

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

***“Caracterización de pellets con fines energéticos
elaborados a partir de residuos forestales”***

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería Agrícola
como requisito para optar por el grado de

Licenciatura en Ingeniería Agrícola

Tonny Carrillo Paniagua

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica
2015

**“CARACTERIZACIÓN DE PELLETS CON FINES ENERGÉTICOS
ELABORADOS A PARTIR DE RESIDUOS FORESTALES”**

Trabajo Final de Graduación sometido a evaluación de la Escuela de Ingeniería Agrícola,
Facultad de Ingeniería,
Universidad de Costa Rica,
como requisito para optar por el grado de:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA



Tonny Carrillo Paniagua
Sustentante

Aprobado por el Tribunal Examinador:



Ing. Giovanni Carmona Villalobos
Presidente, Tribunal Examinador




Ing. Pedro Casanova Treto, D.Sc.
Director, Equipo Asesor



Ing. Kattia Solís Ramírez, D.Sc.
Miembro, Equipo Asesor



Dr. Juan Valdés González
Miembro, Equipo Asesor



Ing. Juan Roberto Mora Chaves
Miembro, Tribunal Examinador

DEDICATORIA

A mi madre Jenny y mi abuelita Virginia...

*Lo que más deseo en esta vida,
es poder retribuirles todo su esfuerzo y sacrificio.*

AGRADECIMIENTOS

A Pedro, por permitirme desarrollar este tema de investigación, por reafirmar en mí el valor de las cosas bien hechas; y lo que para mí fue lo más importante, mantuvo su confianza en mi trabajo durante todo este tiempo, a pesar de todas las vicisitudes que encontramos en el camino.

A Kattia, que desde el principio me brindó todo su apoyo, tanto con observaciones y sugerencias para el desarrollo del trabajo, así como su ayuda en temas administrativos, además su constante interés por mi bienestar personal.

A don Juan, por sacar siempre el tiempo necesario para atenderme, por sus numerosos aportes y sugerencias, estos tuvieron un peso importantísimo para la conclusión satisfactoria de este trabajo.

Al personal de la Unidad de Recursos Forestales, en especial a Pedro Rojas y Jennifer Ramírez por todo su apoyo y amistad.

Al personal del Laboratorio de Química de la Atmósfera, en especial a Brenda Salazar, Wendy Villalobos y Marieth Serrano, por toda su paciencia y ayuda.

A Eduardo Rojas, del taller de mecánica de precisión de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su colaboración en la primera etapa de este trabajo.

A Erick Castellón y Freddy Benavides del Laboratorio de Físicoquímica de la Escuela de Química, por su ayuda en parte de esta investigación.

A la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, por el apoyo financiero brindado.

Al personal de la Escuela de Ingeniería Agrícola que en algún momento me ayudó a lo largo de todos estos años.

A la Universidad de Costa Rica, y a su solidario sistema de becas, sin el cual difícilmente hubiese podido llegar hasta aquí.

A mis hermanos, hermanas, amigos y amigas, sus palabras de apoyo serán siempre recordadas y agradecidas.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
RESUMEN	ix
INTRODUCCIÓN.....	x
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE.....	1
1.1. Panorama energético mundial y desarrollo de tecnologías en bioenergía.....	1
1.1.1. <i>Energías renovables y su perspectiva mundial.....</i>	3
1.1.2. <i>La biomasa como fuente de energía renovable.....</i>	5
1.1.3. <i>Estado del aprovechamiento de la energía de la biomasa.....</i>	6
1.2. Densificación de biomasa: Desarrollo tecnológico e investigación.....	9
1.2.1. <i>Desarrollo de tecnologías en densificación mecánica de biomasa.....</i>	10
1.2.2. <i>Elaboración de pellets a nivel de laboratorio y estudio de sus propiedades.....</i>	15
1.3. Perfil de producción, consumo y mercado de pellets con finalidad energética.....	24
1.3.1. <i>Tendencias y perspectivas a futuro del mercado de pellets.....</i>	26
1.3.2. <i>Producción y consumo del pellet como combustible: el caso de Costa Rica.....</i>	28
1.4. Normativa vigente a nivel internacional para la calidad de pellets con fines energéticos.....	29
CAPÍTULO 2. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE INTERÉS Y SELECCIÓN DEL RESIDUO BIOMÁSICO.....	34
2.1. Sectorización y descripción de la zona de interés.....	34
2.2. Capacidad y uso del suelo en el cantón de Pococí.....	34
2.3. Principales actividades económicas/productivas del cantón de Pococí.....	35
2.4. Potencial de generación y manejo de residuos biomásicos de las principales actividades agrícolas y forestales del cantón de Pococí.....	40
2.4.1. <i>Biomasa residual agrícola.....</i>	41
2.4.2. <i>Residuos biomásicos forestales.....</i>	43
2.5. Selección del residuo biomásico para la etapa de elaboración de pellets.....	45
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	46
3.1. Recolección de los residuos biomásicos de aserradero.....	46
3.2. Elaboración de los pellets en el laboratorio.....	46
3.2.1. <i>Pretratamiento de la biomasa.....</i>	46
3.2.2. <i>Equipo y metodología empleada para elaborar los pellets.....</i>	48

3.3. Caracterización de los pellets	50
3.3.1. <i>Propiedades físicas</i>	50
3.3.2. <i>Propiedades térmicas</i>	52
3.3.3. <i>Propiedades fisicoquímicas</i>	55
3.4. Modelo estadístico del experimento y análisis estadístico de los datos.....	58
3.5. Incertidumbre de los resultados	58
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
4.1. Propiedades físicas	60
4.2. Propiedades térmicas	73
4.3. Propiedades fisicoquímicas.....	76
4.4. Comparación general de los resultados contra normativas de calidad de pellets.....	83
CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES.....	88
REFERENCIAS.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Consumo de energía primaria en el mundo.	1
Figura 1.2. Distribución porcentual del consumo energético mundial.....	2
Figura 1.3. Proyección del consumo energético internacional.....	3
Figura 1.4. Generación mundial de energía renovable por tipo.	5
Figura 1.5. Estado de madurez de las tecnologías en bioenergía.....	8
Figura 1.6. Capacidad de generación eléctrica a partir de biomasa por región en el 2010.	8
Figura 1.7. Equipo densificador equipado con un tornillo extrusor.....	13
Figura 1.8. Densificadora de pistón.....	14
Figura 1.9. Peletizadora de rodillos verticales.....	15
Figura 1.10. Unidad de peletizado de laboratorio.....	16
Figura 1.11. Montaje de laboratorio para producir pellets.....	18
Figura 1.12. Equipo de peletizado cilindro-pistón de laboratorio.....	18
Figura 1.13. Esquema del equipo empleado para medir la conductividad térmica de pellets.....	20
Figura 1.14. Estado de la producción anual de pellets y proyección a futuro. Fuente:.....	25
Figura 1.15. Estado del consumo mundial de pellets y proyección a futuro.....	25
Figura 1.16. Flujo mundial de comercio de pellets.....	27
Figura 2.1. Ubicación geográfica de Pococí.....	35
Figura 2.2. Distribución distrital de Pococí.....	35
Figura 2.3. Capacidad potencial de uso del suelo de Pococí.....	36
Figura 2.4. Población ocupada en las principales actividades económicas de la región atlántica.	38
Figura 2.5. Distribución de las actividades agropecuarias en la Región Huetar Atlántica.	38
Figura 2.6. Áreas de conservación en la Región Atlántica Norte y distribución de aserraderos.....	39
Figura 2.7. Residuos generados en la industria maderera.....	44
Figura 3.1. Recolección de los residuos de aserradero.	46
Figura 3.2. Etapas de preparación de la biomasa previas al peletizado.	47
Figura 3.3. Equipo empleado para el pretratamiento de la biomasa.....	47
Figura 3.4. Equipo experimental empleado para elaborar los pellets.....	48
Figura 3.5. Equipo empleado para determinar la densidad aparente.....	50
Figura 3.6. Procedimiento y equipo empleado para determinar la densidad unitaria.	51
Figura 3.7. Equipo empleado para determinar la dureza mecánica.	52
Figura 3.8. Esquema del equipo empleado para determinar las propiedades térmicas.....	53
Figura 3.9. Equipo empleado para determinar el poder calorífico superior de las muestras.	56
Figura 3.10. Equipo empleado para determinar el contenido de azufre y cloro.....	57
Figura 3.11. Método Kjeldahl para la determinación del contenido de Nitrógeno.	57
Figura 4.1. Resultados de la determinación de la densidad unitaria en los distintos tratamientos aplicados.	61
Figura 4.2. Resultados de la determinación de la densidad aparente en los distintos tratamientos aplicados.	66
Figura 4.3. Resultados de la determinación de la dureza mecánica para los distintos tratamientos aplicados.	70
Figura 4.4. Perfil de temperatura obtenido con el equipo experimental construido para la determinación propiedades térmicas..	74
Figura 4.5. Contenido de cenizas presente en los pellets elaborados bajo los distintos tratamientos.....	77
Figura 4.6. Poder calorífico superior determinado en los distintos tratamientos.	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Poderes caloríficos de residuos biomásicos de interés en Costa Rica.	6
Tabla 1.2. Métodos de densificación de biomasa.	11
Tabla 1.3. Algunas relaciones y valores empíricos para calor específico y conductividad térmica de materiales biomásicos.	22
Tabla 1.4. Normas establecidas por el Comité Europeo de Normalización.	32
Tabla 1.5. Especificaciones para las normas de calidad de pellets y briquetas oficiales en Europa.	33
Tabla 2.1. Hectáreas destinadas a las principales actividades de corte agrícola en Pococí.	39
Tabla 3.1. Tratamientos y sus niveles.	49
Tabla 4.1. Resultados obtenidos en la determinación de la densidad unitaria.	60
Tabla 4.2. Análisis de varianza para las densidades unitarias determinadas ($\alpha = 0,05$).	63
Tabla 4.3. Comparación entre medias de ρ_u para las combinaciones de tratamientos.	64
Tabla 4.4. Resultados obtenidos en la determinación de la densidad aparente.	65
Tabla 4.5. Análisis de varianza para las densidades aparentes determinadas ($\alpha = 0,05$).	67
Tabla 4.6. Comparación entre medias de ρ_a para las combinaciones de tratamientos.	67
Tabla 4.7. Resultados obtenidos en la determinación de la dureza mecánica.	69
Tabla 4.8. Análisis de varianza para la dureza mecánica determinada ($\alpha = 0,05$).	71
Tabla 4.9. Comparación entre medias de DU para las combinaciones de tratamientos.	71
Tabla 4.10. Conductividad térmica (k), difusividad térmica (α) y calor específico (C_p) determinados experimentalmente.	75
Tabla 4.11. Contenido de cenizas en los pellets elaborados bajo los distintos tratamientos.	76
Tabla 4.12. Análisis de varianza para los contenidos de cenizas determinados ($\alpha = 0,05$).	77
Tabla 4.13. Comparación entre medias de contenido de cenizas en cada tratamiento.	78
Tabla 4.14. Poder calorífico determinado en los distintos tratamientos aplicados.	79
Tabla 4.15. Análisis de varianza para los PCS determinados ($\alpha = 0,05$).	80
Tabla 4.16. Comparación entre medias de contenido de cenizas en cada tratamiento.	80
Tabla 4.17. Resultados de la determinación del contenido de N, Cl y S.	82
Tabla 4.18. Comparación contra normas de los resultados de propiedades físicas.	84
Tabla 4.19. Comparación contra normas de los resultados de propiedades fisicoquímicas.	84

RESUMEN

Se realizó la caracterización de pellets fabricados a partir de residuos de aserradero, producto del aprovechamiento de las especies Pílon (*Hyeronima alchorneoides*) y Eucalipto (*Eucalytus spp*). Equipo de diseño experimental fue empleado para elaborar pellets bajo distintas condiciones de densificación. Parámetros como el diámetro (8 mm – 10 mm), la fuerza de compresión (300 kgf – 500 kgf) y la temperatura (90 °C – 105 °C), fueron modificados con el objetivo de evaluar su efecto sobre propiedades físicas (densidad unitaria, aparente y dureza mecánica), propiedades térmicas (conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico) y propiedades fisicoquímicas (poder calorífico, contenido de cenizas). También se determinó el contenido de nitrógeno, cloro y azufre presente en la biomasa. Posteriormente los resultados fueron comparados con lo estipulado en normativas internacionales para la calidad de pellets.

La densidad unitaria, aparente y la dureza mecánica determinada, tuvieron valores entre los 0,856 kg/dm³ y 1,093 kg/dm³, 480,0 kg/m³ y 603,0 kg/m³, y 96,1 % a 97,5 % respectivamente. En la determinación de las propiedades térmicas se obtuvieron valores entre los 0,253 W/m·K y 0,279 W/m·K para la conductividad térmica, $1,748 \times 10^{-7}$ m²/s y $2,314 \times 10^{-7}$ m²/s para la difusividad térmica, y en el caso del calor específico se determinaron valores entre los 3,019 kJ/kg·K y 2,183 kJ/kg·K. Las propiedades fisicoquímicas como el poder calorífico superior tuvieron valores entre los 18 837 kJ/kg y 18 984 kJ/kg, el contenido de cenizas fue de un 1,31% (b.s.). Finalmente, se estimó que el contenido de nitrógeno, cloro y azufre presente en la biomasa empleada, corresponde a un 0,1129 %, 0,0592 % y 0,0317 % respectivamente.

Los resultados indican que las propiedades físicas fueron las más sensibles a las condiciones de densificación estudiadas, encontrándose un efecto significativo principalmente, con el aumento de la fuerza de compresión y la disminución del diámetro. La temperatura de peletizado tuvo menor incidencia sobre las propiedades físicas. Se determinó una relación directa entre el aumento de la densidad aparente de los pellets y las propiedades térmicas. Las propiedades fisicoquímicas no se vieron afectadas de forma significativa por los tratamientos aplicados. El contenido estimado de N, Cl y S corresponde al esperado en la biomasa seleccionada. La comparación de las propiedades de los pellets elaborados bajo las condiciones de densificación estudiadas, contra normativas, mostró resultados aceptables, entrando estos dentro de lo establecido en diferentes categorías de calidad.

