo cual reduce su longitud (Liu et al., 2014). Sin embargo, las longitudes se mantuvieron oscilaron en un intervalo de 21.0 mm a 28.0 mm, lo cual satisface los valores permitidos en la norma ISO 17225-6.

Tabla 25. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para la longitud de los pellets de cascabillo de café

| Tamñ. Part. | Grupo | Media | Humed. Ini. | Grupo | Media |
|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 0.42 mm | A | 25.88 | 25%H | A | 21.57 |
| 1.00 mm | B | 21.21 | 27%H | A | 23.84 |
| 3.00 mm | B | 22.09 | 30%H | A | 23.78 |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Método de Tukey y una confianza del 95 %.

De acuerdo con Pradhan et al. (2018a) esto se debe a que el exceso de humedad inhibe la aglomeración de las partículas grandes, y reduce la longitud de los pellets. En la Figura 34 se observa que con partículas de tamaño de 0.42 mm y una humedad inicial del 27 % se obtienen pellets con una longitud de hasta 28.0 mm en promedio; mientras que las menores longitudes se obtienen con un tamaño de 1.00 mm y 25 % de humedad inicial, alcanzando alrededor de 20.2 mm como media.

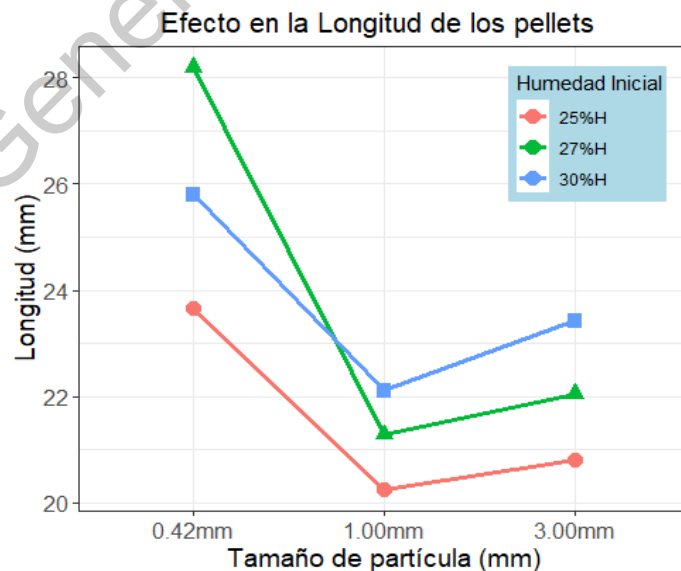


Figura 34. Gráfico de interacción entre factores para la longitud

6.2.1.8 Análisis de los pellets con respecto a la densidad individual

La densidad del pellet (a menudo llamada densidad unitaria o densidad de partículas) es la relación entre la masa del pellet y su volumen (Pradhan et al., 2018a). De acuerdo con Emadi et al. (2017), el rango estándar aceptado de la densidad de un pellet es de 1.0-1.4 g/cm³. El análisis ANOVA para la densidad individual, Tabla 26, revela que el tamaño de partícula presenta el efecto de significancia en los pellets obtenidos.

Tabla 26. Análisis de varianza de la densidad individual

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------|------------------|
| Tamñ.Part | 2 | 0.27999 | 0.14000 | 24.107 | 8.11e-06* |
| Humed.Ini | 2 | 0.00626 | 0.00313 | 0.539 | 0.592 |
| Tamñ.Part* Humed.Ini | 4 | 0.03735 | 0.00934 | 1.608 | 0.216 |

De la Tabla 27 se nota que las medias de las densidades del factor tamaño de partícula no son iguales, los tres niveles son diferentes entre sí; la mayor densidad (hasta 1.22 g/cm³) se obtiene con partículas de tamaño de 0.42 mm, mientras que para tamaños de 1.00 mm se obtienen densidades de 0.97 g/cm³, las cuales son menores a las aceptadas para un pellet de buena calidad. La humedad inicial no afecta la densidad individual de los pellets, ya que la media entre los tres niveles es prácticamente la misma; por lo cual se puede utilizar cualquiera de los porcentajes de humedad inicial para obtener valores cercanos a los de este caso de estudio.

Tabla 27. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para la densidad individual de los pellets de cascabillo de café

| Tamñ. Part. | Grupo | Media | Humed. Ini. | Grupo | Media |
|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 0.42 mm | A | 1.22 | 25%H | A | 1.07 |
| 1.00 mm | B | 0.97 | 27%H | A | 1.09 |
| 3.00 mm | C | 1.08 | 30%H | A | 1.10 |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Método de Tukey y una confianza del 95 %.

En cuanto al efecto del tamaño de partícula, los pellets de alta densidad se producen a partir de materiales finos debido al llenado de los espacios vacíos por partículas pequeñas y a la mayor superficie resultante de los materiales finamente molidos (Carone et al., 2011; Jiang et al., 2014). Así, la absorción de calor y humedad se facilita debido a la gran superficie resultante, que a su vez activa las propiedades de unión de los componentes químicos (Mostafa et al., 2019). Se ha comprobado que la densidad de los pellets de biomásas molidas es mayor que la de las partículas grandes picadas (Bergström et al., 2008). De acuerdo con lo anterior, para obtener una densidad individual mayor en los pellets de cascabillo de café se tendrían que utilizar tamaños pequeños de partículas, para una mejor aglomeración durante la producción. En la Figura 35 se observa este fenómeno, ya que las más altas densidades se obtienen con un tamaño de 0.42 mm, y cualquier porcentaje de humedad inicial, llegando a tener valores entre 1.2 y 1.25 g/cm³. Por otro lado, al cambiar a un tamaño de 1.00 mm la densidad se ve reducida hasta un valor de 0.92 g/cm³, mientras que para pellets elaborados con partículas de tamaño de 3.00 mm se obtienen densidades en promedio de 1.05 y 1.0 g/cm³.

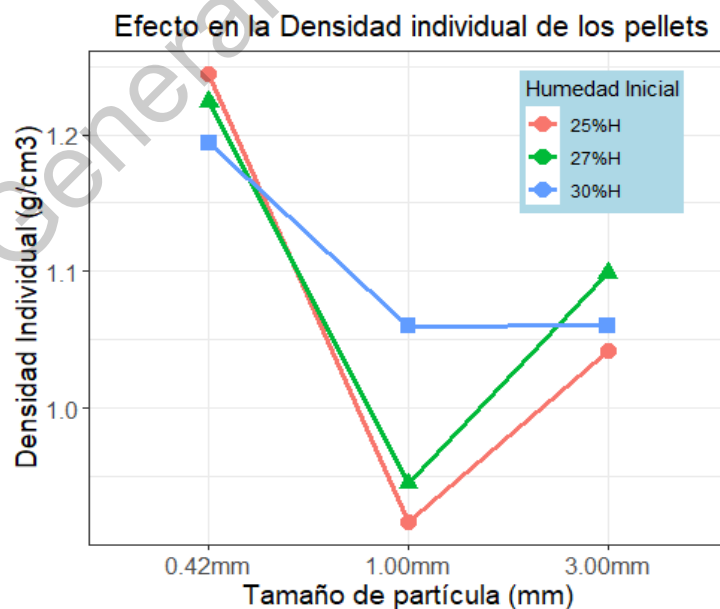


Figura 35. Gráfico de interacción entre factores para la densidad individual

6.2.1.9 Análisis de los pellets con respecto a la densidad a granel

La densidad a granel mide el grado de compactación de las partículas en el pellet, y se define como el peso de los pellets por unidad de volumen (kg/m^3). El valor de la densidad a granel afecta de manera significativa la densidad energética y, por tanto, sobre los costos de transporte y la capacidad de almacenamiento tanto para el productor de pellets como para el usuario final (García et al., 2019). A continuación, la Tabla 28 presenta el análisis de efectos mediante la prueba ANOVA.

Tabla 28. Análisis de varianza de la densidad a granel

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|----------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------|------------------|
| Tamñ.Part | 2 | 328593 | 164297 | 32.803 | 9.94e-07* |
| Humed.Ini | 2 | 9678 | 4839 | 0.966 | 0.399 |
| Tamñ.Part* Humed.Ini | 4 | 4945 | 1236 | 0.247 | 0.908 |

De la Tabla 28 se nota que el tamaño de las partículas influye de manera significativa en la densidad a granel; esto se relaciona con la densidad individual, ya que en general, la densidad a granel de los pellets está influenciada principalmente por la densidad de los pellets (es decir, la densidad de partículas) y la porosidad de la masa (Oberberger y Thek, 2010), lo cual a su vez está influenciada por la longitud de los pellets. El valor de referencia para la norma ISO 17225-6 para una buena densidad a granel es de mayor o igual a 600.0 kg/m^3 ; de acuerdo con la Tabla 29 para la prueba de Tukey, de las medias de los niveles usados la única que se encuentra por arriba de ese valor es la del tamaño de 0.42 mm.

Tabla 29. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para la densidad a granel de los pellets de cascabillo de café

| Tamñ. Part. | Grupo | Media | Humed. Ini. | Grupo | Media |
|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 0.42 mm | A | 716.7 | 25%H | A | 541.7 |
| 1.00 mm | B | 452.9 | 27%H | A | 585.6 |
| 3.00 mm | B | 534.1 | 30%H | A | 576.4 |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Método de Tukey y una confianza del 95 %.

Por otro lado, la densidad para los tamaños de 1.00 y 3.00 mm se encuentra por debajo del valor mínimo establecido en la norma ISO; mientras que la humedad inicial no tiene un efecto de significancia, pero se observa que con una humedad del 27 % de humedad se podría obtener una densidad a granel competitiva. Además, otros parámetros como las características superficiales de los pellets y la proporción de finos pueden influir en la densidad a granel (Wohler et al. 2017). Así, la variación medida en la densidad a granel para los tres niveles de tamaño de partícula de este estudio puede atribuirse principalmente a la longitud del pellet; debido a que las longitudes son diferentes, afectando de esta manera la densidad individual de igual forma. En la Figura 36 se puede observar este fenómeno de disminución de la densidad a granel, ya que al emplear un tamaño de 1.00 mm se reduce en 45 % la densidad de los pellets.

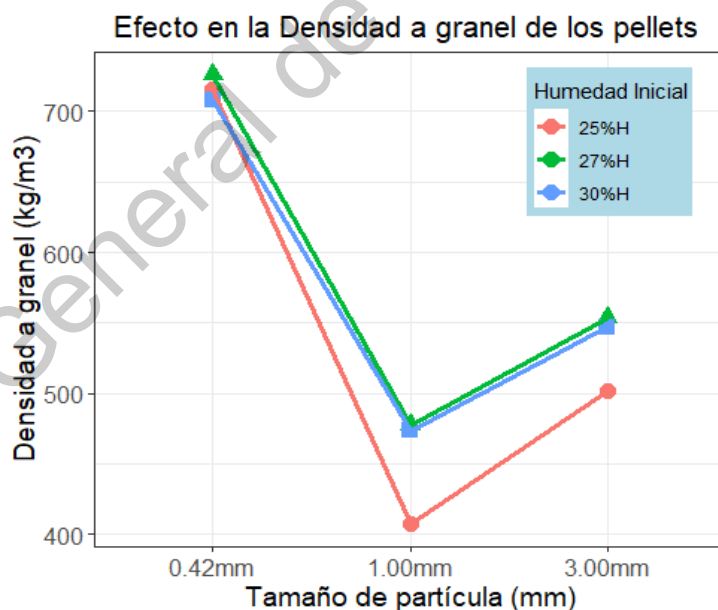


Figura 36. Gráfico de interacción entre factores para la densidad a granel

La baja densidad de los pellets causará problemas en el transporte y el almacenamiento (Munawar y Subiyanto, 2014). Hay que recordar que la densidad individual es una variable importante en la formulación y la calidad del material

densificado, pero la densidad a granel es de suma importancia en el empaquetado, el transporte y la comercialización (Gilvari et al., 2019). Teniendo esto en cuenta estos aspectos, los pellets elaborados con un tamaño de 1.00 mm se encuentran por debajo de los valores para su comercialización, ya que la densidad a granel no es una propiedad inherente al material y se considera una propiedad dinámica más que estática, para el ahorro de costos de transportación y almacenaje (Gilvari et al., 2019). Los resultados obtenidos para un tamaño de 0.42 mm se encuentran por encima de los reportados para pellets de residuos de cocos *nuficera* con 640.0 kg/m³ en promedio (Acda, 2015), carbón marrón (lignito) y salvado de arroz con 600.0 kg/m³ (Tsuchiya y Yoshida, 2017), y desechos de jardín con 617.0 kg/m³ (Pradhan et al. 2018a); mientras que la densidad a granel de los pellets producidos a partir de partículas de 1.00 mm y 3.00 mm son competitivos con aquellos de aserrín de pino y orujo de uva (499.0 kg/m³), aserrín de pino con orujo de olivo (433.0 kg/m³) (García et al., 2018), paja de trigo (469.0 kg/m³) y paja de trigo torrefactada (568.0 kg/m³) (Azócar et al., 2019) y residuos lignocelulósicos con densidades en promedio de 545.90 kg/m³ (Zawislak et al., 2020). La densidad a granel es una propiedad relevante, dado que el combustible suele introducirse por volumen, no por peso; por ello, las variaciones en la densidad a granel afectan de forma considerable la eficiencia de la combustión (Filbakk et al., 2011).

6.2.1.10 Análisis de los pellets con respecto a la durabilidad

La durabilidad de los pellets se define como la resistencia mecánica de éstos durante su almacenamiento, trituración o transporte. La abrasión es uno de los parámetros más relevantes de los pellets, ya que una gran cantidad de finos en el sistema de almacenamiento del usuario final podría provocar fallos en el sistema de alimentación (García et al., 2019). También se ha reportado que la durabilidad de los pellets es mayor con el incremento del porcentaje de humedad de la biomasa, hasta que se alcanza un nivel óptimo y luego disminuye para contenidos de humedad de la biomasa más altos (Fasina, 2008; Pradhan et al., 2018b). De acuerdo con la Tabla 30 del análisis de la durabilidad, no existe un efecto de

significancia estadística causado por el tamaño de partícula, ni por la humedad inicial en la fabricación de pellets combustibles de cascabillo de café.

Tabla 30. Análisis de varianza de la durabilidad

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------|--------------|
| Tamñ.Part | 2 | 2.291 | 1.1457 | 2.402 | 0.119 |
| Humed.Ini | 2 | 2.454 | 1.2269 | 2.572 | 0.104 |
| Tamñ.Part* Humed.Ini | 4 | 3.823 | 0.9558 | 2.004 | 0.137 |

Con base en los resultados de la Tabla 31 para la prueba de Tukey, se observa que efectivamente las medias entre los tratamientos son prácticamente iguales, tanto para el tamaño de partícula como para la humedad inicial. La norma ISO 17225-6 considera que un combustible es de clase A con durabilidades iguales o mayores al 97.5 %, mientras que para la clase B se permiten durabilidades del 96 %; por lo tanto, los pellets de cascabillo de café cumplirían con lo establecido en la norma utilizando cualquiera de los tamaños y humedades iniciales.

Tabla 31. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para la durabilidad de los pellets de cascabillo de café

| Tamñ. Part. | Grupo | Media | Humed. Ini. | Grupo | Media |
|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 0.42 mm | A | 99.31 | 25%H | A | 98.61 |
| 1.00 mm | A | 98.61 | 27%H | A | 99.35 |
| 3.00 mm | A | 99.07 | 30%H | A | 99.03 |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Método de Tukey y una confianza del 95 %.

La durabilidad mecánica es el principal parámetro utilizado para describir la calidad física del biocombustible sólido compactado (Choi et al., 2014). En consecuencia, cuando la durabilidad mecánica no se cumple, se recomienda ajustar el porcentaje de humedad de la biomasa, las condiciones de la compactación y las mezclas de biomásas. Al ser un parámetro primordial para una buena peletización, también se podría disminuir el tamaño de las partículas de biomasa y

homogeneizarlas de forma eficiente, para así optimizar la peletización y cumplir con el parámetro de durabilidad (Pegoretti-Leite de Souza et al., 2020).

A continuación, la Figura 37 presenta el comportamiento de la durabilidad al emplear diferentes tamaños y humedades en la producción de pellets de cascabillo de café.

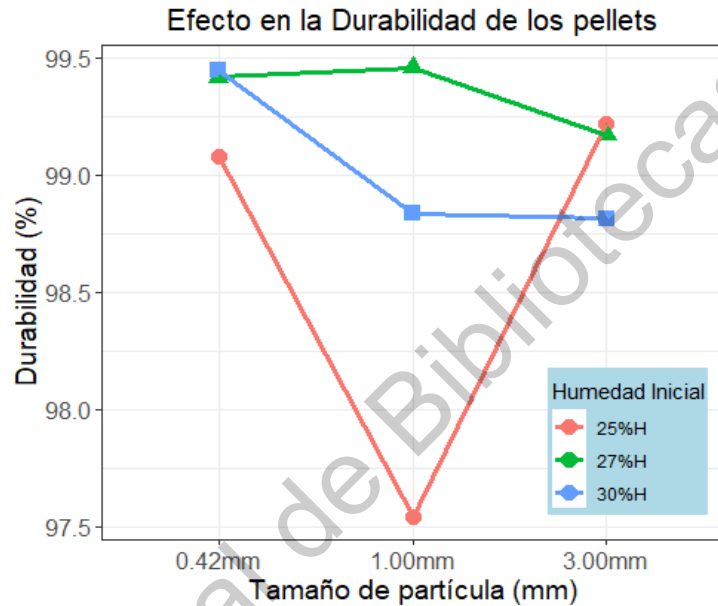


Figura 37. Gráfico de interacción entre factores para la durabilidad

De la Figura 37 se nota que la durabilidad puede llegar hasta valores del 99.5 % cuando se utilizan tamaños de partícula de 0.42 y 1.00 mm con humedades iniciales de 27 y 30 %; mientras que la durabilidad más baja se encuentra con un tamaño de 1.00 mm y un 25 % de humedad inicial. Como puede verse, la durabilidad y la densidad a granel de los pellets afectan considerablemente su calidad, ya que son fundamentales para su manipulación y almacenamiento; los pellets deben ser duraderos y suficientemente resistentes para soportar el transporte a diferentes zonas (García et al., 2019).

6.2.1.11 Análisis de los pellets con respecto al rendimiento

Por último, se analizó la variable de respuesta del rendimiento; esto para determinar la factibilidad de la producción de pellets de cascabillo de café; el

rendimiento se define como la relación entre la masa que se introduce en la tolva para densificar y la que sale del proceso de peletizado en forma de pellet. Si los rendimientos son bajos, los costos de energía en la producción serían mayores. De acuerdo con la Tabla 32, efectivamente existe un efecto en el rendimiento de los pellets, el cual es producido tanto por el tamaño de partícula como por la humedad inicial utilizada en el proceso.

Tabla 32. Análisis de varianza del rendimiento

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|----------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------|------------------|
| Tamñ.Part | 2 | 4163 | 2081.6 | 13.102 | 0.000308* |
| Humed.Ini | 2 | 1375 | 687.7 | 4.329 | 0.029184 |
| Tamñ.Part* Humed.Ini | 4 | 525 | 131.3 | 0.826 | 0.525432 |

De acuerdo con la Tabla 33, los mejores rendimientos son obtenidos para pellets elaborados con partículas de tamaños de 0.42 mm, alcanzando hasta un 96 % de rendimiento; en contraparte, en los pellets fabricados con partículas a partir de un tamaño de 1.00 mm los resultados son poco favorables, ya que se logran apenas rendimientos en un 65 % en promedio. Por parte de la humedad inicial, el porcentaje de 25 % fue el menos favorecido, ya que se logran rendimientos alrededor del 71 %; mientras que al utilizar una humedad de 27 o 30 %, los pellets exceden el 80 % de rendimiento, esto combinado con un tamaño de 0.42 mm permite obtener los más altos rendimientos en la producción de los pellets.

Tabla 33. Comparación de medias por grupos mediante Tukey para el rendimiento de producción de los pellets de cascabillo de café

| Tamñ. Part. | Grupo | Media | Humed. Ini. | Grupo | Media |
|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 0.42 mm | A | 95.86 | 25%H | A | 71.34 |
| 1.00 mm | B | 65.46 | 27%H | AB | 82.81 |
| 3.00 mm | A | 81.32 | 30%H | B | 88.50 |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Método de Tukey y una confianza del 95 %.

La determinación de los rendimientos es importante, dado que permite evaluar si las condiciones de peletizado son o no favorables desde el punto de vista

económico. A pesar de que puedan producirse pellets con buenas densidades o poder calorífico, éstos no serían rentables si sus rendimientos son muy bajos; es decir, la biomasa se aprovecha mejor cuando el rendimiento es alto. De la Figura 38, se observa que efectivamente los peores rendimientos se obtienen con un tamaño de 1.00 mm, llegando el valor mínimo hasta un 50 %; esto significa que la mitad de la biomasa no se densifica por lo que no es factible realizar una producción a una escala mayor utilizando un tamaño de partícula de 1.00 mm para pellets de cascabillo de café.