INTRODUCCIÓN

Según Arauz (2011), las actividades agrícolas ocupan 1 800 000 hectáreas en Costa Rica, lo que equivale al 35,3 % del territorio nacional. En consecuencia de lo anterior, la generación y la gestión de los residuos biomásicos toma vital importancia, ya que un manejo no adecuado de estos puede convertirlos en una seria problemática ambiental.

Por su parte, Villalobos & Alvarado (2013) señalan que la producción de residuos biomásicos lignocelulósicos, energéticamente aprovechables de las principales actividades agrícolas a nivel nacional (incluye piña, café, banano, palma y arroz, en orden de mayor a menor producción), alcanza las 6 500 000 ton/año aproximadamente, poniendo en evidencia el potencial biomásico del país, por lo que es de vital importancia el estudio y la implementación de tecnologías para el aprovechamiento de la energía de los residuos disponibles.

Sin embargo, la biomasa por sus características intrínsecas posee una baja densidad energética, por lo que si se desea explotar en mayor proporción su potencial y mejorar la eficiencia del proceso de obtención de energía, es necesario aumentar su densidad, incrementándose así la cantidad de energía calorífica que puede ser liberada por unidad de volumen. Este proceso se realiza comúnmente de forma mecánica (densificación de material con maquinaria especial), y para el caso, los pellets son un ejemplo del producto obtenido mediante este tipo de técnicas de densificación (Tumuluru, Wright, Hess, & Kenney, 2011).

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (2013) (IRENA por sus siglas en inglés), diversos estudios indican que el proceso de elaboración de pellets a partir de biomasa, no solo corresponde a una densificación de la energía que esta contiene, sino que significa un aporte en el manejo de los residuos sólidos, y a la problemática asociada con su gestión. Además, el proceso de elaboración de pellets significa una reducción de los costos de transporte del material, y provee mejores características de manejo y almacenamiento a este combustible biomásico, por lo que se puede considerar el pelletizado, como una opción para contrarrestar la problemática de exceso de residuos normalmente generado en las actividades agroindustriales y forestales.

Por tanto, se conjuntan la importancia de encontrar fuentes de energías alternativas a los combustibles fósiles, para neutralizar las emisiones de gases invernadero, y la necesidad de realizar un manejo adecuado de los residuos. De ahí que los esfuerzos realizados en búsqueda y estudio de alternativas energéticas menos contaminantes, y que a su vez aprovechen eficientemente los residuos biomásicos disponibles, es tema de vital importancia dada la realidad energética y ambiental de la actualidad.

Con base en los argumentos anteriores, en el presente trabajo se plantea el esquema con el cual se estudió un residuo biomásico para la elaboración de pellets, y se evaluó si sus propiedades como combustible densificado, cumplen con las normativas internacionales para la calidad de este tipo de biocombustibles.

El objetivo general de esta investigación fue evaluar las propiedades físicas, térmicas y fisicoquímicas de pellets con fines energéticos, elaborados a partir de un residuo biomásico del cantón de Pococí, Limón, Costa Rica. Para esto se plantearon los siguientes objetivos específicos.

1. Identificar las actividades agroindustriales y forestales del cantón de Pococí, y los residuos biomásicos de estas que posean potencial para la elaboración de pellets.
2. Seleccionar uno de los residuos biomásicos de la zona con base en la abundancia, y la afinidad de este para su utilización en la elaboración de pellets.
3. Fabricar con el residuo seleccionado, pellets a nivel de laboratorio, bajo distintas condiciones de densificación.
4. Determinar las propiedades físicas, térmicas y fisicoquímicas de los pellets.
5. Evaluar el efecto de las condiciones de densificación sobre las propiedades determinadas.
6. Comparar las propiedades físicas y fisicoquímicas de los pellets, de acuerdo con lo estipulado en normativas internacionales de calidad.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

1.1. Panorama energético mundial y desarrollo de tecnologías en bioenergía

El acelerado crecimiento poblacional y la necesidad de energía para las distintas actividades humanas, han provocado que el consumo energético mundial en sus fuentes primarias también haya crecido. Se estima que el consumo mundial energético a partir de petróleo, gas natural, carbón mineral, energía nuclear, energía hidroeléctrica y fuentes renovables, alcanzó las 12 470 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep) en el año 2012, lo que corresponde aproximadamente a 52×10^{18} J o 145×10^{12} kWh, de los cuales entre un 80 % y 85 % fueron obtenidos directamente de combustibles fósiles (BP, 2013).

Lo anterior se presenta en la Figura 1.1, donde se muestra un preocupante desbalance en el empleo de energías no renovables y renovables, cuyo comportamiento debe ser corregido con la finalidad de disminuir las emisiones de gases invernadero, causantes del calentamiento global, así como disminuir el consumo de combustibles fósiles y combatir la crisis energética mundial que esto genera.

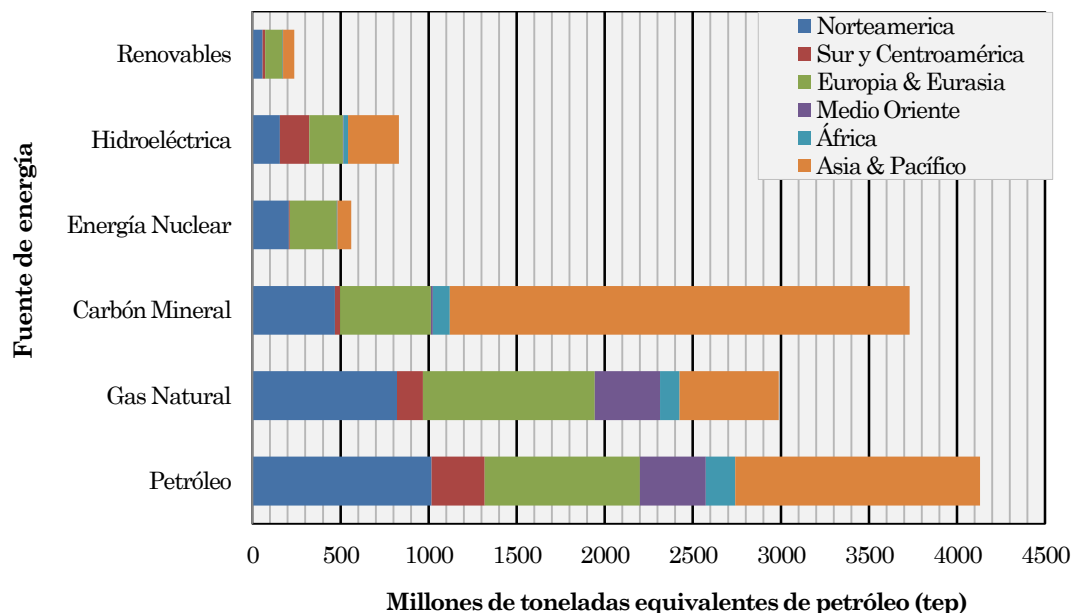


Figura 1.1. Consumo de energía primaria en el mundo.
Fuente: (BP, 2013)

Además, la Agencia Internacional de Energía (2007) (IEA por sus siglas en inglés) indica que si las tendencias económicas de los últimos años se mantienen, para el año 2030 se prevé que el consumo de energía primaria mundial crecerá en un 57%, esto independientemente si se diese o no una tendencia de aumento en el empleo de energías renovables.

La Figura 1.2 muestra la distribución porcentual del consumo energético mundial segmentado por zonas continentales, donde se nota la alta dependencia del petróleo, gas natural y carbón mineral. Con baja participación se nota la energía nuclear, y para el caso de la energía, hidroeléctrica se vislumbra un panorama más alentador, principalmente en Suramérica y Centroamérica. Sin embargo, el bajo consumo de energías renovables (incluye energía eólica, geotérmica, solar y aprovechamiento de biomasa) a nivel mundial es notable, siendo mínimo en regiones como el Medio Oriente y África.

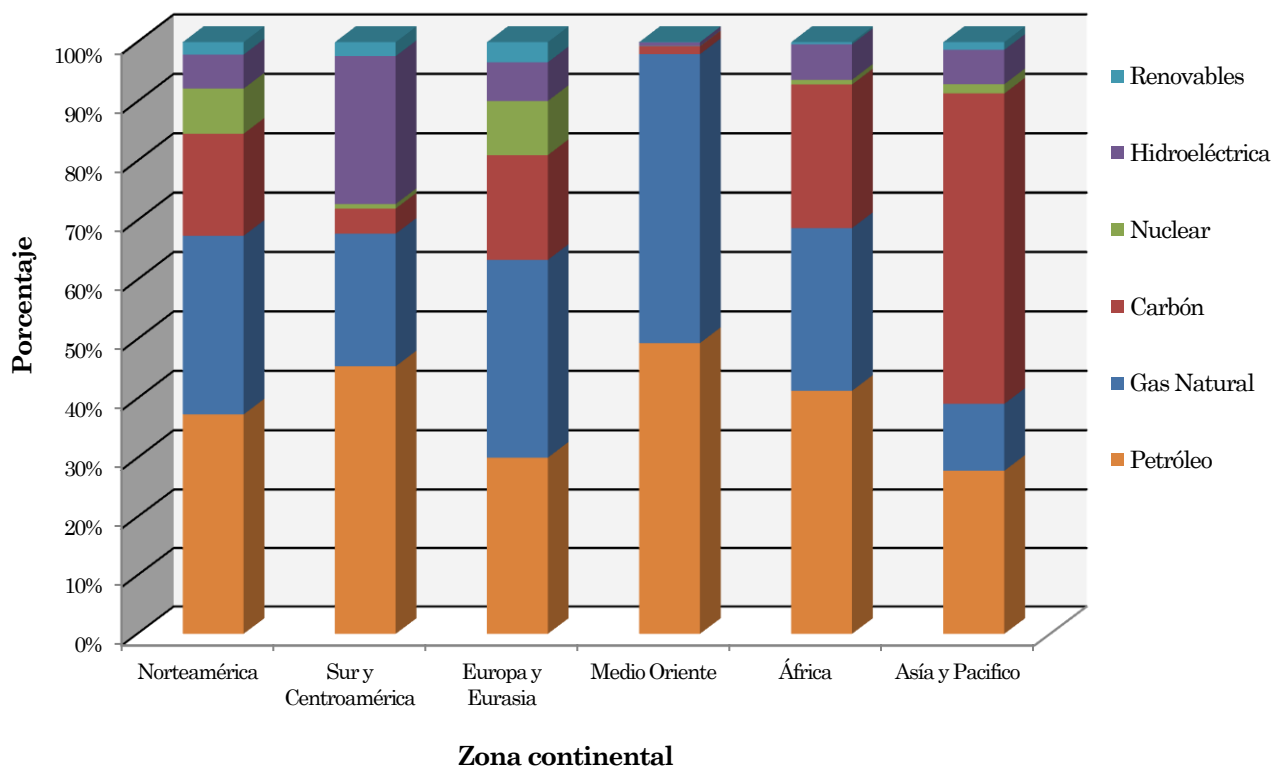


Figura 1.2. Distribución porcentual del consumo energético mundial.
Fuente: (BP, 2013)

En la Figura 1.3 se muestran las proyecciones de consumo energético mundial para los principales sectores productivos según Tokman (2008). En esta se evidencia el sector transporte e industrial como los principales consumidores energéticos, además, se nota la cantidad significativa de pérdidas debido a la transformación de las fuentes en sus variantes. Tokman (2008) también señala, que las tasas medias de crecimiento anual de los consumos varían significativamente entre los países dependiendo del ritmo y del tipo de crecimiento económico, por lo que se estima que los países en desarrollo tendrán ritmos de crecimiento económico visiblemente mayores, lo cual junto a la industrialización acelerada y la urbanización determinará el crecimiento de su demanda.

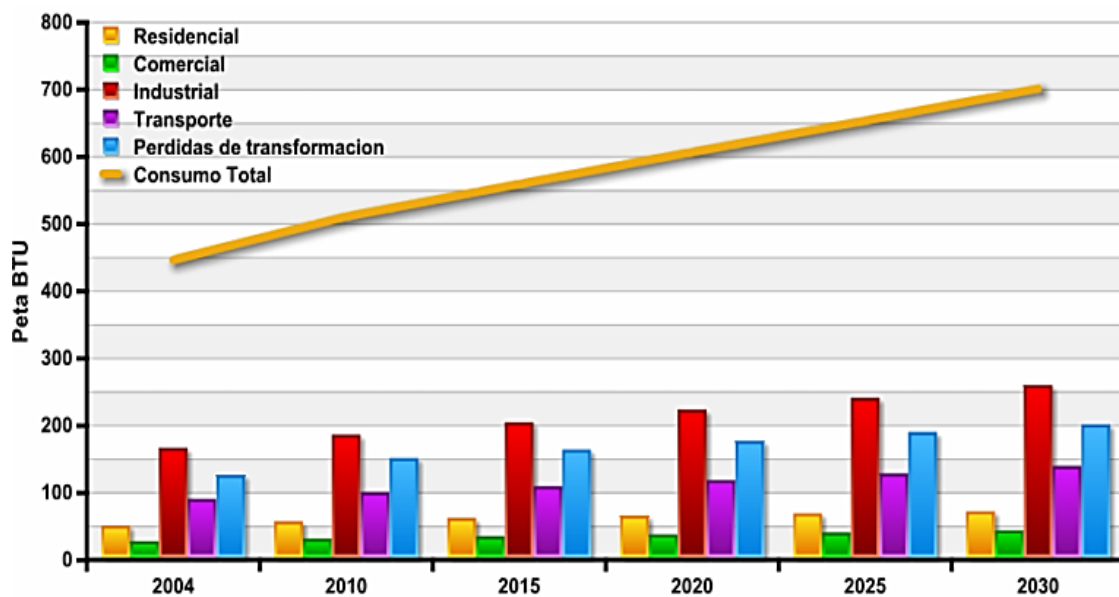


Figura 1.3. Proyección del consumo energético internacional.
Fuente: (Tokman, 2008)

1.1.1. Energías renovables y su perspectiva mundial

La IEA (2013) publica en sus informes de “*Estadísticas Claves Energéticas Mundiales*”, que para mantener el crecimiento económico hasta el 2030, se necesita aumentar la producción hasta los 121 millones de barriles diarios de petróleo, es decir, una tasa de crecimiento anual del 3%. De lo anterior surge una duda, ¿de dónde provendrán los 37 millones de barriles diarios en el 2030, cuando la producción en las principales regiones petroleras desciende cada año, y la

producción mundial se mantiene en menos de 85 millones de barriles diarios? (Hernández, 2008). Respecto a lo anterior y referente a las energías renovables, la Administración de Información Energética Estadounidense (EIA por sus siglas en inglés) (2007), indica que se prevé un aumento de su demanda (energías renovables), explicado por la conciencia sobre sus bajos impactos ambientales, como por los altos precios de los combustibles fósiles. Y aunque se espera aumento en la participación de este tipo de energías en el consumo primario mundial, este será relativamente bajo, pasando de un 7 % del consumo primario en 2004 hasta un 8 % en el año 2030. Por lo que este cambio de rumbo del empleo de energías renovables, está asociado a los potenciales avances tecnológicos futuros, y el compromiso de las naciones en solventar la problemática energética/ambiental que se aproxima.