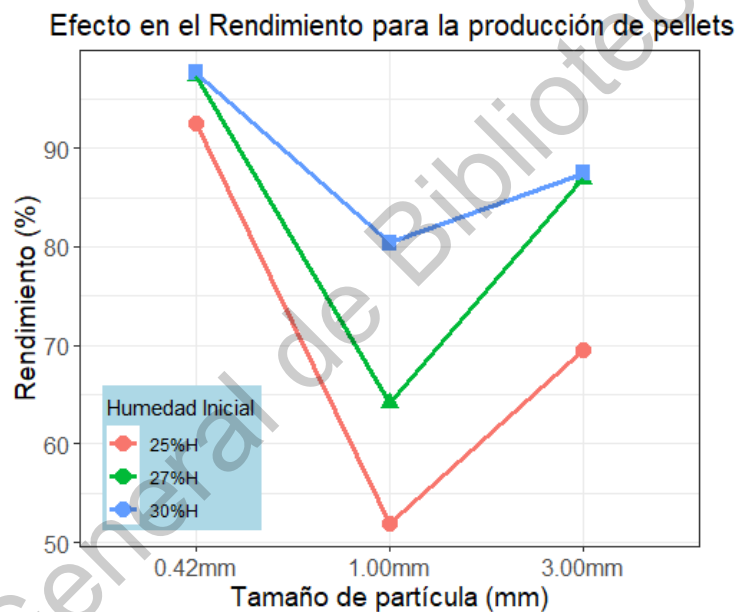


Figura 38. Gráfico de interacción entre factores para el rendimiento

De acuerdo con Marrugo et al. (2019), tamaños de partícula pequeños provocan que la unión entre partículas se vea favorecida por enlaces asociados a fuerzas de corto alcance (fuerzas de Van der Waals), cohesivas y adhesivas, que conducen a mayores rendimientos de los pellets. Por lo tanto, y debido a que un mayor costo energético implica un menor rendimiento, tanto en términos de capacidad como de producción, es necesario establecer una situación intermedia que permita producir pellets de alta calidad manteniendo una productividad óptima (Miranda et al. 2018b).

6.2.1.12 Análisis de las mejores propiedades de los pellets

Una vez analizados los pellets de cascabillo de café individualmente por sus propiedades químicas, energéticas y físicas, se hará un último análisis comparativo con la norma ISO 17225-6 considerando los parámetros disponibles; estos parámetros incluyen humedad, cenizas, poder calorífico, densidad a granel y durabilidad. Este análisis servirá para conocer la mejor combinación de variables que permita obtener pellets de alta calidad.

A continuación, las Figuras 39, 40, 41, 42 y 43 muestran los valores mínimos y máximos, dependiendo sea el caso de utilización, permitidos por la norma ISO 17225-6, comparados con los valores obtenidos en esta investigación para las variables de humedad, ceniza, poder calorífico, densidad a granel, y durabilidad, respectivamente.

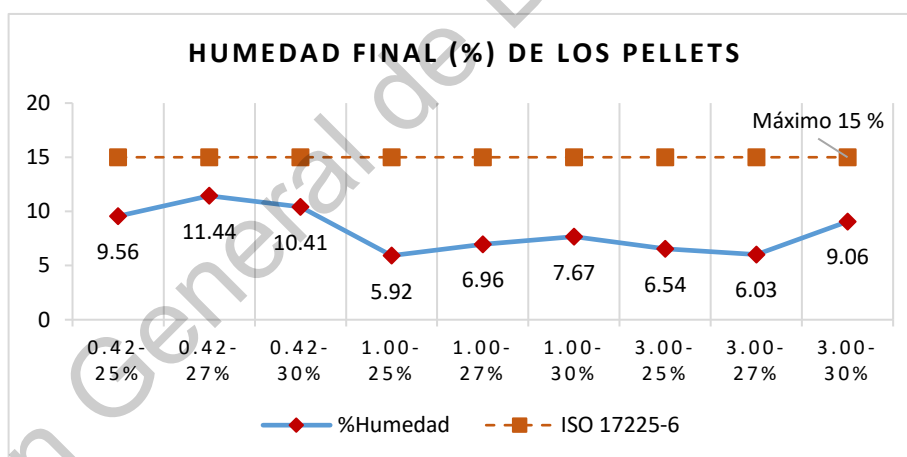


Figura 39. Gráfico comparativo entre la humedad final y la norma ISO 17225-6

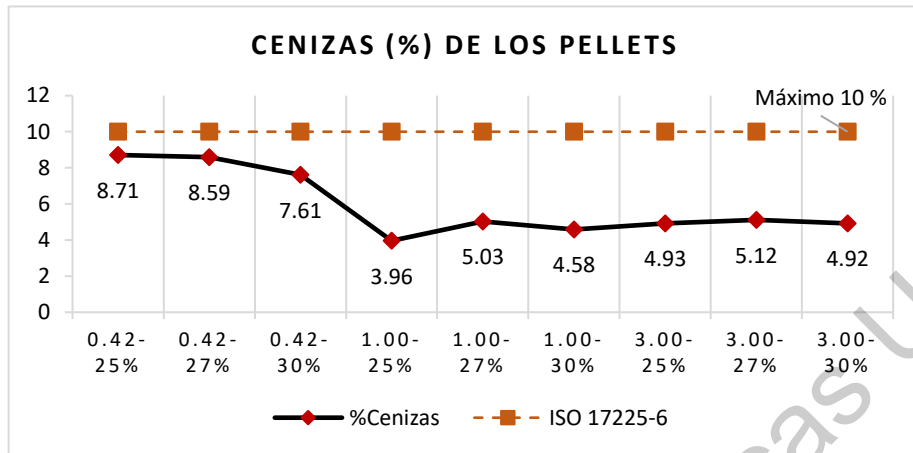


Figura 40. Gráfico comparativo entre las cenizas y la norma ISO 17225-6

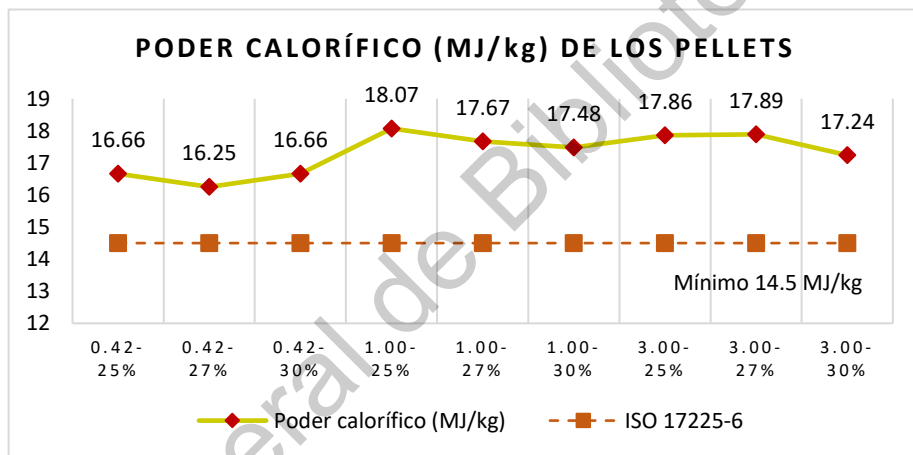


Figura 41. Gráfico comparativo entre el poder calorífico y la norma ISO 17225-6

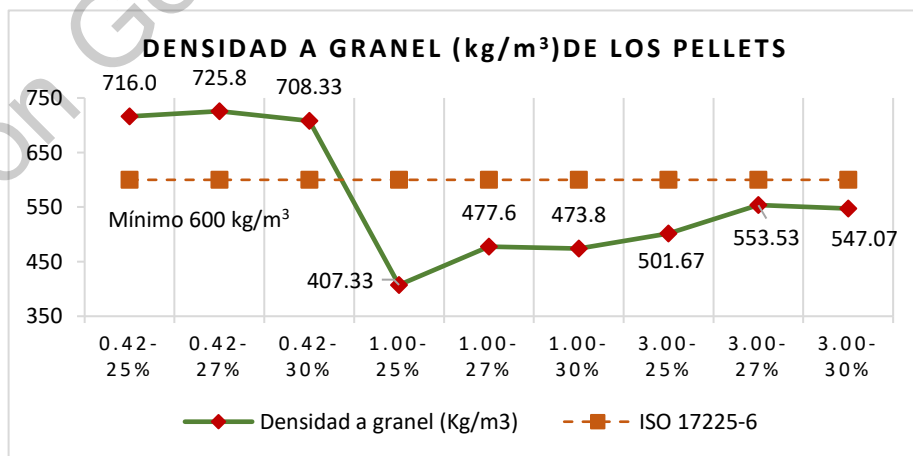


Figura 42. Gráfico comparativo entre la densidad a granel y la norma ISO 17225-6

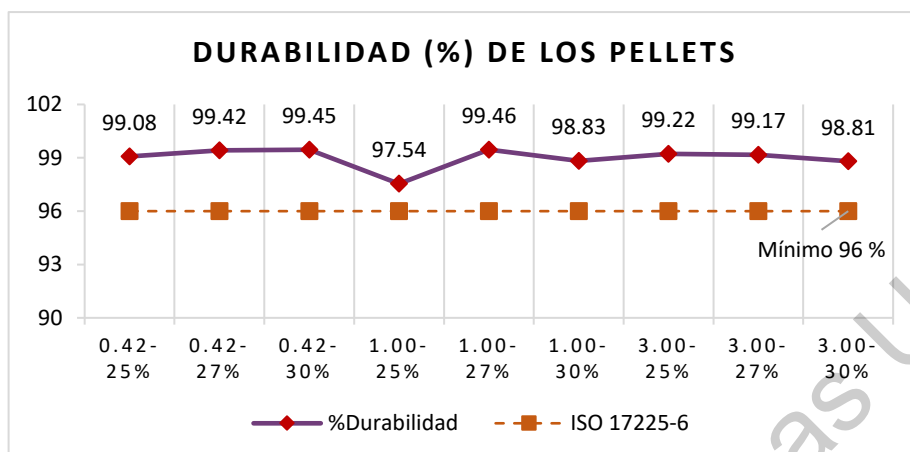


Figura 43. Gráfico comparativo entre la durabilidad y la norma ISO 17225-6

De la Figura 39 se observa que todos los tratamientos cumplen con los límites máximos permitidos, siendo el tamaño de 1.00 mm y 25 % de humedad inicial con el valor más bajo de 5.92 % de humedad final. La combinación de tamaño de partícula de 1.00 mm y 25 % de humedad inicial exhibe los niveles más bajos de cenizas con un valor de 3.96 % (Figura 40), mientras que para el poder calorífico el valor más grande es de 18.07 MJ/kg (Figura 41), por lo cual se pensaría que ésta sería la mejor combinación para obtener los mejores pellets en cuanto a propiedades fisicoquímicas. El problema con esta combinación son sus propiedades físicas; si se analiza la densidad a granel, ésta se encuentra por debajo del mínimo de 600 kg/m³ con un valor de 407.33 kg/m³ (Figura 42); lo anterior ocasionaría problemas en su empaquetado, transporte y comercialización. Además, si se analiza su rendimiento se observa que es la combinación que tiene el peor rendimiento con un valor promedio de 51.86 %; lo anterior indica que sería necesario implementar un proceso de recirculación del material no peletizado.

El incumplimiento con la densidad a granel y los bajos rendimientos en la producción de los pellets se repite para todos los tratamientos donde se involucren tamaños de partícula de 1.00 y 3.00 mm; además de que, al comparar los resultados de longitud y densidad individual, éstos se encuentran por debajo comparándolos con el tamaño de partícula de 0.42 mm.

El tamaño de partícula de 0.42 mm obtuvo las mejores propiedades físicas, además de los mejores rendimientos; en específico, con una humedad del 27 % se obtienen estas condiciones de calidad de los pellets. Por otro lado, sus propiedades fisicoquímicas y energéticas si bien cumplen con la norma, éstas en algunos casos se encuentran al límite de lo permitido.

Por esta razón se decidió realizar la adición de otro residuo, con el objetivo de mejorar las propiedades energéticas de los pellets de 0.42 mm, y humedad inicial de 27 %, además de que sus propiedades fisicoquímicas sean de alta calidad. El residuo seleccionado fue el suero de leche, ya que éste se encuentra disponible en el Campus Amazcala de la Facultad de Ingeniería.

6.2.2 Producción de pellets con mezcla de agua y suero de leche

Como se mencionó anteriormente, se decidió hacer un proceso de peletizado adicional al descrito previamente, con la finalidad de mejorar las propiedades químicas y energéticas de los pellets de cascabillo de café. Para ello se seleccionó el residuo de suero de leche, y se consideraron mezclas de éste con agua; lo anterior con el objetivo de reducir la huella hídrica, y reutilizar un residuo como es el suero de leche. El suero de leche es un desperdicio en las granjas, y al utilizarlo para humectar a los residuos en la fabricación de pellets, se reduce la cantidad de agua a utilizar.

Para ello se seleccionó como tamaño de partícula el valor de 0.42 mm, al igual que un valor de humedad inicial del 27 %, y se realizaron las siguientes mezclas de proporción de agua y suero de leche (ver Figura 44):



Figura 44. Proporciones de agua y suero de leche

Con base en estas mezclas se realizó un proceso de peletizado de cuatro tratamientos, con la humedad (27 %) y tamaño de partícula (0.42 mm) fijos. Así, se obtuvieron cuatro combinaciones de mezcla entre agua y suero de leche, quedando de la siguiente forma:

1. Agua y suero de leche (75:25) -> A75:SL25
2. Agua y suero de leche (50:50) -> A50:SL50
3. Agua y suero de leche (25:75) -> A25:SL75
4. Agua y suero de leche (0:100) -> A0:SL100

Las Figuras 45, 46, 47 y 48 muestran los pellets obtenidos con las mezclas A75:SL25, A50:SL50, A25:SL75 y A0:SL100, respectivamente. Se observa en estas figuras ligeros cambios en la tonalidad y brillo de los pellets; en cuanto a la dureza y firmeza de los pellets, éstos no se deshacen o rompen con facilidad, ya que su consistencia es buena, por lo que se espera que sus propiedades físicas y químicas hayan mejorado.



Figura 45. Pellets mezcla 75:25



Figura 46. Pellets mezcla 50:50



Figura 47. Pellets mezcla 25:75



Figura 48. Pellets mezcla 0:100

A continuación, las Tablas 34 y 35 muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica y de las propiedades físicas, respectivamente, de los pellets obtenidos de la mezcla de agua y suero de leche de cascabillo de café con tamaño de partícula de 0.42 mm y 27 % de humedad inicial.

Tabla 34. Resultados de la caracterización de pellets de cascabillo de café con mezcla de agua y suero de leche

| Agua:suero de leche | Humedad (%) | Cenizas (%) | Sólidos volátiles (%) | COT (%) | Poder calorífico (MJ/kg) |
|---------------------|-------------|-------------|-----------------------|--------------|--------------------------|
| 75:25 | 8.75 ± 0.17 | 8.18 ± 0.19 | 89.45 ± 0.47 | 51.67 ± 0.03 | 18.74 ± 0.09 |
| 50:50 | 8.54 ± 0.28 | 8.37 ± 0.10 | 89.15 ± 0.10 | 51.41 ± 0.02 | 18.75 ± 0.23 |
| 25:75 | 7.85 ± 0.12 | 8.75 ± 0.33 | 88.61 ± 0.18 | 51.05 ± 0.05 | 18.54 ± 0.17 |
| 0:100 | 7.52 ± 0.26 | 7.14 ± 1.24 | 90.93 ± 1.55 | 52.42 ± 0.88 | 18.42 ± 0.05 |

Nota: COT: Contenido de carbono total

Tabla 35. Propiedades físicas de pellets de cascabillo de café con mezcla de agua y suero de leche

| Agua:suero de leche | D (mm) | L (mm) | DI (g/cm ³) | DG (kg/m ³) | Durabilidad (%) | R (%) |
|---------------------|--------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------|
| 75:25 | 7.79 | 28.07 ± 1.13 | 1.18 ± 0.05 | 667.89 | 99.10 ± 0.41 | 65.51 |
| 50:50 | 7.83 | 26.42 ± 0.47 | 1.23 ± 0.01 | 714.00 | 99.35 ± 0.01 | 81.62 |
| 25:75 | 7.85 | 26.29 ± 0.35 | 1.23 ± 0.03 | 738.40 | 99.37 ± 0.02 | 45.48 |
| 0:100 | 7.90 | 27.68 ± 0.24 | 1.23 ± 0.05 | 703.88 | 99.10 ± 0.33 | 36.16 |

Nota: D: Diámetro; L: Longitud; DI: Densidad individual; DG: Densidad a granel; R: Rendimiento.

6.2.2.1 Análisis de los pellets con respecto a la humedad final

A diferencia de la elaboración de pellets combustibles de cascabillo de café con diseño experimental, los factores de humedad inicial (27 %) y tamaño de partícula (0.42 mm) se quedaron fijos; por lo que el factor a ser tratado en el análisis experimental fue la proporción de la mezcla de agua y suero de leche, para comprobar si tiene o no un efecto sobre las variables de respuesta. A continuación,

se muestra el análisis ANOVA realizado con ayuda del programa Rstudio, Tabla 36; los resultados son los siguientes:

Tabla 36. Análisis de varianza de la humedad final

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|---------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------|-----------------|
| Agua:suero de leche | 3 | 3.0103 | 1.003 | 21.34 | 0.000358 |

De la Tabla 36 se observa que el p-valor es muy pequeño, lo que implica que las proporciones de agua y suero de leche tienen un efecto sobre la humedad final de los pellets combustibles; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, la cual planteaba que las cuatro proporciones de agua y suero de leche tienen la misma media, lo que se interpretaba diciendo que las mezclas de agua y suero de leche producen la misma humedad final.

Aunque la media entre los tratamientos no es la misma, se observa que la humedad final de los pellets cumple con la norma ISO 17225-6, ya que se encuentran por debajo de los niveles requeridos para un biocombustible tipo A, el cual es de un valor máximo de 12 %.

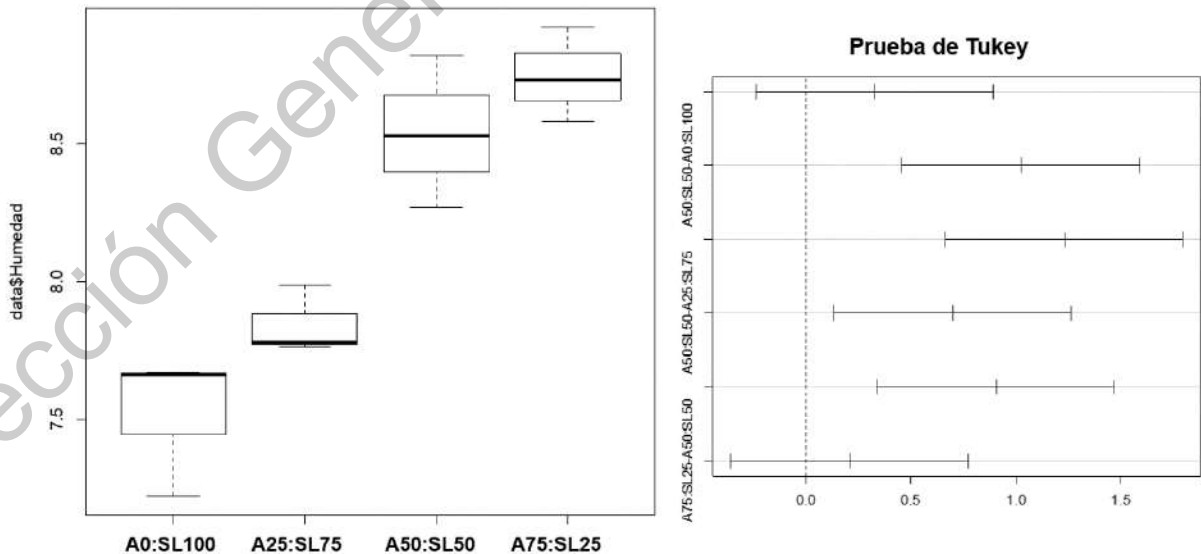


Figura 49. Diagrama de caja para la humedad final de los tratamientos de agua y suero de leche, y prueba de Tukey

De la Figura 49 se nota que la media de los tratamientos es diferente, pero con la prueba de Tukey se identifica que los tratamientos de las proporciones de agua y suero de leche de A75:SL25 y A50:SL50, respectivamente, son iguales; esto significa que se puede usar una de esas dos combinaciones para obtener valores de humedad final en los pellets alrededor de un 8.60 %. Un efecto similar se observa con las combinaciones de A0:SL100 y A25:SL75, sus tratamientos son iguales; por lo que si se desea obtener un valor de humedad final alrededor de 7.65 %, éstas dos opciones serían las adecuadas.