En lo que al estado actual y perspectivas futuras en el aprovechamiento y consumo de energías renovables se refiere, la Figura 1.4 muestra las proyecciones esperadas por la IEA (2013), además apunta a que con los años, el rendimiento de la energías renovables mejorará, aumentará su despliegue y se ampliarán sus mercados a nivel mundial. Esto se conseguirá mejorando la competitividad económica de estas tecnologías, para lo cual, el apoyo de políticas gubernamentales eficaces es vital (incluidas las reformas de diseño de mercado para facilitar la integración en la red energética). Además, la IEA (2011) señala que durante la última década el crecimiento de las energías renovables ha sido desigual en el mundo, e impulsada principalmente por apoyos gubernamentales.

Por ejemplo, en lo que a energía eólica se refiere, China se convirtió en el líder mundial en términos de capacidad instalada en muy poco tiempo, superando a la de Estados Unidos en el 2010. Alemania sigue liderando mundialmente en capacidad fotovoltaica solar, seguido por España y Japón. Estados Unidos tiene la mayor capacidad geotérmica del mundo seguido de Filipinas, Indonesia, México e Italia. China es el principal productor de energía hidroeléctrica, seguido por Estados Unidos, Brasil, Canadá y Rusia. Y respecto a la bioenergía nuevamente Estados Unidos lidera seguido por Alemania, Suecia, Finlandia y el Reino Unido (IEA, 2011).

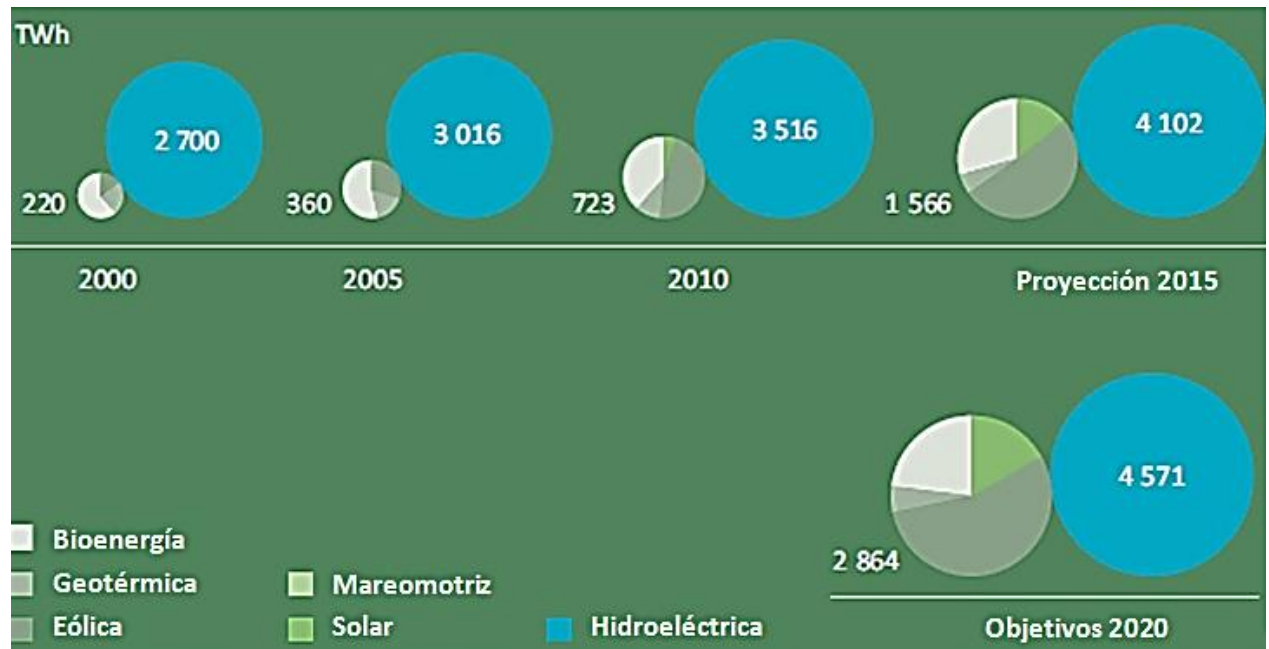


Figura 1.4. Generación mundial de energía renovable por tipo.
Fuente: (IEA, 2013)

1.1.2. La biomasa como fuente de energía renovable

Antolín (2006) apunta que la biomasa supone una fuente de energía más limpia, y que su aprovechamiento supone una reducción en la dependencia energética de los combustibles fósiles. También señala que existen diversos residuos que se pueden englobar como biomasa, por lo que una adecuada caracterización es vital para conocer el potencial energético que estos poseen.

Por otra parte, para la mayoría de los procesos de conversión energética de la biomasa, se requiere que esta tenga un contenido de humedad inferior al 30%, y en general, el contenido energético de los restos agrícolas ronda entre los 3,5 kWh/kg y 5,5 kWh/kg, lo cual es menor al de los restos de madera, que pueden alcanzar los 4 kWh/kg hasta los 6 kWh/kg (Antolín, 2006). En la Tabla 1.1 se tabulan valores de poder calorífico superior para algunos residuos biomásicos seleccionados y de interés energético en Costa Rica.

Tabla 1.1.

Poderes caloríficos de residuos biomásicos de interés en Costa Rica.

<i>Material</i>	<i>Poder Calorífico Superior (kJ/kg)</i>	
	<i>Experimental</i>	<i>Teórico</i>
Cascarilla de arroz	15 150	15 838
Cascarilla de café	19 270	18 700
Broza	18 260	12 870
Cascarilla de coquito	22 810	22 200
Pinzote de palma	18 685	-----
Fibra de mesocarpio de palma	19 025	18 400
Pinzote de banano	14 790	16 338
Rastrojo de piña	15 491	-----
Melina	19 906	15 687
Teca	20 165	20 934
Bagazo de caña	19 070	16 662

Fuente: (Villalobos & Alvarado, 2013)

De forma complementaria, Fernández (2012) afirma que al emplear biomasa como fuente energética, las emisiones de CO₂ que se producen no alteran el equilibrio de la concentración de carbono atmosférico, y por tanto contribuye de forma activa a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero. También plantea que la gestión y aprovechamiento energético sostenible de la biomasa, está íntimamente ligado al desarrollo socioeconómico en el medio rural y de las naciones en general, esto debido a que contribuye a elevar la producción de energía renovable alternativa, lo que conlleva una menor dependencia de la importación de combustibles fósiles.

1.1.3. Estado del aprovechamiento de la energía de la biomasa

La IRENA (2012) señala que existen muchas ventajas en el empleo de la biomasa en lugar de combustibles fósiles para obtener energía; estas incluyen la disminución de emisión de gases de invernadero, reducción del costo de la energía, mejora del aseguramiento del abastecimiento energético, mejor manejo/reducción de residuos y oportunidades de desarrollo económico asociado a la implementación de proyectos en bioenergía. Sin embargo, que estos beneficios sean alcanzados dependerá de forma crítica del acceso a las tecnologías de aprovechamiento, así como de la cantidad de fuentes, y calidad del recurso biomásico que pueda ser empleado como materia prima.

La generación de energía a partir de biomasa se puede conseguir con una amplia gama de materias prima y tecnologías. En cada caso, el margen de tecnologías o soluciones probadas comercialmente varía significativamente, esto por el consolidado estado de algunas formas de aprovechamiento como por ejemplo la combustión, así como el caso de tecnologías que apenas empiezan a desplegarse a escala comercial, como es el caso de la gasificación (Figura 1.5).

Además, existen otras tecnologías que se encuentran en una etapa más temprana de desarrollo y que necesitarán más tiempo para observar su empleo de forma sostenible. Otro aspecto a considerar es que por variaciones en las fuentes de materia prima, algunas tecnologías no terminan de consolidarse, y en algunos casos no se adaptan a escalas de aplicación comercial/energética mayores (IRENA, 2012).

Sobre el estado del aprovechamiento energético de la biomasa, la IEA (2007b) indica que abundantes recursos y políticas favorables se están expandiendo por Europa (principalmente en la cogeneración a partir de residuos madereros), en Estados Unidos y Brasil se ha consolidado la producción de electricidad a partir del bagazo de la caña de azúcar. También, proliferan pequeños proyectos que incluyen aplicaciones de biodigestión en países en desarrollo. La IEA también señala, que la generación energética a partir de biomasa en el mundo llegó a la capacidad de 47 GW en la primera década del siglo XXI (Figura 1.6).

Proyecciones sugieren que la biomasa incrementará su potencial de producción eléctrica de un 1,3 % para el 2006, hasta un 3 % o 5 % para el 2050. Lo anterior podría considerarse una contribución muy leve, sin embargo es necesario mencionar, que la biomasa también es empleada en la generación de calor exclusivamente, y en la producción de biocombustibles para vehículos. En el 2011, a nivel mundial la generación de electricidad a partir de biogás, residuos municipales y biocombustibles alcanzó un estimado de 310 TWh, 30 TWh más que la capacidad calculada para 2010 (IEA, 2007b).

Referente al horizonte futuro, la IEA (2007b) apunta que en el corto plazo, las plantas de cogeneración de electricidad a partir de biomasa se mantienen como las más rentables en términos económicos. A mediano plazo, las plantas con ciclos integrados de gasificación y turbinas serán una opción más eficiente que las plantas con ciclos combinados térmicos y eléctricos convencionales, por su parte las biorefinerías podrían expandirse significativamente.

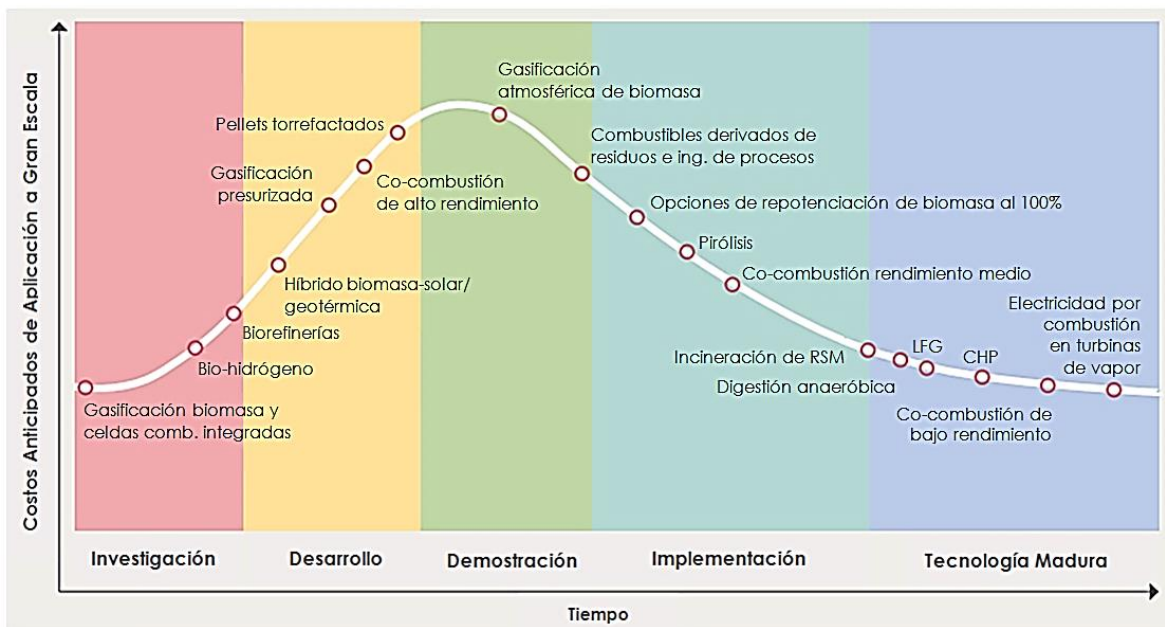


Figura 1.5. Estado de madurez de las tecnologías en bioenergía.
Fuente: (IRENA, 2012)