Las humedades finales de los diferentes tratamientos además de cumplir con los valores que requiere la norma ISO, se encuentran por debajo de valores reportados para pellets de fibra de coco con 10.70 % (Liu et al., 2014), residuos municipales con aglutinante Novo Gro con valores entre 10.3-18.9 % (Wang et al., 2018) y paja de trigo con 12.0 % (Pradhan et al., 2018b); además que la humedad se ve reducida de un valor de 11.44 % que se tenía en un principio, hasta un valor mínimo de 7.52 % en promedio.

6.2.2.2 Análisis de los pellets con respecto a las cenizas

Como se mencionó con anterioridad, el contenido de cenizas es una variable de importancia, ya que representa todo el material que no fue quemado; las cenizas están compuestas por materiales inorgánicos, derivados de potasio, calcio, magnesio y otros (Miranda et al., 2018a). La Tabla 37 presenta los resultados de la prueba ANOVA para ver si hay significancia estadística en las cenizas finales de los pellets.

Tabla 37. Análisis de varianza de las cenizas

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|---------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------|---------------|
| Agua:suero de leche | 3 | 4.279 | 1.4263 | 3.393 | 0.0742 |

Un p-valor de 0.0742 significaría no rechazar la hipótesis nula, la cual indica que la media entre tratamientos es igual; pero el valor sigue siendo muy pequeño

para afirmar con seguridad esta respuesta, por lo que analizando el diagrama de cajas y la prueba de Tukey se nota que sí hay diferencias entre las medias.

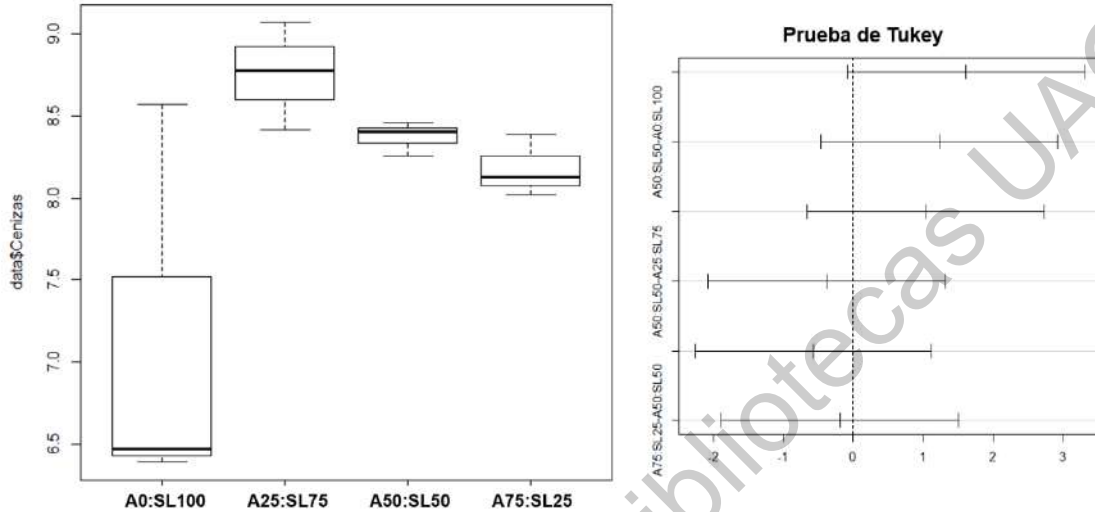


Figura 50. Diagrama de caja de cenizas finales de los tratamientos de agua y suero de leche, y prueba de Tukey

En la Figura 50 se detecta que existe una ligera igualdad entre las medias de los tratamientos de A75:SL25, A50:SL50 y A25:SL75, ya que su valor se encuentra alrededor del 8.11 %; como se observó de la Tabla 34, los resultados son muy cercanos. El tratamiento A0:SL100 varía en un uno por ciento de la media de los cuatro tratamientos; sin embargo, todos ellos siguen cumpliendo con el valor máximo que debe alcanzar un pellet combustible, de acuerdo con la norma ISO 17225-6, porque no sobrepasan el 10 % de cenizas finales.

Analizando el tratamiento A0:SL100 por separado, se observa que fue el que presentó la menor cantidad de cenizas; parte de esto se debe a que también fue el tratamiento que presentó el porcentaje de humedad más bajo. Por lo que, al ser incinerada la muestra, el material es consumido más rápido y de manera limpia. Por último, con ayuda de la prueba de Tukey se observa que no hay mucha diferencia entre las medias de los tratamientos. El porcentaje de cenizas del tratamiento A0:SL100 tiende a variar un poco en comparación con los otros tratamientos. No

obstante, sus valores son comparables a los de otros valores de cenizas de pellets combustibles como los producidos a partir de desechos de jardín con un 14.5 % de cenizas finales (Pradhan et al., 2018a); de hecho, el contenido de cenizas de los pellets de cascabillo de café es prácticamente la mitad del valor antes mencionado. El contenido de cenizas es un parámetro importante, ya que las cenizas son los residuos que quedan después de la combustión, y un bajo contenido de residuos de cenizas es indicativo de un proceso de combustión eficiente y limpio; nuevamente el porcentaje de cenizas se ve reducido de 8.59 % hasta un valor de 7.14 % promedio al utilizar suero de leche.

6.2.2.3 Análisis de los pellets con respecto a los sólidos volátiles

Como se mencionó anteriormente, los sólidos volátiles, aunque no se encuentran estandarizados en la norma ISO 17225-6, son importantes, ya que dan un resultado indirecto de la capacidad de combustión de la materia.

Tabla 38. Análisis de varianza de los sólidos volátiles

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|---------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------|---------------|
| Agua:suero de leche | 3 | 8.8890 | 2.9630 | 4.457 | 0.0404 |

Observando el valor p de la Tabla 38 se aprecia como las diferentes proporciones de agua y suero de leche tienen un efecto sobre los sólidos volátiles finales de los pellets combustibles; este valor es muy cercano al 0.05, que de acuerdo con los diferentes métodos estadísticos se consideraría que las medias de los tratamientos son iguales. Por lo que los valores entre los cuatro diferentes tratamientos de agua y suero de leche no deben variar mucho entre sí; de igual manera se analizarán los diagramas de cajas y prueba de Tukey.

De la Figura 51 se observa que las medidas de los tratamientos cambian con cada combinación de agua y suero de leche; pero analizando detalladamente se aprecia que las combinaciones de A75:SL25 y A50:SL50 son muy parecidas entre

sí, además que la proporción A25:SL75 se acerca al valor de la media de esas dos combinaciones.

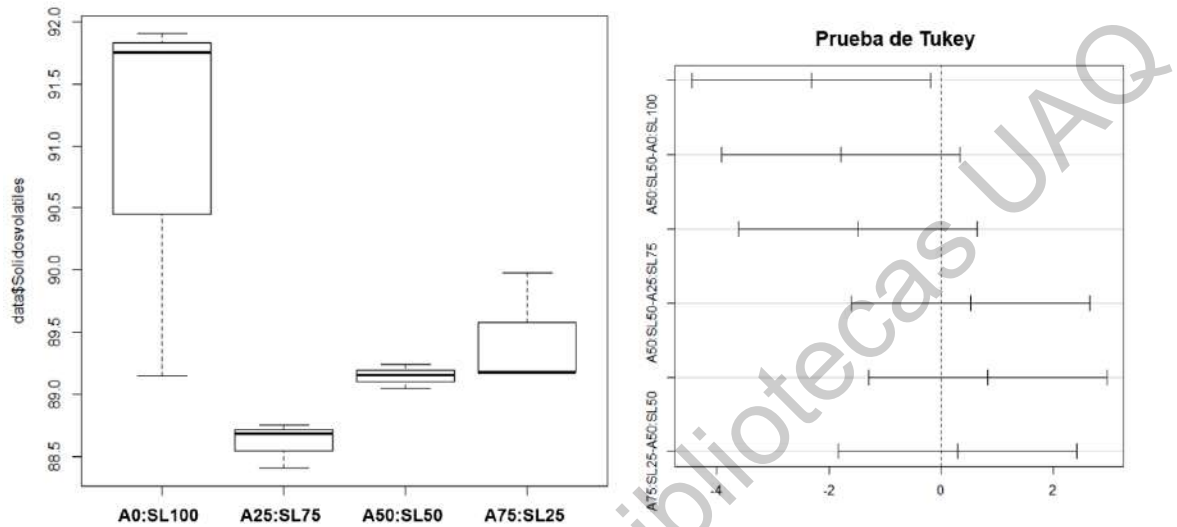


Figura 51. Diagrama de caja para sólidos volátiles de los tratamientos de agua y suero de leche, y prueba de Tukey

Todo lo contrario ocurre con A0:SL100, la cual, de acuerdo al análisis del diagrama de caja general, presenta dos valores atípicos; esto se puede comprobar con la prueba de Tukey, donde la combinación de los tratamientos A75:SL25, A50:SL50 y A25:SL75 son prácticamente iguales entre ellos. Lo anterior a diferencia de que al combinar cualquiera de esos tratamientos con A0:SL100 se alejan mucho del valor de referencia de la gráfica.

En lo particular, se observa que los diferentes tratamientos de agua y suero de leche generan valores alrededor del 89.0 % de sólidos volátiles en los pellets; por lo que al utilizar algunos de esos cuatros tratamientos se podrían obtener los mismos resultados. Además, los valores obtenidos son mayores a los reportados por Ríos-Badrán et al., (2020) para pellets de cascarilla de arroz con valor de 83.68 %. Por otro lado, el uso de suero de leche como aglutinante incrementa la cantidad de sólidos, variando de un valor de 88.67 % hasta 90.93 % en promedio.

6.2.2.4 Análisis de los pellets con respecto al carbono total (COT)

El carbono, al igual que la materia volátil, no se encuentra estandarizada en la norma ISO 17225-6; sin embargo, el contenido de carbono es muy importante dado que es un indicador de ignición.

Tabla 39. Análisis de varianza del COT

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|---------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------|---------------|
| Agua:suero de leche | 3 | 3.039 | 1.0129 | 5.201 | 0.0277 |

De la Tabla 39 se observa que hay un efecto sobre el contenido de carbono total de los pellets combustibles, ya que el p-valor es muy pequeño; esto significa que las medias de los tratamientos son diferentes, aunque el efecto podría ser menor, ya que el valor de significancia no es muy pequeño.