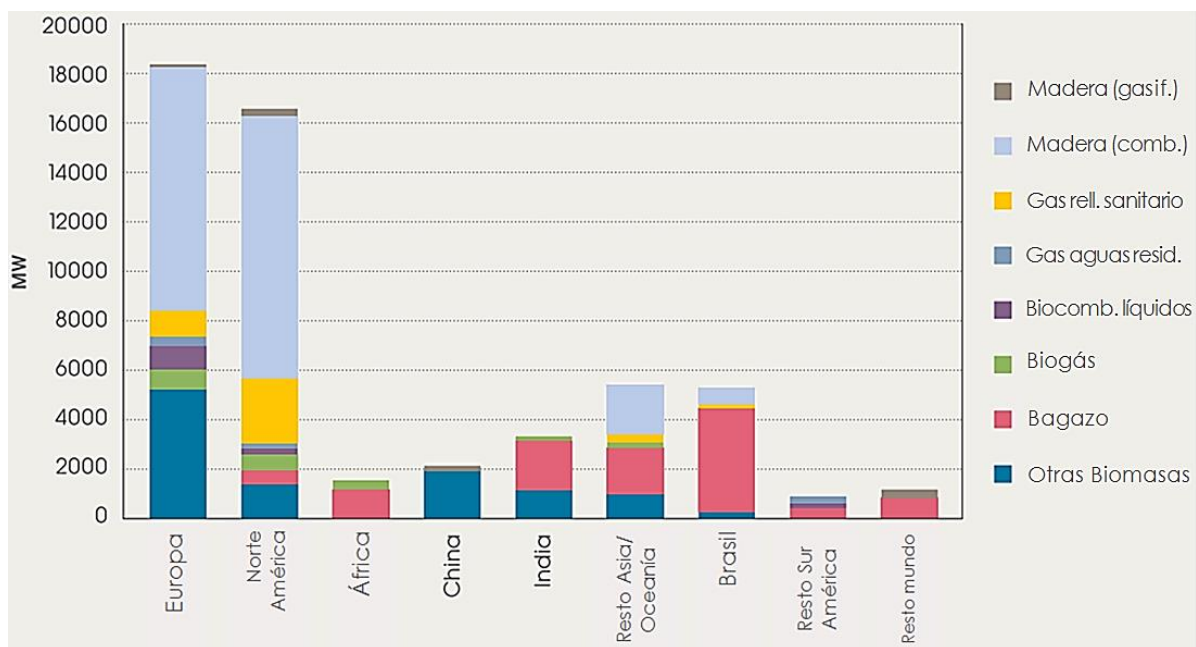


Figura 1.6. Capacidad de generación eléctrica a partir de biomasa por región en el 2010.
Fuente: (Platts, 2011)

Además, la IEA (2013) señala que la generación eléctrica a partir de biomasa alcanzará los 530 TWh en el 2017, y se espera que los mayores avances se den en naciones como China, Brasil, Japón, Estados Unidos y países nórdicos europeos. Por otra parte, algunas materias bioenergéticas como los pellets y las briquetas elaboradas de residuos de madera, son actualmente objeto de comercio internacional, tendencia no muy común para fuentes de energía renovable.

1.2. Densificación de biomasa: Desarrollo tecnológico e investigación

Según IRENA (2013), para la generación de energía a partir de biomasa es crítico asegurar a largo plazo el suministro de materia prima de bajo costo. También señala que los costos de materia prima biomásica pueden ser nulos para residuos que de otra forma resultaría un costo desecharlos, de ahí la oportunidad de obtener algún beneficio de estos tanto en términos energéticos, y económicos consecuentemente.

Además, IRENA (2012) señala que mejorar la densidad energética de la materia prima, colabora a reducir los costos de transporte y mejora la eficiencia en cualquiera que sea el método de aprovechamiento energético de la biomasa. La principal forma de obtener el mejor rendimiento densidad/energía de la biomasa (por ejemplo en aprovechamientos que involucren combustión en alguna de sus variantes) es mediante procesos de secado, ya sea de forma natural o medios forzados, además de opciones como la torrefacción o procesos de densificación como la elaboración de pellets o briquetas. Aunque estos procesos aumentan el costo final de la materia prima debido a la energía consumida para el pre-tratamiento de la biomasa, normalmente con ellos se logra reducir el precio de esta por unidad de energía que se genera al final del proceso.

La investigación relacionada con los procesos de disminución de costos del pretratamiento, y rendimiento energético final de la biomasa está en curso. Por ejemplo, se ha demostrado que los pellets pueden ofrecer una mayor eficiencia en la generación eléctrica mediante combustión, pero el inconveniente es que a menudo el proceso de peletización conlleva un aumento significativo de los costos, sin embargo, también se tiene que los costos de

almacenamiento y transporte del pellet son significativamente más bajos que otras opciones de densificación (IEA, 2007c). En la Tabla 1.2 hace referencia a los métodos de densificación comúnmente empleados.

Clarke, Eng, & Preto (2011) hacen referencia a las siguientes ventajas de la densificación de la biomasa para su empleo en combustión

- Simplifican el manejo mecánico y alimentación de combustible.
- Se logra una combustión más uniforme.
- Reduce la producción de polvos en las plantas de proceso.
- Reduce las posibilidades de combustión espontánea en el almacenaje.
- Simplifica el diseño de la infraestructura de almacenaje de estos.
- Reduce los costos de transporte e incrementa la densidad energética del combustible.

1.2.1. Desarrollo de tecnologías en densificación mecánica de biomasa

Tumuluru et al., (2010) indican que los mecanismos más comunes de densificación de biomasa, han sido adaptados a partir de otras tecnologías de procesamiento de alta eficiencia, como las de industrias de alimentos, tanto para humanos como animales y productos farmacéuticos. Entre los mecanismos anteriormente indicados se encuentran las peletizadoras, briqueteadoras, tornillos extrusores, empastilladoras y otros mecanismos aglomeradores. Los casos de las peletizadoras, briqueteadoras y tornillos extrusores, son los más empleados en densificación de biomasa para fines energéticos.

La calidad de la biomasa densificada obtenida empleando alguno de los métodos ya mencionados, es evaluada tomando como referencia estándares internacionales desarrollados para pellets y briquetas, y a pesar de que las normativas regulan las características del combustibles densificado, estas no dejan de ser importantes para las compañías que diseñan y comercializan equipos de densificación (para aplicaciones industriales principalmente) (Tumuluru et al., 2010).




Tabla 1.2.

Métodos de densificación de biomasa.

<i>Densificación Mecánica</i>	
	Pacas: Es el método de densificación más común. Son hechas empleando maquinaria que comprime la biomasa en formas cuadradas, cúbicas o cilíndricas. Típicamente poseen dimensiones desde 1 m a 1,5 m. Las pacas cilíndricas son menos costosas de hacer, sin embargo las rectangulares o cúbicas normalmente son más fáciles de manejar y transportar.
	Pellets: Poseen una alta densidad. Son más fáciles de manejar que otras biomásas densificadas, inclusive se usa infraestructura empleada en granos para su almacenamiento. Normalmente son cilíndricos con diámetros del orden del centímetro y largos superiores a los 3 cm.
	Cubos: Son más grandes que los pellets, menos densos y usualmente poseen forma cúbica. Tienen dimensiones entre 1 cm y 4 cm en ancho, y largos de hasta 10 cm. El proceso implica comprimir follajes residuales de pasturas con maquinaria especializada.
	Discos: Poseen diámetros superiores a los 7 cm. Son elaborados con equipo semejante a las briqueteadoras, pero sin una matriz de salida (como empastilladoras). Los discos tienen densidades similares a las de los pellets.
	Chips (astillas): Son empleados en muchas operaciones, desde labores en los hogares hasta aplicaciones en plantas generadoras de energía a gran escala. Los chips, son hechos por trituradoras y en términos energéticos son comparables con el carbón.
	Briquetas: Son similares a los pellets pero con mayor tamaño. Las briquetas tienen diámetros de 2,5 cm o mayores, y están formados de biomasa altamente comprimida que pasa por una matriz, debido a la acción de un pistón o tornillos sinfin. Se emplea también matrices con calentadores para favorecer la compresión de la briqueta.

Fuente: (Clarke et al., 2011)

Tabla 1.2. (Continuación).
Métodos de densificación de biomasa.

<i>Densificación Termoquímica (Pirólisis)</i>	
	Torrefacción: Es llevada a cabo calentando la biomasa en una atmósfera inerte a temperaturas entre los 280 °C y 320 °C por un tiempo determinado. La biomasa torrefactada ve mejorada sus propiedades de molienda y aglomerado, además debido al proceso la biomasa se vuelve altamente hidrofóbica, mejorando sus características de almacenado. También es densificada en forma de pellets o briquetas.
	Pirólisis lenta: Implica calentamiento de la biomasa entre los 350 °C y 500 °C en ausencia de oxígeno durante largos periodos de tiempo. Principalmente se obtiene carbón que retiene 60% a 70% de la energía original de la biomasa. El carbón vegetal es un combustible adecuado para usos domésticos, por ejemplo barbacoas.
	Pirólisis rápida: Se trata la biomasa a temperaturas entre los 450 °C y 500 °C durante 1–2 segundos. El proceso produce hasta un 75% de bioaceite y un 10 % a 15 % de carbón vegetal. El bioaceite posee una densidad energética elevada, es ácido y propenso a la separación/sedimentación. Normalmente es empleado como sustituto de combustibles fósiles pesados.

Fuente: (Clarke et al., 2011)

Por su parte, Ortiz (2008) informa que en la actualidad se puede decir que se ha alcanzado un nivel tecnológico aceptable (en algunos países), y que a pesar que las tecnologías de densificación no están consolidadas como otros sectores tecnológicos, al día de hoy el desarrollo tecnológico permite abordar la fase industrial de densificación de biomasa con bastante solvencia.

A continuación se describen, las tres principales tecnologías de densificación mecánica a nivel de comercial en base a lo descrito por Tumuluru et al. (2010).

1.2.1.1. Tornillos extrusores a compresión

La Figura 1.7 muestra el esquema simplificado de funcionamiento de una máquina compresora de biomasa. Ya sea para elaborar pellets o briquetas, su principio de funcionamiento es la compresión mediante un tornillo extrusor. En el proceso se suman el movimiento giratorio del tornillo con el transporte longitudinal de material a densificar, más la

ficción con la carcasa cilíndrica (que es calentada a temperatura controlada); con esto se facilita la aglutinación del material, el cual finalmente es forzado a pasar por la matriz formadora del pellet o la briqueta.

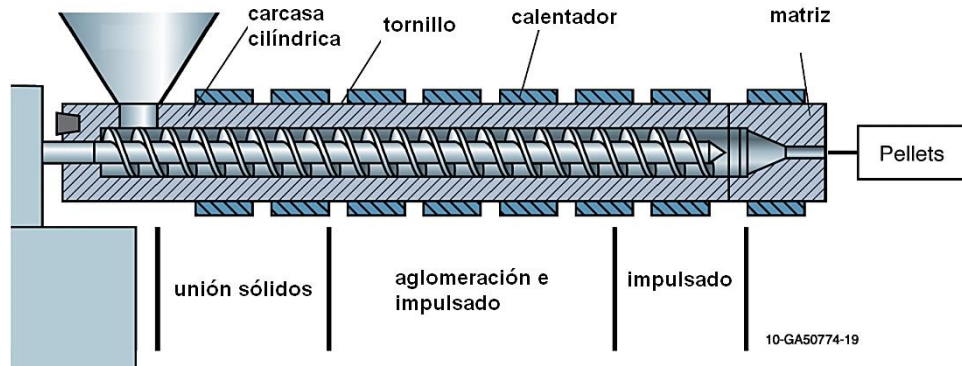


Figura 1.7. Equipo densificador equipado con un tornillo extrusor.
Fuente: (Tumuluru et al., 2010)

Según Tumuluru et al. (2010), el proceso cuenta con la mayor demanda energética en la sección de unión de sólidos, aglomeración e impulsado, esto debido a la necesidad de vencer la fricción para mantener el movimiento de la biomasa. Conforme el material se acerca al sector de estrechamiento, se presenta la evaporación más acelerada de la humedad del material, lo que facilita la tarea de compresión del producto final. Entre las desventajas que presenta este tipo de máquinas peletizadoras respecto a otras, se encuentra la elevada potencia que requiere para funcionar si se compara por ejemplo con densificadoras de pistón.

1.2.1.2. Densificadoras de pistón

Otra variante de compresión de biomasa es el pistón, ya sea de funcionamiento hidráulico o completamente mecánico. La Figura 1.8 muestra el esquema de este tipo de mecanismos.

Las prensas de pistón hidráulico se utilizan comúnmente en la fabricación de briquetas, y su tasa de salida de material es más baja en comparación con prensas mecánicas, debido a que el movimiento del cilindro es más lento. La presión requerida en la prensa hidráulica es producida por un cilindro hidráulico especialmente diseñado, que libera la briqueta comprimida una vez que se alcanza la presión requerida. La presión se ajusta empleando reguladores que la

mantienen constante durante el proceso. Típicamente los rendimientos de estas máquinas rondan los 50 kg/h a 400 kg/h. Estas máquinas no toleran elevados contenidos de humedad en la biomasa, al contrario de las de pistón mecánico, que usualmente trabajan con contenidos de humedad superiores al 15 % (b.h.).

En el caso de las compactadoras de pistón mecánico, la fuerza de compresión alcanza hasta los 2 000 kg/cm² para obtener comprimidos de alta densidad (superiores a 1 000 kg/m³), sin la adición de aglomerantes. Este tipo de prensas se utilizan típicamente para producción a gran escala con rendimientos que van de 200 kg/h a 2 500 kg/h. La pérdida de energía en la máquina es limitada, y el rendimiento en relación con el consumo de energético es óptimo. Además, la vida de funcionamiento de una prensa mecánica es considerablemente superior al de las prensas hidráulicas. En general, una prensa mecánica tiene un periodo de retorno de la inversión considerablemente más corto que el de las prensas hidráulicas. (Tumuluru et al., 2010)

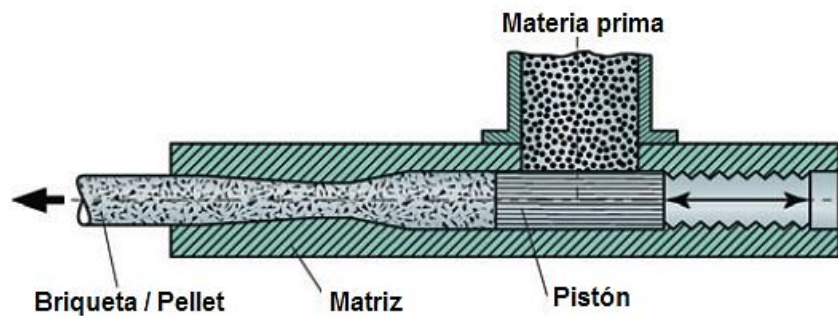


Figura 1.8. Densificadora de pistón.
Fuente: (Tumuluru et al., 2010)

1.2.1.3. Densificadora de rodillos

Este mecanismo consiste en dos rodillos del mismo diámetro girando en ejes horizontales paralelos y direcciones opuestas. Al forzar la biomasa a pasar a través del espacio entre los dos rodillos, se consigue formar el producto densificado. El espacio entre los dos rodillos depende de factores como el tipo de biomasa, el tamaño de partícula y la adición aglomerantes. Los parámetros de diseño que juegan rol principal en la calidad del material densificado son el espacio entre rodillos, la fuerza de compresión y la forma de la matriz. La Figura 1.9 muestra el esquema de este tipo de mecanismo de compresión.