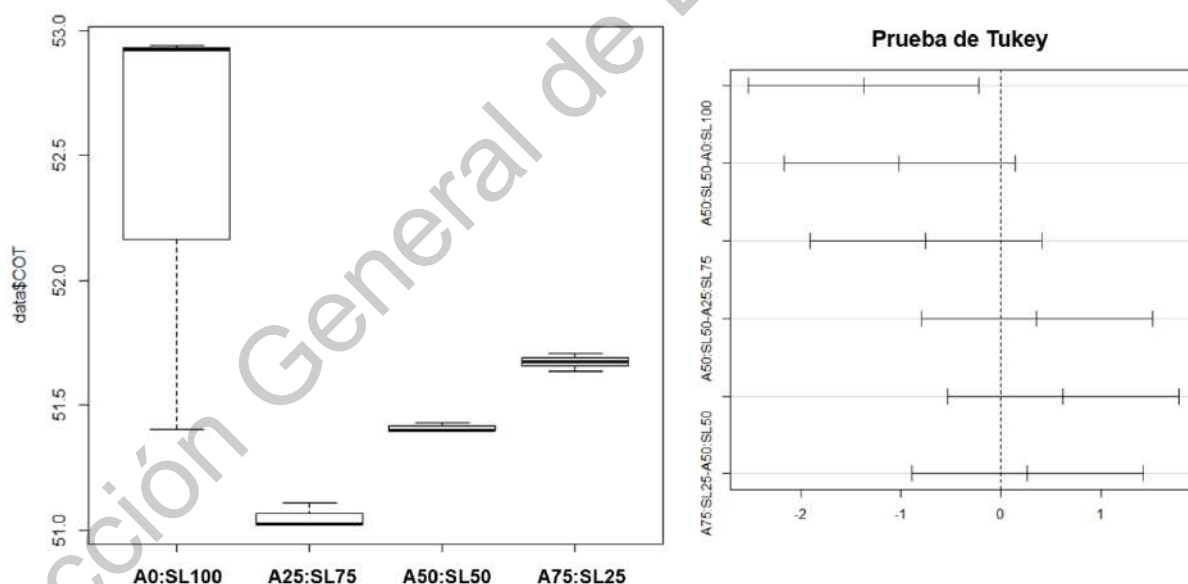


Figura 52. Diagrama de caja para carbono (COT) de los tratamientos de agua y suero de leche, y prueba de Tukey

De la Fig. 52 se observa que los tratamientos A75:SL25 y A50:SL50 son los que presentan igualdad entre ellos, ya que se aproximan al valor medio de 51.64 % total de todos los tratamientos; en específico, el tratamiento A75:SL25 es el que

presenta el valor más parecido con un resultado de 51.67 %. La mezcla de A0:SL100 presentó el resultado mayor con una media de 52.42 %, pero como se mencionó anteriormente, la diferencia entre ellos no es muy grande; por lo que al utilizar cualquiera de los cuatro tratamientos se podrían obtener los mismos resultados.

De los valores reportados en la literatura se tiene que los pellets de fibra de coco contienen un 28.54 % de carbono, mientras que los pellets de cáscaras de arroz tienen 13.23 % (Liu et al., 2014); ambas biomásas presentan un valor menor, en comparación con los resultados de esta investigación. El contenido de carbono se eleva de 51.39 % hasta un valor promedio de 52.42 % al utilizar el suero de leche.

6.2.2.5 Análisis de los pellets con respecto al poder calorífico (HHV)

El poder calorífico es uno de los parámetros más importantes para la comercialización de un biocombustible, ya que es la energía liberada en forma de calor cuando es quemado el material; esta energía puede ser aprovechada por equipos como hornos y calderas, para la producción de energía calorífica y/o eléctrica.

Tabla 40. Análisis de varianza del poder calorífico

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Fc | P-valor |
|---------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------|--------------|
| Agua:suero de leche | 3 | 0.2395 | 0.07985 | 3.376 | 0.075 |

De la Tabla 40 se nota que el p-valor es mayor al 0.05, que como se mencionó anteriormente, es el valor mínimo requerido para confirmar que las medias de los tratamientos son iguales; por lo que podrían usarse cualquiera de las diferentes proporciones de agua y suero de leche para obtener un poder calorífico igual a los resultados de este primer experimento. Además, la sustitución de agua por suero de leche en la producción de pellets combustibles de cascabillo de café no tendría un cambio en el poder calorífico final del biocombustible; sin embargo, sí se lograría disminuir la huella hídrica asociada a este proceso. A continuación, se analizarán

los diferentes gráficos para determinar si hay o no un efecto sobre el poder calorífico de los pellets.

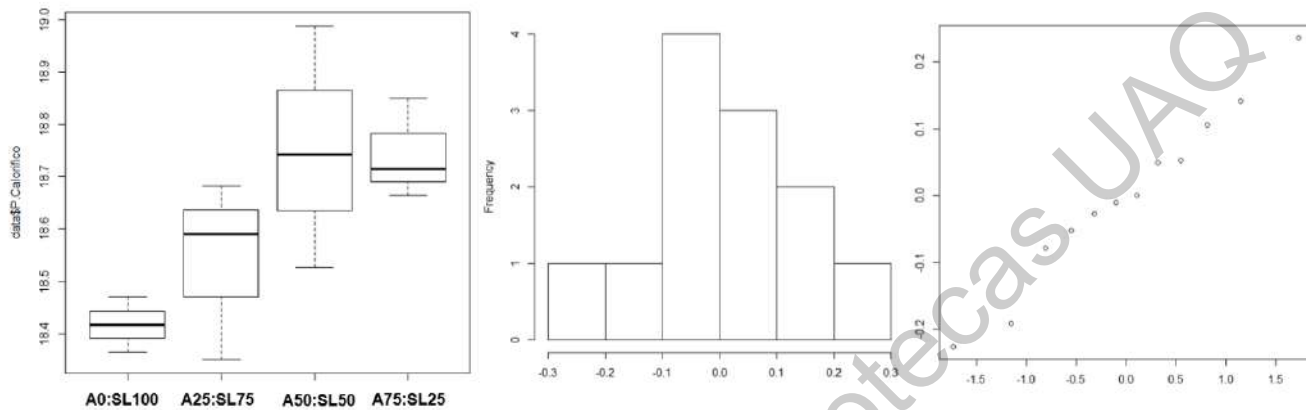


Figura 53. Diagrama de caja, histograma y gráfico normal para poder calorífico de los tratamientos de agua y suero de leche

De la Figura 53 se detecta que las medias de los tratamientos, aunque no son iguales, tampoco son tan diferentes entre ellos, teniendo un valor promedio mínimo de 18.42 MJ/kg y un promedio máximo de 18.75 MJ/kg; por lo que no hay un valor significativo entre ellos. Por otro lado, el histograma muestra que no hay variabilidad entre los resultados, ya que éstos se concentran dentro del centro del gráfico. En el gráfico normal se nota que hay una tendencia en línea recta, ya que los datos no se encuentran dispersos, y tampoco se observan datos atípicos.

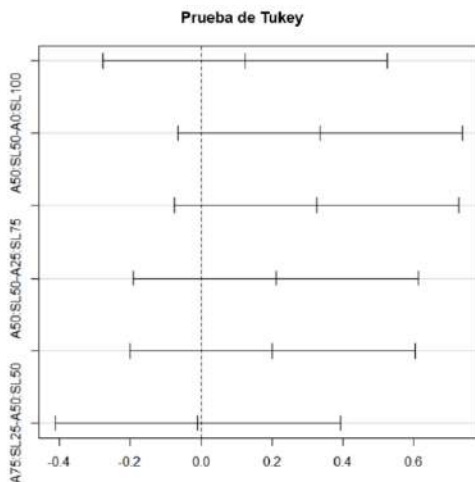


Figura 54. Gráfico de Tukey para poder calorífico entre los tratamientos de agua y suero de leche

De la prueba de Tukey (ver Figura 54) se exhibe que los tratamientos A75:SL25 y A50:SL50 son iguales, ya que su valor está en medio del gráfico; este mismo fenómeno ocurre al comparar el tratamiento A25:SL75 y A0:SL100, su valor está prácticamente en el centro del gráfico. Por lo que se puede concluir que la sustitución de agua por suero de leche para fabricar los pellets no afecta el poder calorífico final de los pellets; no obstante, se disminuye el uso de agua, al mismo tiempo que se utiliza un residuo, lo que permite reducir la huella hídrica en la producción de este biocombustible.

Por otro lado, el poder calorífico fue uno de los parámetros que mejoró considerablemente, pasando de 16.25 MJ/kg en la producción de pellets de cascabillo de café, usando agua como aglutinante, hasta 18.75 MJ/kg al utilizar suero de leche; es decir, se tuvo un incremento del 15.5 %.

6.2.2.6 Análisis de los pellets con respecto a las propiedades físicas

Para el análisis de las propiedades físicas se determinará si hubo un cambio o no, mediante la comparación de los resultados del diseño original, donde sólo se utilizó agua, y de los obtenidos a partir del uso de suero de leche.

Tabla 41. Tabla comparativa de la producción de pellets

| Agua:suero de leche | D (mm) | L (mm) | DI (g/cm ³) | DG (kg/m ³) | Durabilidad (%) | R (%) |
|-------------------------------------|--------|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------|
| 75:25 | 7.79 | 28.07 ± 1.13 | 1.18 ± 0.05 | 667.89 | 99.10 ± 0.41 | 65.51 |
| 50:50 | 7.83 | 26.42 ± 0.47 | 1.23 ± 0.01 | 714.00 | 99.35 ± 0.01 | 81.62 |
| 25:75 | 7.85 | 26.29 ± 0.35 | 1.23 ± 0.03 | 738.40 | 99.37 ± 0.02 | 45.48 |
| 0:100 | 7.90 | 27.68 ± 0.24 | 1.23 ± 0.05 | 703.88 | 99.10 ± 0.33 | 36.16 |
| Diseño experimental original | | | | | | |
| 0.42-27% | 7.97 | 28.19 ± 2.10 | 1.22±0.05 | 725.80 | 99.42±0.02 | 97.37 |

De la Tabla 41 se observa que para el caso del diámetro existe una ligera disminución, pero sigue estando dentro de lo permitido, ya que cumple con lo establecido por la norma y con la tolerancia de ±1 mm de diferencia. La longitud también disminuyó, pero los valores obtenidos siguen siendo mayores a los que se

consiguieron con tamaños de 1.00 y 3.00 mm para el primer experimento. Por otra parte, la densidad individual se mantuvo en los valores que inicialmente se habían alcanzado; mientras que la densidad individual se redujo con la mezcla de A75:SL25, alcanzando un valor de 667.89 kg/m³, el cual es mayor a lo logrado con tamaños de 1.00 y 3.00 mm, y cumple con lo mínimo que solicita la norma ISO. Para las mezclas de A50:SL50 y A0:SL100 se tuvo una ligera disminución, pero que sigue estando por arriba de los 700 kg/m³ de densidad a granel; mientras que el mayor valor de densidad fue obtenido para una mezcla de A25:SL75 con un valor de 738.40 kg/m³. La durabilidad no tuvo mayores cambios, ya que se mantuvo por arriba del 99 %, muy por encima del mínimo permitido por la norma ISO (96 %), por lo que se sigue clasificando como un pellet de clase A.

El rendimiento es una variable importante para la toma de decisiones; el uso de mezclas afectó drásticamente, pasando de un rendimiento inicial de 97.37 %, hasta un valor de 36.16 % cuando se utiliza A0:SL100. Al querer disminuir la huella hídrica y utilizar totalmente suero de leche para la mezcla, los rendimientos indican que es poco factible la producción de pellets. En este contexto, la mejor opción sería trabajar con una mezcla de A50:SL50, ya que el rendimiento se mantiene aceptable con un valor de 81.62 %, además de que sus propiedades fisicoquímicas y energéticas se ven mejoradas, haciendo que se un pellet de alta calidad.

Por lo tanto, para alcanzar un mayor poder calorífico, sin tener que afectar las propiedades físicas y químicas, se debe utilizar un tamaño de partícula de 0.42 mm, con una humedad del 27 % resultante de una mezcla de agua (50 %) y suero de leche (50 %) para la producción de pellets de cascabillo de café.

7. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo un estudio para la producción y caracterización de pellets elaborados a partir de cascabillo de café, así como con mezclas con suero de leche. En México, ambos residuos son utilizados en aplicaciones de poco valor agregado, por lo que su revalorización como pellets combustibles representa una alternativa eficiente.

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del cascabillo de café mostraron que es posible su densificación como un biocombustible sólido. Se realizó un diseño experimental de 2 factores y tres niveles, con el cual se obtuvieron pellets combustibles que cumplen con la norma ISO 17225-6. Los factores de control que se trabajaron fueron el tamaño de partícula y humedad inicial.

Mediante el uso del software Rstudio se realizó el análisis ANOVA, pruebas Tukey y gráficas de interacción para determinar las mejores condiciones; para la primera etapa de la experimentación se tuvieron 27 tratamientos, donde al utilizar un tamaño de 1.00 mm y 25 % de humedad inicial se obtuvieron las mejores propiedades químicas y energéticas, con 5.92 % de humedad final, 3.96 % de cenizas y 18.07 MJ/kg de poder calorífico superior; por otro lado, sus propiedades físicas como densidad a granel no cumplían con lo mínimo requerido para la norma, mientras que el rendimiento fue el mínimo con un valor de 51.86 %.

Con base en estos resultados se realizó una segunda etapa experimental, donde el tamaño de partícula de 0.42 mm y 27 % de humedad inicial fueron elegidos al tener las mejores propiedades físicas, y se añadió suero de leche al proceso de peletizado para mejorar sus propiedades químicas. Los pellets resultantes cumplen con la norma, mejorando su contenido de humedad final con un valor de 8.54 %, 8.37 % en cenizas y el poder calorífico superior se elevó hasta 18.75 MJ/kg.

El poder calorífico de los pellets de cascabillo de café es mayor a 16.0 MJ/kg, mientras que para aquellos elaborados con agua y suero de leche fue de 18.6 MJ/kg en promedio; en ambos casos se cumple con el poder calorífica mínimo de 14.5

MJ/kg que exige la norma para uso de pellets residenciales. Asimismo, el diámetro de los pellets es superior a 7.5 mm, mientras que la longitud del pellet es inferior a 30 mm para todas las mezclas. Por tanto, todos los pellets procedentes de las mezclas de biomasa de cascabillo de café cumplen los requisitos establecidos para estos parámetros. Una calidad excelente de los pellets es esencial para conseguir un proceso de combustión constante, minimizar el mantenimiento de los hornos y estufas a pequeña escala y permitir la comercialización entre países.

Por último, se recomienda que, en investigaciones futuras, se realicen pruebas de combustión para determinar la eficiencia de los pellets, y conocer el total de los gases de efecto invernadero emitidos. La extracción de cafeína del cascabillo como un producto de valor agregado, y la densificación del residuo de dicha extracción se sugiere como una alternativa que puede tener mayor viabilidad económica; no obstante, es necesario evaluar nuevamente las propiedades de dichos pellets conforme a la norma. Asimismo, se sugiere probar mezclas con otras biomásas residuales para evaluar si las propiedades mejoran y se obtienen mayores rendimientos.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acda**, M. N. (2015, December). Fuel pellets from downed coconut (*Cocos nucifera*) in super typhoon Haiyan. *Biomass and Bioenergy*, 83, 539-542. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.005>
- Alemán-Nava**, G.S., Casiano-Flores, V.H., Cárdenas-Chávez, D.L., Díaz-Chavez, R., Scarlar, N., Mahlkecht, J., Dallemand, J.F. y Parra, R. (2014, April). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 140-153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.004>
- Atlas Nacional de Biomasa**. (2020). Secretaria de Energía. <https://dgel.energia.gob.mx/ANBIO/index.html>
- Azargohar**, R., Nanda, S., Kang, K., Bond, T., Karunakaran, C., Dalai, A. K. y Kozinski, J. A. (2019, March). Effects of bio-additives on the physicochemical properties and mechanical behavior of canola hull fuel pellets. *Renewable Energy*, 132, 296–307. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.003>
- Azócar**, L., Hermosilla, N., Gay, A., Rocha, S., Díaz, J. y Jara, P. (2019, February 1). Brown pellet production using wheat straw from southern cities in Chile. *Fuel*, 237, 823-832. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.039>
- Bekalo**, S. A. y **Reinhardt**, H. W. (2010, October). Fibers of coffee husk and hulls for the production of particleboard. *Materials and Structures*, 43, 1049–1060. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9565-0>
- Bergström**, D., Israelsson, S., Öhman, M., Dahlqvist, S. A., Gref, R. y Boman, C. (2008, December). Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. *Fuel Processing Technology*, 89 (12), 1324–1329. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.06.001>
- Carone**, M.T., Pantaleo, A. y Pellerano, A. (2011, January). Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the

pruning residues of *Olea europaea* L. *Biomass and Bioenergy*, 35 (1), 402–410. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.052>

Choi, L., Sudiarto, S. I. A. y Renggaman, A. (2014, January). Prediction of livestock manure and mixture higher heating value based on fundamental analysis. *Fuel*, 116 (15), 772–780. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.064>

Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>

Demirbas, A. (2008, August). Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2106–2116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.02.020>

Emadi, B, Iroba, K.L. y Tabil, L.G. (2017, July 15). Effect of polymer plastic binder on mechanical, storage and combustion characteristics of torrefied and pelletized herbaceous biomass. *Applied Energy*, 198, 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.027>

Erol, M., Haykiri-Acma, H. y Kucukbayrak, S. (2010, January). Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. *Renewable Energy*, 35 (1), 170-173. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.008>

Esquivel, P. y **Jiménez**, V. M. (2012, May). Functional properties of coffee and coffee by products. *Food Research International*, 46(2), 488-495. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.028>

Fasina O.O. (2008, March). Physical properties of peanut hull pellets. *Bioresource Technology*, 99 (5), 1259-1266. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.02.041>.

Filbak, T., Skjevraak, G., Hoibo, O., Dibdiakova, J. y Jirjis R. (2011, May). The influence of storage and drying methods for Scots pine raw material on mechanical pellet properties and production parameters. *Fuel Processing Technology*, 92 (5) 871-878. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.12.001>.

- García, R., Gil, M.V., Rubiera, F. y Pevida, C.** (2019, September 1). Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. *Fuel*, 251, 739-753. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.141>
- García, R., González-Vázquez, M.P., Pevida, C. y Rubiera, F.** (2018, March 1). Pelletization properties of raw and torrefied pine sawdust: Effect of copelletization, temperature, moisture content and glycerol addition. *Fuel*, 215, 290-297. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.027>
- Gil, M.V., Oulego, P., Casal, M.D., Pevida, C., Pis, J.J. y Rubiera, F.** (2010, November). Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. *Bioresource Technology*, 101 (22), 8859-8867. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.062>
- Gilvari, H., De Jong, W. y Schott, D.L.** (2019, January). Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors - A review. *Biomass and Bioenergy*, 120, 117-134. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.013>
- González-Castillo, Y.A., Rincón-Rincón, S.N., Camargo-Vargas, G.J., Dévora-Isiordia, G.E. y Sierra-Vargas, F.E.** (2014, December). Caracterización de materiales lignocelulósicos residuales de palma de aceite y palma de coco para la fabricación de pellets. *Avances investigación en ingeniería*, 11(1), 83-91. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.304>
- Gouvea, B.M., Torres C., Franca A.S., Oliveira L.S. y Oliveira E.S.** (2009, May 23). Feasibility of ethanol production from coffee husks. *Biotechnology Letters*, 31, 1315-1319. <https://doi.org/10.1007/s10529-009-0023-4>
- Graham, S., Eastwick, C., Snape, C. y Quick, W.** (2017, June 1). Mechanical degradation of biomass wood pellets during long term stockpile storage. *Fuel Processing Technology*, 160, 143-151. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.02.017>

- Guo, M., Song W. y Buhain J.** (2015, February). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712-725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>
- Hossain, M. U., Leu, S. Y. y Poon, C. S.** (2016, February). Sustainability analysis of pelletized bio-fuel derived from recycled wood product wastes in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 113, 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.069>
- Ibeto, C.N., Ayodele, J.A. y Anyanwu, C.N.** (2016). Evaluation of Pollution Potentials and Fuel Properties of Nigerian Sub-Bituminous Coal and its blends with Biomass. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7 (8), 2929-2937. https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol7/vol7_N8/305-JMES-2163-lbeto.pdf
- International Coffee Organization.** (2019). <http://www.ico.org/>
- International Energy Agency.** (2019). *Data and statistics*. <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=TotCO2>
- International Energy Agency.** (2020). *World Oil production*. <http://www.iea.org/fuels-and-technologies/oil>
- International Organization for Standardization.** (2014, May). *ISO 17225-6:2014. Solid Biofuels-Fuel specifications and classes-Part 6: Graded non-woody pellets*. <https://www.iso.org/standard/59461.html>
- International Organization for Standardization.** (2017, April). *ISO 18125:2017. Solid biofuels-Determination of calorific value*. <https://www.iso.org/standard/61517.html>
- Ishii, K., y T. Furuichi.** (2014, December). Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets. *Waste Management*, 34(12), 2621–2626.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.008>