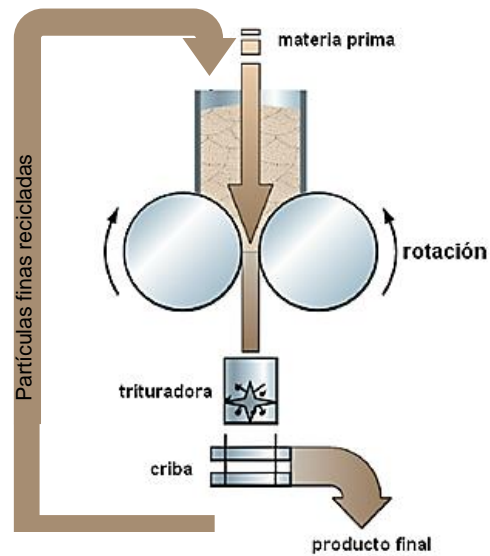


Figura 1.9. Peletizadora de rodillos verticales.
Fuente: (Tumuluru et al., 2010)

1.2.2. *Elaboración de pellets a nivel de laboratorio y estudio de sus propiedades*

Para lograr un alto grado de control sobre los factores involucrados en la densificación de la biomasa en forma de pellet, ha sido necesario el diseño de equipos de peletizado a menor escala. El diseño de estos les permite ser acoplados a distintos instrumentos de laboratorio con capacidad de medir variables como la fuerza de compresión ejercida al material, la temperatura aplicada durante el proceso de densificación, además de permitir modificar las dimensiones del pellet. A partir de lo anterior, es posible estudiar la relación entre los parámetros de densificación y distintos materiales biomásicos, por lo que en la literatura afín al tema normalmente se encuentra la determinación de las propiedades físicas, térmicas y fisicoquímicas de los pellets, además del análisis de la influencia que el proceso de densificación tiene sobre dichas propiedades.

1.2.2.1. *Diseño y construcción de equipos experimentales de peletizado y estudio de propiedades físicas de los pellets*

Generalmente las propiedades físicas son las más sencillas de determinar y analizar, sin embargo, no dejan de tener gran importancia en todo lo que al tema de densificación de biomasa

se refiere, esto se debe principalmente, a que estas características están relacionadas con el comportamiento de los pellets en labores tan vitales como las de transporte y almacenaje. Los estudios encontrados en la literatura respecto a este tema, se enfocan principalmente en la determinación de la dureza mecánica, densidad aparente, densidad real y en algunos casos la capacidad absorción de humedad. Generalmente estas pruebas se realizan variando el contenido de humedad, tamaño de partículas, haciendo mezclas de materiales biomásicos, e inclusive agregando sustancias o materiales con propiedades aglutinantes.

Los equipos empleados para elaborar pellets a nivel de laboratorio generalmente trabajan bajo el sistema cilindro-pistón. Mani, Tabil, & Sokhansanj (2004) desarrollaron un equipo simple como el mostrado en la Figura 1.10, con este equipo elaboraron pellets a partir de materiales biomásicos tales como pajas de trigo, cebada y rastrojos de maíz. Controlando la granulometría del material, su contenido de humedad, la temperatura y la fuerza de compresión aplicada al material durante la densificación, encontraron que para tamaños de partículas menores, la densidad aparente y real se ve incrementada. El mismo fenómeno se mantuvo conforme se aumentó la fuerza de compresión y temperatura.

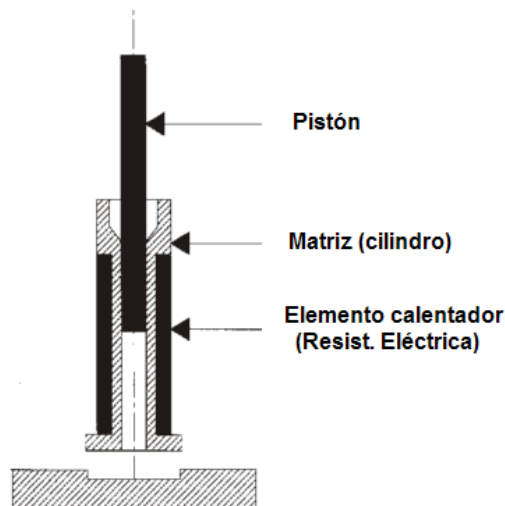


Figura 1.10. Unidad de peletizado de laboratorio.

Fuente: (Mani et al., 2004)

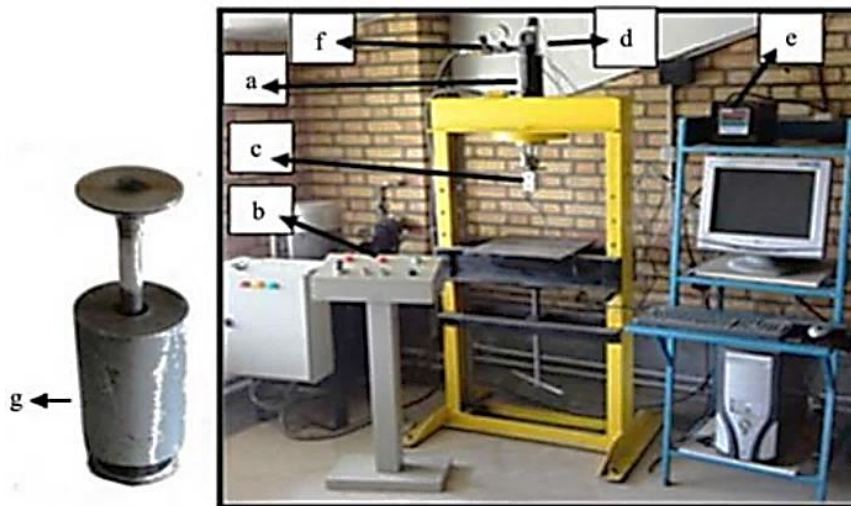
En estudios similares como el desarrollado por Gil et al., (2010) se elaboraron pellets a partir de materiales biomásicos forestales, a los cuales se les adicionó biomasas residuales

agrícolas con propiedades “aglutinantes”. Sus conclusiones sostienen que la dureza se ve mejorada de forma significativa con la adición de aglutinantes, lo mismo se observó para la densidad aparente. Estudios con resultados similares, donde se mezclan componentes biomásicos y materiales aglutinantes, fueron desarrollados por Kaliyan & Vance-Morey (2009); Liu et al., (2013); y Miranda et al., (2011; 2012).

Por su parte, Lee et al., (2013) investigaron la dureza de pellets elaborados a partir de residuos de especies forestales (Alerce del Japón y Tulipero). En este caso se controlaron las condiciones de peletizado como la granulometría, temperatura y tiempo de compresión. Nuevamente se encontró que la dureza aumenta con granulometrías menores, y si la temperatura aplicada y el tiempo de compresión aumentan.

En trabajos como el realizado por Ghadernejad, Kianmehr, & Arabhosseini (2012) se estudió el efecto directo del contenido de humedad de materiales biomásicos residuales, sobre el consumo energético necesario para generar la compresión (100 MPa y 150 MPa) que forma pellets de 6 mm diámetro. Nuevamente, el tipo de mecanismo empleado para comprimir el material funciona mediante el principio de cilindro-pistón, tal y como se muestra en la Figura 1.11. Dichos autores encontraron que la energía de compresión para formar los pellets (relacionada con la longitud comprimida por kilogramo de fuerza aplicada) en general tiende a disminuir conforme es mayor el contenido de humedad del material. Además, se determinó experimentalmente que alrededor de un 15 % de la totalidad de energía aplicada para la compresión, es empleada para vencer la fricción entre el material comprimido y las paredes del cilindro; además, se observó que esta energía normalmente aumenta para partículas de mayor tamaño (granulometría mayor).

Por su parte, Lam, Sokhansanj, Bi, Lim & Melin, (2011) emplearon equipo de diseño experimental tipo cilindro-pistón, para elaborar pellets a nivel de laboratorio tal y como se muestra en la Figura 1.12. Para desarrollar este trabajo se usó aserrín de “Abeto de Douglas” (*Pseudotsuga menziesii*) secado a un 10% de contenido de humedad. El proceso de peletizado se realizó aplicando calor al cuerpo cilíndrico hasta alcanzar los 90 °C.



a. Cilindro hidráulico b. Sensor de control de movimiento c. Celda de carga
e. Data logger f. Válvula de control de flujo g. Molde

Figura 1.11. Montaje de laboratorio para producir pellets.

Fuente: (Ghadernejad et al., 2012)

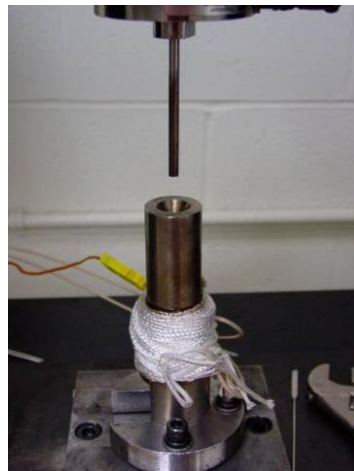


Figura 1.12. Equipo de peletizado cilindro-pistón de laboratorio.

Fuente: (Lam et al., 2011)

En términos referidos al proceso de peletizado y la fuerza requerida para obtener los pellets con el equipo de la Figura 1.12, Lam et al. (2011) y Peng, Bi, Lim & Sokhansanj (2013) encontraron que empujar el pellet para ser liberado del molde, toma alrededor de tres órdenes de magnitud menos de fuerza que el proceso de compresión. Además, al evaluar la densidad, dureza y características higroscópicas de los pellets, encontraron que la densidad de estos

aumenta con la temperatura y la presión aplicada, aunque es más sensible a la variación de la temperatura.

La granulometría del material biomásico a peletizar, su contenido de humedad, la fuerza de compresión aplicada y dimensiones del pellet, no han sido las únicas variables del peletizado estudiadas de forma detallada. Tal es el caso de la investigación desarrollada por Rhén, Gref, Sjöström & Wästerlund (2005), quienes aparte de los parámetros anteriormente mencionados, se enfocaron en variar la temperatura aplicada durante el proceso de densificación de aserrín de abeto rojo. En general experimentaron con temperaturas entre los 26 °C y 144 °C, contenidos de humedad de 6,3 % a 14,7 % y presiones de 46 MPa hasta 114 MPa. Posteriormente evaluaron la influencia de estas variables sobre la densidad real, la absorción de humedad y la resistencia a la compresión de los pellets, encontrando que mayores presiones están directamente relacionadas con altas densidades de pellet. Además, la aplicación de temperaturas alrededor de los 144 °C, sumado a contenidos de humedad menores, están fuertemente relacionados con mayores densidades para pellet fabricados a la misma presión. También se logró observar que la fuerza de compresión (46 MPa – 114 MPa) tuvo poco efecto en el intervalo ensayado, si se compara con el efecto de la temperatura sobre las variables estudiadas. Además, la fuerza de compresión tuvo mínimo efecto sobre la absorción de humedad de los pellets, y esta misma tiene una leve tendencia a la baja cuando los pellets son elaborados por debajo de los 90 °C.

1.2.2.2. Determinación y estudio de las propiedades térmicas

La literatura encontrada respecto a este tema se enfoca en la determinación de la conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico principalmente, para lo cual son confeccionados dispositivos de laboratorio que permiten determinar estas variables de forma directa o indirecta.

Guo, Lim, Bi, Sokhansanj & Melin, (2013) desarrollaron equipo de laboratorio para determinar la conductividad térmica y el calor específico de pellets hechos de residuos madereros. El esquema del equipo empleado en este trabajo se muestra en la Figura 1.13.

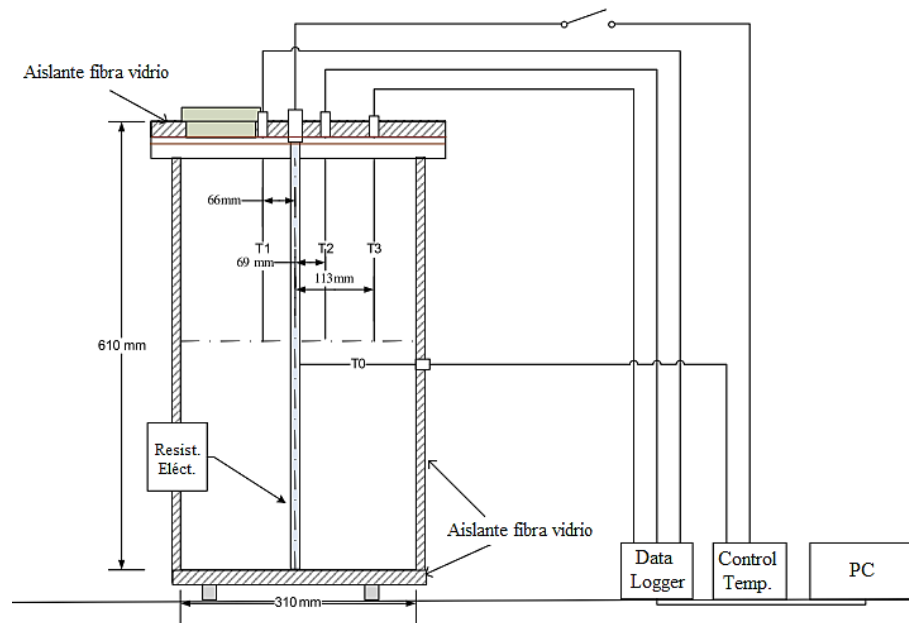


Figura 1.13. Esquema del equipo empleado para medir la conductividad térmica de pellets.
Fuente: (Guo et al., 2013)

Los dispositivos como este funcionan bajo el principio termodinámico de un cilindro semi-infinito, donde la medida longitudinal del cilindro es considerada infinita respecto a su diámetro. Se supone que el flujo de calor desde una fuente lineal ubicada en el eje central del cilindro, se presenta únicamente en dirección radial hacia el exterior de este, además, el cambio de la temperatura en el cilindro es una función del tiempo debido a una resistencia interna no despreciable (resistencia térmica de los pellets), por lo que se presenta un perfil radial de temperatura no constante (estado transitorio). Mayor detalle del fundamento teórico-matemático del concepto de transferencia de calor en un cilindro semi-infinito es expuesto por Mohsenin (1980), Holman (1986), Brown (1998) e Incropera, DeWitt, Bergman & Lavine, (2007).

La variación de la temperatura en distintos puntos distribuidos radialmente en el cilindro (T0, T1, T2 y T3 según la Figura 1.13) se registra mientras la temperatura de la fuente lineal de calor (resistencia eléctrica) aumenta, debido al flujo de corriente eléctrica a través de ella. Durante las pruebas Guo et al. (2013) encontraron perfiles lineales y crecientes de temperatura para los cuatro puntos de monitoreo, además, la conductividad térmica efectiva de

los pellets se determinó alrededor de los 0,146 W/m·K a 0,195 W/m·K, y esta aumentó con tendencia lineal conforme es mayor el contenido de humedad de los pellets. Respecto a la medición del calor específico, se estimaron valores entre 1,074 kJ/kg·K a 1,253 kJ/kg·K para las muestras e intervalos ensayados.

El empleo de equipo experimental como el desarrollado por Guo et al., (2013) no es exclusivo para el estudio de propiedades de pellets, también es un método frecuentemente usado en la caracterización de materiales biomásicos, y materiales inorgánicos con finalidades no necesariamente energéticas. Por ejemplo Bitra, Banu, Ramakrishna, Narender, & Womac (2010) emplearon equipo que funciona bajo el mismo principio para determinar las propiedades térmicas de maní, nueces y granos para consumo humano. En su investigación, Franco (2007) empleó equipo similar para determinar las propiedades térmicas de materiales a base de concreto comúnmente usados en la construcción. Los anteriores ejemplos, informan sobre lo diseminado de este método de determinación de propiedades térmicas en distintas disciplinas.

De forma complementaria, es común encontrar el uso de equipo especializado para determinar las propiedades térmicas de distintos materiales biomásicos, ejemplo de estos equipos son los “calorímetros de escaneo diferencial” (conocidos como DSC por su acrónimo en inglés) y los “aparatos o instrumentos de Fitch”.

Respecto a estos equipos, es importante destacar que su principio de funcionamiento se basa en la medición de las diferencias de calor que emite la muestra de interés, respecto a una muestra de referencia, esto mientras son sometidas a las mismas condiciones experimentales. La diferencia de calor en las muestras es desplegada como un “termograma” que en su eje y muestra el cambio en la tasa de absorción o liberación de calor de las muestras (dQ/dt), y en el eje x muestra la temperatura. El área bajo la curva del termograma, es proporcional a la cantidad de calor absorbida por el material evaluado, por lo que posteriormente puede determinarse distintas relaciones térmicas de la muestra, ya sea directa o indirectamente. Más detalle de este tipo de equipamientos es descrito por Mohsenin (1980).

En general el estudio de las propiedades térmicas de los materiales es tema de interés bien establecido para materiales biológicos. En la Tabla 1.3 se resume varios de los métodos

empleados por distintos investigadores para la determinación de propiedades térmicas, tales como la conductividad térmica y el calor específico para distintos materiales agrícolas y maderas, así como relaciones matemáticas empíricas que se encontraron para aproximar su valor numérico.

Tabla 1.3.

Algunas relaciones y valores empíricos para calor específico y conductividad térmica de materiales biomásicos.

<i>Investigadores</i>	<i>Método y material</i>	<i>Conductividad Térmica (W/m·K)</i>	<i>Calor Específico kJ/(kg·K)</i>
Krollman et al., 1968.	Madera	$\lambda_{seco} = 0,0002\rho_{seco} + 0,024$ Temperatura ambiente	$C_{p,seco} = 0,0046T - 0,116$ 0°C – 100°C
Adl-Zarrabi et al., 2006.	Método TPS, madera	0,55 W/(m·K) en dirección de paralela fibras 0,11 W/(m·K) dirección perpend.de fibras {20 °C, 100 °C y 150 °C}	1,07 kJ/(kg·K) madera seca 1,38 kJ/(kg·K) 9,5% de CH
Gupta et al., 2003.	Aparato Fitch y DSC Madera blanda seca L=1 mm; D=6,5 mm	0,0986 W/(m·K) a 37 °C	$C_p = 0,00546T - 0,524$ 40 °C – 140 °C
Fasina et al., 1995	Pellets de alfafa CH. 7,5% a 18%	$\lambda_{efect.} = 0,049 + 0,0082 CH$ a 20 °C	$C_p = 1,083 + 0,089 CH - 0,002CH^2$ a 20 °C
Peters et al., 2003	Sin referencia	0,2 W/(m·K) para partícula maderas de 4 mm 0,35 W/(m·K) para partículas de abeto	$C_p = 1,733$ kJ/(kg·K) $C_p = 1,112$ kJ/(kg·K)
Pauner et al., 2007	Método de Blomquist, pellets de biomasa	0,17 W/(m·K) a 23 °C	2,2 kJ/(kg·K) a 23 °C

Fuente: (Guo, 2013)

1.2.2.3. Estudio de propiedades químicas y fisicoquímicas

En este apartado son de interés propiedades como el poder calorífico, porcentaje de cenizas, el contenido de elementos inorgánicos y propiedades de combustión de los pellets.

Destaca en la literatura, que para el estudio del poder calorífico de pellets de biomasa primordialmente es empleado el procedimiento de Normas Norteamericanas como ASTM E711-87, o en su caso, normativa como la CEN/TS 14918 que es su equivalente en Europa.

Referente al estudio en términos cualitativos del poder calorífico de pellets, se encuentran trabajos como el de Telmo & Lousada (2011) que muestran como esta propiedad energética es variable; también, señalan el papel que cumple el contenido de humedad del material sobre los valores de calor de combustión superior e inferior, además de la correlación entre estos tres parámetros.

La eficiencia con la que el poder calorífico de pellets de diferentes materiales y dimensiones es aprovechado en hornos experimentales, sumado a la caracterización termoquímica de los residuos de combustión y pirólisis, fueron estudiados por Roy et al., (2013) y Erlich et al., (2005). Por su parte, Carroll & Finnan (2012) sostienen que el poder calorífico superior es significativamente más elevado para pellets elaborados a partir de residuos madereros que los que son elaborados a partir de rastrojos o pajas residuales de cultivos agrícolas.

Por otra parte, el estudio de características como el porcentaje de cenizas se encuentran normalmente supeditadas a normas como la ASTM E1534-93 o CEN/TS-4775 que es su equivalente en Europa. El contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno es evaluado bajo lineamientos del estándar CEN/TS 15104 o ASTM D5291-10. Por otra parte, cantidades de compuestos y elementos inorgánicos como el cloro y sulfuros son determinadas bajo lineamientos de dictados en la norma CEN/TS 15289.

El contenido de los elementos y propiedades de la biomasa densificada en forma de pellets, elaborados a partir de diversos materiales agrícolas/forestales residuales, es analizado por Stelte et al. (2011), Shang et al. (2012), Serrano et al. (2011), Miranda et al. (2012) y Liu et al. (2013) bajo lo determinado por las normas ya mencionadas.

1.3. Perfil de producción, consumo y mercado de pellets con finalidad energética

Rojas (2004), señala que actualmente son diversos los países que mantienen una producción sostenida de pellets, además indica que los sectores en donde estos son empleados van desde el suministro combustible para generación de energía a industrias, edificios públicos y complejos inmobiliarios, inclusive llegando a usarse en la más común de las calefacciones hogareñas.

Por otro lado, la disponibilidad de la materia prima y precios competitivos, sumado a políticas de diversificación energética más comprometidas, ha permitido a los países de Europa posicionarse como los mayores productores de pellets de biomasa a nivel mundial; tal es el caso de Suecia, Alemania y Austria, que poseen los mercados de pellet más desarrollados de todo el mundo. En segundo plano se observan en Europa países como Italia, Bélgica, Francia, Reino Unido y Rusia (Gonzalez, 2009).

Por su parte, Obernberger & Thek (2010) señalan que países como Estados Unidos y Canadá, se han convertido en el segundo foco de mayor importancia en lo que a producción de pellets se refiere. Lo anterior, debido a que la oferta también está creciendo constantemente, por lo que consecuentemente ha incrementado el número de plantas y capacidad de producción total.

El sector latinoamericano no destaca por ser uno de los que mayor caudal productivo de pellets genera, sino más bien, junto con el sector Asiático y de Oceanía presentan un mercado apenas incipiente. El caso de países como Brasil, Argentina y Chile, se han encaminado como los precursores de la producción de pellets en lo que a Latinoamérica se refiere. En el sector asiático, China, Japón y Corea del Sur encabezan la lista de mayores productores respectivamente; lo mismo que Australia y Nueva Zelanda en el continente Oceánico (Cocchi et al., 2011). En las Figuras 2.14 y 2.15 se muestra el tonelaje anual de pellets producido y consumido alrededor del mundo.

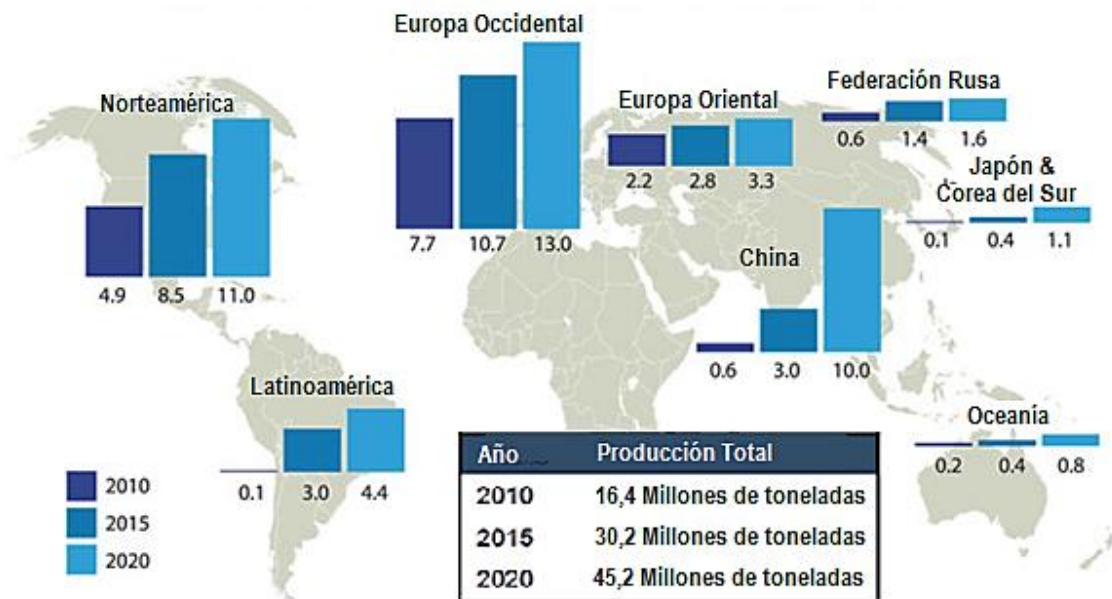


Figura 1.14. Estado de la producción anual de pellets y proyección a futuro.
Fuente: (Pöyry Wood Pellet Multiclient, 2011)

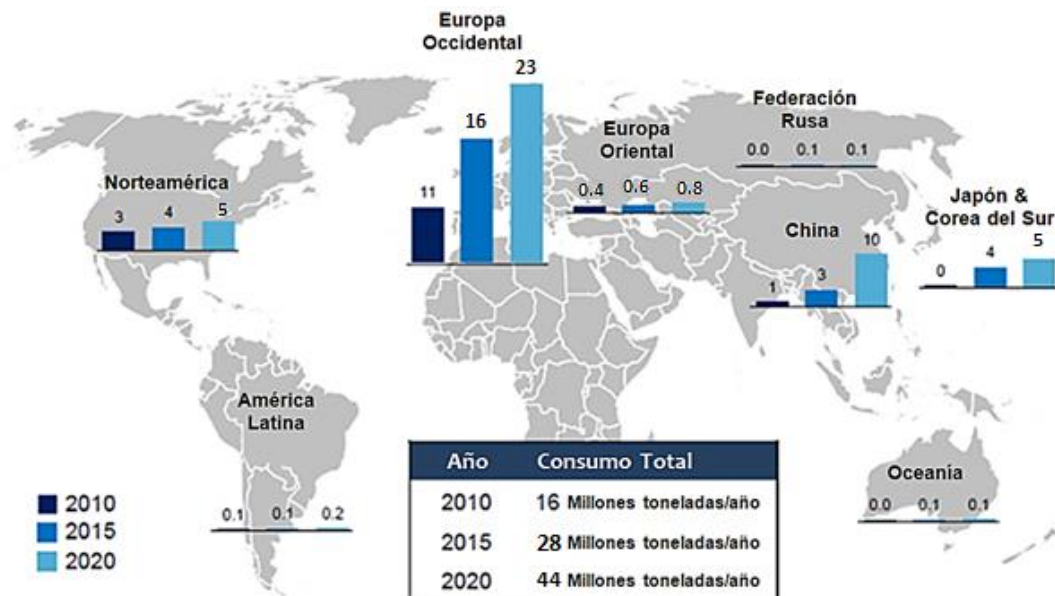


Figura 1.15. Estado del consumo mundial de pellets y proyección a futuro.
Fuente: (Pöyry Wood Pellet Multiclient, 2011)

1.3.1. Tendencias y perspectivas a futuro del mercado de pellets

En relación a esta temática, Obernberger & Thek (2010) informan que la obtención de datos precisos sobre la producción, consumo y comercio de pellets es un desafío, esto porque en muchos países las plantas de producción de pellets fueron construidas para cierta capacidad, sin embargo estas se expandieron rápidamente. También señalan que solo en algunos países como Alemania, Austria, Canadá, Finlandia, Alemania y Suecia los datos disponibles son precisos, esto debido principalmente a la presencia de una industria de pellets bien organizada.