- Jiang, L.**, Liang, J., Yuan, X., Li, H., Li, C. y Xiao, Z. (2014, August). Co-pelletization of sewage sludge and biomass: the density and hardness of pellet. *Bioresource Technology*, 166, 435–443. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.077>
- Li, Y.** y **Liu, H.** (2000, September). High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, 19(3), 177-186. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00026-X)
- Lisowski, A.**, Dąbrowska-Salwin, M., Ostrowska-Ligeza, E., Nawrocka, A., Stasiak, M., Świętochowski, A., Klonowski, J., Sypuła, M. y Lisowska, B. (2017, December). Effects of the biomass moisture content and pelleting temperature on the pressure-induced agglomeration process. *Biomass and Bioenergy*, 107, 376–383. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.029>
- Liu, Z.**, B. Mi, Z. Jiang, B. Fei, y Z. Cai. (2016, February). Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. *Renewable Energy*, 86:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.011>
- Liu, Z.**, Quek, A. y Balasubramanian, R. (2014, January). Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars. *Applied Energy*, 113, 1315-1322. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.087>
- Mani, S.**, Tabil, L. G. y Sokhansanj, S. (2006, July). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30(7), 648–654. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.01.004>
- Mani, S.**, Tabil, L. G. y Sokhansanj, S. (2004, October). Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, 27(4), 339–352. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007>

- Marrugo**, G., Valdés. C.F., Gómez, C. y Chejne, F. (2019, April). Pelletizing of Colombian agro-industrial biomasses with crude glycerol. *Renewable Energy*, 134, 558-568. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.004>
- Miao**, Z., Grift, T.E., Hansen, A.C. y Ting, K.C. (2011, March). Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties. *Industrial Crops and Products*, 33(2), 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.016>
- Miranda**, M. T., Sepúlveda, F. J., Arranz, J. I., Montero, I. y Rojas, C. V. (2018a, August). Physical-energy characterization of microalgae *Scenedesmus* and experimental pellets. *Fuel*, 226, 121–126. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.097>
- Miranda**, M. T., Sepúlveda, F. J., Arranz, J. I., Montero, I. y Rojas, C. V. (2018b, December). Analysis of pelletizing from corn cob waste. *Journal of Environmental Management*, 228, 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.105>
- Mock**, C., Park, H., Ryu, C., Manovic, V. y Choi, S.C. (2020, March). Particle temperature and flue gas emission of a burning single pellet in air and oxy-fuel combustion. *Combustion and Flame*, 213, 156-171. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.11.034>
- Montero**, G., Pasalodos-Tato, M., Lopez-Senespleda, E., Onrubia, R., Bravo-Oviedo, A. y Ruiz-Peinado, R. (2013, June). Contenido de Carbono en la biomasa de las principales especies de matorral y arbustados de España.
- Mostafa**, M.E., Hu, S., Wang, Y., Su, S., Hu, H., Elsayed, S.A. y Xiang, J. (2019, May). The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 332-348. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.053>

- Munawar, S.S. y Subiyanto, B.** (2014). Characterization of Biomass Pellet made from Solid Waste Oil Palm Industry. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 336-341. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.042>
- Murthy P.S., Basavaraj K. y Naidu R.** (2001). Journey of Indian coffee quality. *Journal of Indian Coffee*. 3:18–21.
- Murthy, P. S. y Naidu, M. M.** (2012, September). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition- A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>
- Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S. y Teixeira, J. A.** (2011, March). Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *Food Bioprocess Technology*, 4, 661–672. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>
- Obernberger, I. y Thek, G.** (2004, December). Physical Characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653-669. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>
- Obernberger, I. y Thek, G.** (2010). *The Pellet Handbook – The Production and Thermal Utilisation of Pellets*. Earthscan, London.
- Obernberger, I., Brunner, T. y Barnthaler, G.** (2006, November). Chemical properties of solid fuels e significance and impact. *Biomass Bioenergy*, 30 (11), 973-982. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>
- Pegoretti-Leite de Souza, H.J., Chaves-Arantes, M.D., Baptista-Vidaurre, G., Rogério-Andrade, C., Oliveira-Carneiro, A., Pegoretti-Leite de Souza, D. y Paula-Protásio, T.** (2020, April). Pelletization of eucalyptus wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production. *Renewable Energy*, 149, 128-140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.015>

- Poddar, S., Kamruzzaman, M., Sujan, S. M. A., Hossain, M., Jamal, M. S., Gafur, M. A. y Khanam, M.** (2014, September). Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value. *Fuel*, 131, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.061>
- Pradhan, P., Arora, A. y Mahajani, S.M.** (2018a, April). Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass. *Energy Sustainable Development*, 43, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.11.005>
- Pradhan, P., Mahajani, S. M. y Arora, A.** (2018b, December 1). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215–232. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>
- Ramírez, V., Martí-Herrero, J., Romero, M. y Rivadeneira, D.** (2019, April 1). Energy use of Jatropha oil extraction wastes: Pellets from biochar and Jatropha shell blends. *Journal of Cleaner Production*, 215, 1095–1102. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.132>
- Ríos-Badrán, I. M., Luzardo-Ocampo, I., García-Trejo, J. F., Santos-Cruz, J. y Gutiérrez-Antonio, C.** (2020, January). Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. *Renewable Energy*, 145, 500–507. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.048>
- Rosell, R. A., Gasparoni, J. C y Galantini, J. A.** (2001). Soil organic matter evaluation. In: R Lal et al. (eds). *Assessment Methods for Soil Carbon*. Serie Advances in Soil Science, CRC Press, Boca Raton, FL. Pp. 311-322.
- Said, N., Daiem, M.M.A., García-Maraver, A. y Zamorano, M.** (2015, October). Influence of densification parameters on quality properties of rice straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 138, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.05.011>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.** (2015, Octubre). *Plan de manejo de residuos generados en actividades agrícolas primera etapa: diagnóstico*

nacional.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346978/Manejo_de_residuos_Detallado.pdf

Secretaria de Energía. (2018). *Reporte de avances de energías limpias.* https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/418391/RAEL_Primer_Semestre_2018.pdf

Selvarajoo, A., Lee, C. W., Oochit, D. y Almashjary, K. H. O. (2021). Bio-Pellets from empty fruit bunch and durian rinds with adhesive of cornstarch for potential renewable energy. *Materials Science for Energy Technologies*, 4, 242-248. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.06.008>

Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M. y Portero H. (2011, March). Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 699–706. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.031>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2020). *Estadística de Producción Agrícola.* <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>

Sokhansanj, S., Mani, S., Bi, X., Zaini, P. y Tabil, L. (2005). Binderless pelletization of biomass. *ASAE Annual Meeting*, 056061. <https://doi.org/10.13031/2013.19922>

Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., y Henriksen, U. B. (2011, November). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 90(11), 3285–3290. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>

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

Theerarattananoon, K., Xu, F., Wilson, J., Ballard, R., Mckinney, L., Staggenborg,

S., Vadlani, P., Pei, Z.J. y Wang, D. (2011, March). Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Industrial Crops and Products*, 33(2), 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.11.014>

Tsuchiya, Y. y Yoshida, T. (2017, February). Pelletization of brown coal and rice bran in Indonesia: Characteristics of the mixture pellets including safety during transportation. *Fuel Processing Technology*, 156, 68-71. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.10.009>

Tumuluru, J.S. (2014, March). Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. *Biosystem Engineering*, 119, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.11.012>

Tumuluru, J.S., Wright, C.T., Hess, J.R. y Kenney, K.L. (2011, December). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683–707. <https://doi.org/10.1002/bbb.324>

Van Loo, S. y Koppejan, J. (2003). Handbook of Biomass Combustion and Cofiring, first ed. Twente University Press: Enschede, The Netherlands.

Wang, T., Li, Y., Zhang, J., Zhao, J., Liu, Y., Sun, L., Liu, B., Mao, H., Lin, Y., Li, W., Ju, M. y Zhu, F. (2018, April). Evaluation of the potential of pelletizes biomass from different municipal solid wastes for use as solid fuel. *Waste Management*, 74, 260-266. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.043>

Wattana. W., Phetklung, S., Jakaew, W., Chumuthai, S., Sriam, P. y Chanurai, N. (2017, October). Characterization of mixed biomass pellet made from oil palm and Para-rubber tree residues. *Energy Procedia*, 138, 1128-1133. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.218>

Wohler, M., Jaeger, D., Reichert, G., Schmidl, C. y Pelz, S. K. (2017, May). Influence of pellet length on performance of pellet room heaters under real life operation

conditions. *Renewable Energy*, 105, 66-75.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.047>

Wong-Paz, J. E., Guyot, S., Rodríguez-Herrera, R., Gutiérrez-Sánchez, G., Contreras-Esquivel, J. C., Saucedo-Castañeda, G. y Aguilar, C. N. (2013, diciembre 29). Alternativas Actuales para el Manejo Sustentable de los Residuos de la Industria del Café en México. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 5(10), 33-40.
<http://www.actaquimicamexicana.uadec.mx/articulos/AQM10/6%20alternativas.pdf>

Zamorano, M., Popov, V., Rodríguez, M.L. y Garcia-Maraver, A. (2011, November). A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues. *Renewable Energy*, 36(11), 3133-3140,
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.020>

Zawislak, K., Sobczak, P., Kraszkiwicz, A., Niedziolka, I., Parafiniuk, S., Kuna-Broniowska, I., Tanas, W., Zukiewicz-Sobczak, W. y Obidzinski, S. (2020, January). The use of lignocellulosic waste in the production of pellets for energy purposes. *Renewable Energy*, 145, 997-1003.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.051>

Zeng, T., Pollex, A., Weller, N., Lenz, V. y Nelles, M. (2018, January 15). Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Effect of blending on slag formation in the bottom ash and pre-evaluation options. *Fuel*, 212, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.036>

Zeng, T., Weller, N., Pollex, A. y Lenz, V. (2016, November 15). Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices. *Fuel*, 184, 689-700. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.047>