Por otro lado, con los precios del petróleo fluctuantes, esquemas de subsidios en algunos países, y el clima económico mundial pasando por una etapa caótica, es difícil saber qué nuevo mercado de pellets se abrirá y cómo los flujos internacionales de pellets de madera se desarrollarán. Sin embargo, con base en nuevas iniciativas políticas y nuevas inversiones en pro de aumentar la capacidad de producción, la tendencia de oferta y demanda de los pellets puede ser identificada en forma aceptable.

Cocchi et al, (2011), apuntan a que es altamente probable que la Unión Europea siga siendo el mayor consumidor de pellets en el mundo, cuya demanda podría oscilar entre los 20 y 50 millones de toneladas en 2020; sin embargo, Asia mostraría un crecimiento muy fuerte llegando a posicionarse en segundo lugar en 2020.

Según Obernberger & Thek (2010) Norteamérica seguirá siendo un productor y exportador importante. Sólo en el este de Canadá se pretender construir seis nuevas plantas para producir un millón de toneladas de pellets al año. Quebec también verá aumentada su producción en 1 millón de toneladas de producción en próximos años. Además, en el largo plazo, también es muy posible que los Estados Unidos desarrolle un mercado interno importante, aunque seguirá limitándose el consumo de pellets al uso a pequeña escala en los hogares, y no tanto a gran escala con fines industriales.

En la Federación Rusa, por ejemplo, se estima que poseen alta cantidad de materia prima como en pocas naciones, esto dada su extensión territorial. Además, la capacidad instalada y la producción real, se incrementará aún más debido a varias plantas de producción de pellets que están en proceso de construcción, una de las cuales será la planta más grande del

mundo, con una capacidad de producción anual de alrededor de 900 000 toneladas de pellets; esta será construida en Vyborg, al norte de San Petersburgo cerca de la frontera con Finlandia.

También se observan buenas proyecciones para otros mercados apenas en crecimiento, como por ejemplo el de Chile, que aparece como un importante productor de materia prima (potencial de 2 millones de toneladas de pellets para la exportación) y tiene planes de convertirse en un proveedor importante; mismo caso es el de Brasil y Argentina en América del sur. En el sector Africano, Sudáfrica ya procesa 80 000 toneladas por año que son enviadas a Europa y Japón. En Oceanía, Australia se ha convertido recientemente en un productor de pellets y exportador para Bélgica y Holanda (Obernberger & Thek, 2010).

En la Figura 1.16 donde se muestra un esquema básico del flujo mundial de comercio de pellets al año 2011, el cual responde de forma general a lo acotado en líneas anteriores.

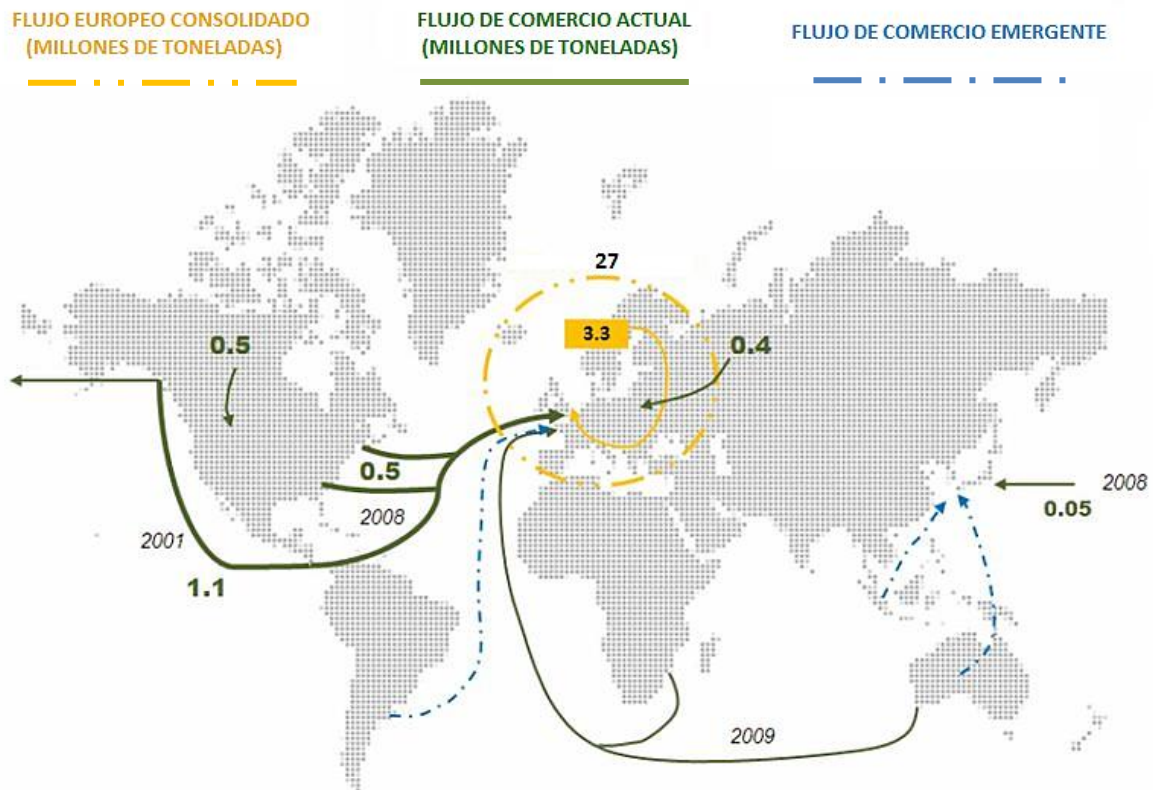


Figura 1.16. Flujo mundial de comercio de pellets.
Fuente: (Pöyry Wood Pellet Multiclient, 2011)

1.3.2. Producción y consumo del pellet como combustible: el caso de Costa Rica

Según Chinchilla (2013), la producción y consumo de pellets como combustible alternativo es tema sumamente reciente en Costa Rica, indica que existe una sola planta de elaboración de estos comprimidos de biomasa, inclusive señala que es única a nivel centroamericano.

La fabricación de los pellets se lleva a cabo en la empresa Pelletics S.A, ubicada en Muelle, San Carlos. Dicha empresa se encarga de la producción a partir de residuos de madera reforestada producida por cerca de 60 aserraderos de la zona. La máquina de fabricación es de desarrollo europeo y posee una capacidad de 1 000 kg/hora (Chinchilla, 2013).

En su sitio web la empresa indica que su producto cumple las especificaciones dadas por el estándar de calidad CEN/TS 14961, definido por el Comité Europeo de Normalización para biocombustibles sólidos. Además, informan estar sufriendo a empresas del mercado nacional tales como Holcim, Cemex, Bridgestone, hoteles locales y de cadenas internacionales, así como proyectos de pymes donde se sustituyó el consumo de gas licuado y bunker, que se empleaban para generar calor en procesos industriales. Además, empresas como Dos Pinos y Cervecería de Costa Rica próximamente empezarán a consumir pellets para la generación de energía, y para el 2014, Pelletics tiene planeado instalar una planta en el sector de Guápiles, Limón con la finalidad de aprovechar los desechos de madera que se producen en Pococí y Siquirres (Chinchilla, 2013b).

Respecto a la investigación sobre este tema, ya se empezaron las pruebas de investigación utilizando residuos agrícolas, cultivos energéticos y otros productos de desecho de la industria alimentaria, como por ejemplo: mazorca de maíz, residuos del cultivo de la palma africana y el rastrojo del cultivo de piña. Ya se han llevado a cabo los primeros experimentos y dieron buenos resultados, sin embargo los rastrojos poseen un alto contenido de humedad por lo que el costo de operaciones como el transporte y secado industrial serían considerablemente altos, por lo que una adecuada sinergia con la empresa privada y el Estado, es vital para incentivar la producción de biocombustibles densificados con materiales residuales agrícolas y forestales (Chinchilla, 2013b).

1.4. Normativa vigente a nivel internacional para la calidad de pellets con fines energéticos

Según Cabral et al. (2012), la calidad de los pellets y briquetas está directamente relacionada con sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Las propiedades físico-mecánicas determinan la calidad del material biomásico densificado durante el transporte y almacenamiento, y la composición química a su vez determina la capacidad energética de estos, la formación de cenizas y emanación de sustancias no deseadas durante el proceso de combustión.

Como se indicó en secciones anteriores, los mercados de comercio de pellets se han desarrollado principalmente en Europa (Suecia, Alemania y Austria) y en plano secundario se encuentra Norteamérica (Canadá y Estados Unidos), por lo que es de esperar que la normativa haya sido desarrollada de forma más activa por estos sectores de mercado. El objetivo de estas normas es garantizar la uniformidad de la biomasa densificada, y reducir las barreras de mercado, creándose un flujo de producto en el que estos biocombustibles puedan ser objeto de comercio entre productores y usuarios sin importar países o regiones (Cabral et al., 2012).

Con relación a la especificidad de lo que las normas exigen controlar, destacan primordialmente propiedades como la densidad a granel (aparente), la densidad unitaria (real), el contenido de cenizas, el contenido de humedad, el poder calorífico y el contenido de elementos como azufre, nitrógeno y cloro. Además, las normas utilizadas en los diferentes países productores, a la fecha son bastante similares (Rojas, 2004).

A continuación se presentan las normativas para biocombustibles sólidos en forma de pellet, empleadas en los principales países productores y/o consumidores según Cabral et al. (2012).

Alemania: La normativa está definida por el Instituto Alemán de Normalización (DIN por sus siglas en alemán).

DIN 51731: Pruebas de combustibles sólidos, madera comprimida y sin tratamiento. Requisitos y ensayos.

DIN EN 15270: Normas quemadores de pellets para pequeñas calderas de calefacción, definiciones, requisitos, pruebas y características.

La norma DIN Plus, basada en la norma DIN EN 15270, establece parámetros para pellets de alta calidad y hoy día es la certificación de calidad más importante del mundo para pellets de madera.

Austria: La normativa está definida por el Instituto Austriaco de Normas (ÖNORM por sus siglas en austriaco).

ÖNORM M 7135: Requerimientos y pruebas para pellets y briquetas elaborados de madera con o sin corteza.

ÖNORM M 7136: Requerimientos de calidad de la logística y transporte de los pellets de madera.

ÖNORM M 7137: Requerimiento de calidad de almacenamiento para consumidores finales de pellets de madera.

Suecia: Este país fue uno de los primeros en establecer normas de calidad para los pellets. El estándar SS187120 (SS - *Swedish Standards*) incluye tres categorías de calidad. Además, la norma SS187121 es exclusiva para briquetas.

Por otra parte, el Comité Europeo de Normalización (CEN) tiene el mandato de la Comisión Europea para la elaboración de normas para los biocombustibles sólidos. Estos estándares incluyen parámetros como densidad de las partículas, contenido de humedad, resistencia a la compresión o dureza, tamaño de los pellets (longitud y diámetro), composición química, contenido de cenizas y capacidad calorífica entre otros. Se podría decir que las Normas CEN/TS 14961:2005 pueden ser tomada como convención que se apega lo establecido de forma general por cada país. Por tal motivo son empleadas exitosamente como una norma general para toda la Unión Europea (Cabral et al., 2012).

Estados Unidos: Las normas para biomasa densificada y uso como combustible están reguladas por el PFI (Pellet Fuel Institute). Este instituto propone utilizar las siguientes normas de la ASTM para la caracterización del pellets.

ASTM E873: Estándar para la determinación de la densidad aparente de partículas de combustible de biomasa.

ASTM E871: Estándar para la determinación del contenido de humedad de partículas de combustible de biomasa.

ASTM D1102: Estándar para la determinación de la cantidad de cenizas.

ASTM E776: Estándar para la determinación de las formas de cloro presente en combustibles derivados de residuos.

ASTM D4208: Estándar para la determinación del cloro total en carbón por el método de la bomba calorimétrica.

ASTM D6721: Estándar para la determinación del cloro en carbón por el método de microcoulombimetría oxidativa.

ASTM E711: Estándar para la determinación del poder calorífico de combustibles derivados de residuos por el método de la bomba calorimétrica.

ASTM D1857: Estándar para la determinación de la fusibilidad de cenizas.

Canadá: Según Melin (2011), no hay una normativa definida en Canadá, sin embargo, dependiendo del mercado al que se vaya a exportar los biocombustibles densificados, se debe obtener la certificación necesaria. Para el caso de las exportaciones a Europa la certificación debe venir del Consejo Europeo de Pellets (European Pellet Council), y para Estados Unidos del Instituto de Pellets Combustibles (Pellet Fuel Institute).

En la Tabla 1.4 se resumen las sub-normativas que engloban a la familia de normas CEN/TS, elaboradas para toda la Unión Europea. La Tabla 1.5 resume de forma general las especificaciones definidas para las principales normas oficiales a nivel europeo.

Tabla 1.4.

Normas establecidas por el Comité Europeo de Normalización.

<i>Norma</i>	<i>Título</i>
BS EN 14774-1,-2,-3:2009	Biocombustibles sólidos – Determinación contenido humedad por el método de la estufa.
BS EN 14775:2009	Biocombustibles sólidos – Determinación contenido de cenizas.
BS EN 14918:2009	Determinación del poder calorífico.
BS EN 14961:2010	Especificaciones de combustibles y clases.
BS EN 15103:2009	Determinación de densidad aparente.
BS EN 15148:2009	Determinación de materia volátil.
BS EN 15210-1:2009	Determinación de durabilidad mecánica de peletes.
CEN/TS 14588:2004	Terminología, definiciones y descripciones.
CEN/TS 14778-1, -2:2005 CEN/TS 14779:2005 CEN/TS 14780:2005	Métodos de muestreo y preparación de muestras.
CEN/TS 14104:2005	Determinación de carbono, hidrogeno y nitrógeno total – Métodos e instrumentos.
CEN/TS 15105:2005	Métodos para determinar de formas de sodio, potasio y cloro solubles en agua.
CEN/TS 15149-1, -2, -3:2006	Métodos para determinar la distribución del tamaño de partículas.
CEN/TS 15150:2005	Métodos para a determinar la densidad de partícula.
CEN/TS 15234:2006	Calidad asegurada de combustibles.
CEN/TS 15298:2006	Determinación del contenido de azufre y cloro total.
CEN/TS 15290:2006	Determinación de elementos mayores (Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na y Ti).
CEN/TS 15297:2006	Determinación de elementos menores (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, V e Zn).
CEN/TS 15370-1:2006	Método para determinar el comportamiento de fusión de cenizas.

Fuente: (Cabral et al., 2012)

Tabla 1.5.

Especificaciones para las normas de calidad de pellets y briquetas oficiales en Europa.

<i>Parámetro</i>	<i>Austria ÖNORM M7135</i>	<i>Suecia SS 187120</i>	<i>Alemania DIN 51735/DIN Plus</i>			<i>Europa CEN/TS 14961:2005</i>	
	Pellets de madera	Pellets de corteza	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	5 clases de tamaño	
Origen	Madera	Corteza				Madera sin tratamiento químico y sin corteza	
Tamaño	Pellets Ø= 4–20 mm L. máx. = 100	Briquetas Ø=20–120 L. máx. = 100	Ø <25 mm L máx. = 4 Ø	Ø <25 mm L máx. = 4 Ø	Ø <25 mm L máx. = 5 Ø	L HP1>300 HP2 150–300 HP3 100–150 HP4<100 HP<50 Ø >100 60–100 30–70 10–40 4–10	D06: Ø≤6±0,5 L≤5Ø D08: Ø≤8±0,5 L≤4Ø
Densidad aparente (kg/m ³)	---	---	≥600	≥500	≥500	---	Por definir
Finos (%) < 3 mm	---	---	≥0,8	≥1,5		Máximo 1 %	F1.0≤1,0 % ; F2.0≤2,0 %
Densidad unitaria (kg/dm ³)	≥1					1-1,4	---
Contenido de humedad (%)	≤12	≤18	≤10		≤12	≤12	M10≤10
Contenido de cenizas (%)	≤0,5	≤10,6	≤0,7	≤1,5	>1,5	≤1,5	A0.7≤0,7 A1.5≤1,5 A3.0≤3,0
Poder calorífico (MJ/kg)	≥18		≥16,9			17,5-19,5	≥16,9
Azufre (%)	≤0,04	≤0,08	≤0,08			≤0,08	S0.05≤0,05
Nitrógeno (%)	≤0,3	≤0,6				≤0,3	N0.3≤0,3 ; N0.5≤0,5 N1.0≤1,0 ; N3.0≤3,0 N3.0+ > 3.0
Cloro (%)	≤0,02	≤0,04	≤0,03			≤0,03	Cl 0.03 ; Cl 0.07 ; Cl 0.10 Cl 0.10+ (indicar valor)
Arsénico (ppm)						<0,8	
Cadmio (ppm)						<0,5	
Cromo (ppm)						<8	
Cobre (ppm)						<5	
Mercurio (ppm)						<0,05	
Plomo (ppm)						<10	
Zinc(ppm)						<100	
Halógenos						<3	
Aditivos	Máx. 2 % sólo naturales		A convenir			---	<2 % base seca, solo naturales. Debe indicarse
Punto fusión de cenizas			Debe indicarse				
Dureza mecánica	<2,3 %					<2,3 %	DU97.5≥97,5 DU95≥95,0

Fuente: Adaptado por Cabral et al., (2012), a partir de García-Maraver, Popov, & Zamorano, (2011).

CAPÍTULO 2. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE INTERÉS Y SELECCIÓN DEL RESIDUO BIOMÁSICO

2.1. Sectorización y descripción de la zona de interés

El cantón de Pococí se encuentra en el sector noreste de Costa Rica, en la vertiente caribeña. Tiene una extensión de 2 387,6 km² y un gradiente altitudinal que va desde el nivel del mar hasta los 1 760 metros. Aproximadamente el 90 % del territorio se encuentra a menos de 250 m.s.n.m, el 82 % del cantón presenta pendientes menores o iguales al 2%. La mayoría del cantón corresponde a llanuras aluviales, resultado del gran poder erosivo y de transporte de sedimentos de los ríos que lo atraviesan. Es posible identificar la influencia de la actividad volcánica de la Cordillera Central en el sur de Pococí. En cuanto a las precipitaciones, presenta una media anual entre 4 000 y 6 800 milímetros, esto producto de los vientos alisios del Mar Caribe, por lo que puede decirse que es una zona muy lluviosa. Las temperaturas promedio oscilan entre los 19 °C y 30 °C (Chaves, 2011).

Resultados del último Censo Nacional realizado en el 2011, indican que la cantidad de residentes ronda los 125 000 habitantes (INEC, 2012). Estos están distribuidos en 6 distritos: Guápiles, Jiménez, La Rita, Roxana, Cariari y Colorado. El cantón tiene una densidad de población promedio de 42,9 habitantes/km². Además, de los 81 cantones en Costa Rica, Pococí es el tercer Cantón con mayor extensión territorial superado solo por San Carlos y Talamanca con 3 347,98 km² y 2 809,93 km² respectivamente (Vásquez, 2011). En las Figuras 2.1 y 2.2 se detalla la ubicación geográfica y distribución de los distritos de este cantón.

2.2. Capacidad y uso del suelo en el cantón de Pococí

En la evaluación de los retos y compromisos del Plan Regulador de la Municipalidad de Pococí, Chaves (2011) destaca la aptitud agropecuaria de los suelos de esta región, además, destaca que se presentan patrones de crecimiento que han sido marcados por una dispersión de los asentamientos humanos, con bajas densidades y una rápida transformación en el uso del suelo, tal es el caso del aumento en los cultivos de piña. La fertilidad de los suelos de la región es alta, por lo que se hace importante conservar las tierras agrícolas, protegiéndolas de posibles especulaciones inmobiliarias o desarrollos indiscriminados, debido a su relieve plano y precio de

la tierra relativamente bajo, lo que provoca que estas zonas sean apetecidas para estos propósitos, situación que debe controlarse con regulaciones además de impulsar una diversificación productiva ordenada.



Figura 2.1. Ubicación geográfica de Pococí.

Fuente: es.wikipedia.org



Figura 2.2. Distribución distrital de Pococí.

Fuente: nacion.com

También, existen zonas donde las plantaciones forestales y palma africana prácticamente colindan con Áreas Silvestres Protegidas hacia el norte del cantón. Es posible observar que el borde sur del cantón corresponde a la Zona Protectora de Acuíferos de Guácimo y Pococí (Figura 2.3).

2.3. Principales actividades económicas/productivas del cantón de Pococí

Las principales actividades económicas son: la agricultura y ganadería, el comercio y la industria manufacturera (PNUD, 2008). La Agencia de Servicios Agropecuarios (ASA) del cantón de Pococí (2011), indica que la región centra sus principales actividades económicas en el sector agropecuario, como es el cultivo de banano, piña, la explotación ganadera, siembra

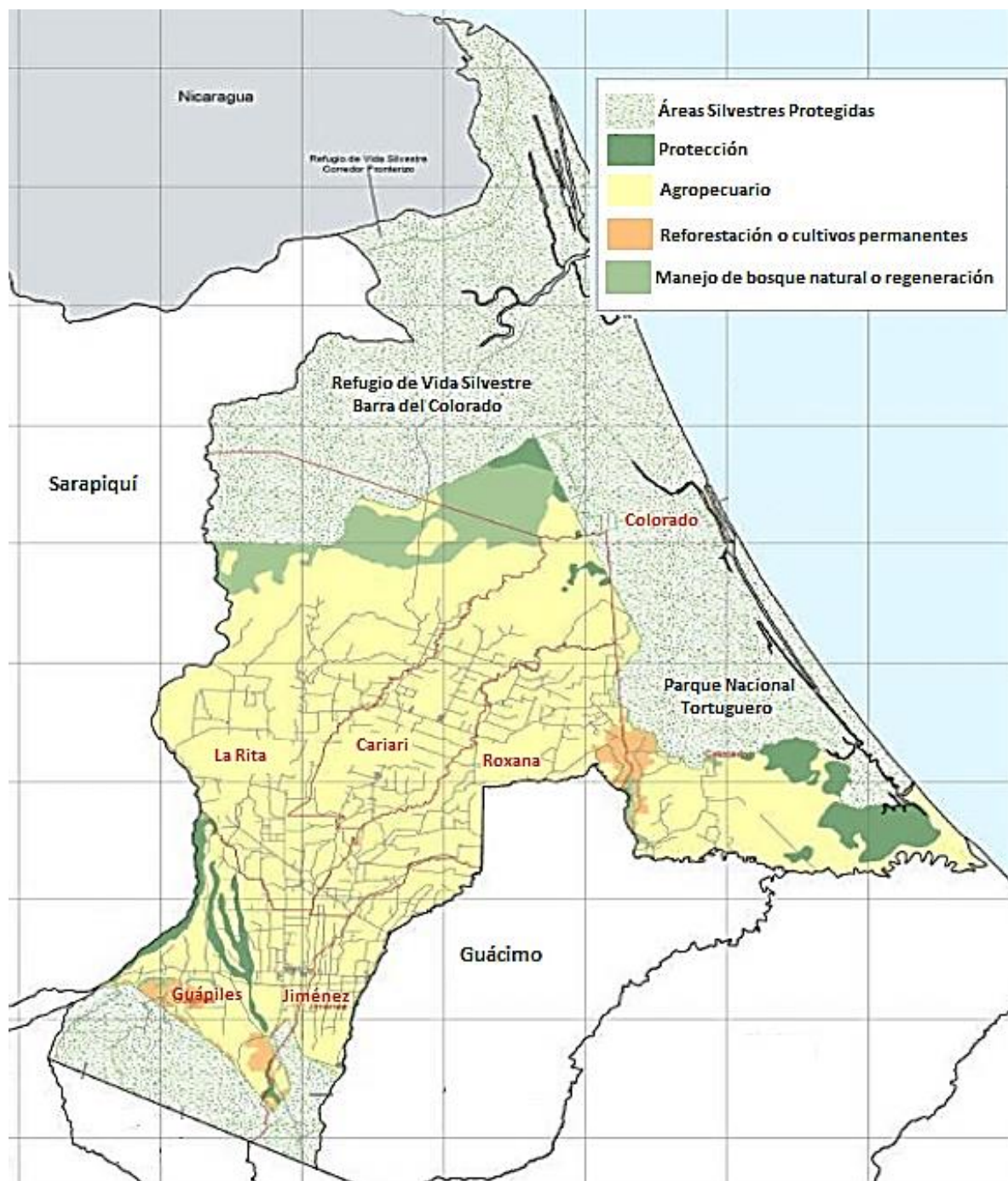


Figura 2.3. Capacidad potencial de uso del suelo de Pococí.
Fuente: (ProDUS, 2006)

de pejibaye para palmito, granos básicos como frijoles, maíz y arroz (estos últimos tres para autoconsumo); en menor cantidad se da la producción de plantas ornamentales, raíces y tubérculos como el ñame, yuca, tiquizque y ñampí; además de pejibaye y papaya (PNUD, 2008). En la Figura 2.4 se observar el estado de otras actividades de importancia económica en el cantón y la vertiente atlántica en general.

Como se ha indicado, las actividades relacionadas con el campo agropecuario son preponderantes en la zona de Pococí, sin embargo, la agricultura de monocultivos es la actividad de principal desarrollo económico de la zona, esto a pesar de no poseer una extensión territorial como la empleada para la ganadería. Además, cabe destacar que productos como la palma africana, plantas ornamentales y tubérculos en conjunto tienen una participación significativa en lo que a extensión territorial corresponde, tal y como indica JAPDEVA (2011) en la Figura 2.5. La categoría “pastos” corresponde en su mayoría a terrenos empleados a la ganadería y “otros” incluye la palma, plantas ornamentales y tubérculos.

En la Tabla 2.1 se recopila información aproximada, de la cantidad de hectáreas destinadas a las actividades agrícolas de mayor importancia económica en la región. Esto de acuerdo a las cámaras y agrupaciones de productores correspondiente a cada uno de los cultivos, así como datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería según sus oficinas locales.

Para el caso de la actividad forestal y de aserrío, es necesario definir la clasificación de zonas geográficas que establece el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), donde los cantones de Pococí y Guácimo conforman prácticamente la totalidad del Área de Conservación Tortuguero, tal y como se muestra en la Figura 2.6.

Referente a la actividad forestal, y más exactamente a las plantaciones forestales, Guerrero (2013) indica que en el Área de Conservación Tortuguero (ACTo) y más específicamente en Pococí, al año 2012 se procesaron 73 solicitudes para establecer un total de 7 884,1 hectáreas de bosque en sistema de protección (a emplear como pago por servicios ambientales); se recibieron alrededor de 20 solicitudes para implantar 1 056 hectáreas de bosque en la modalidad de reforestación para futuro aprovechamiento. También se registró un aumento de 15 hectáreas en regeneración natural como parte de sistemas agroforestales.

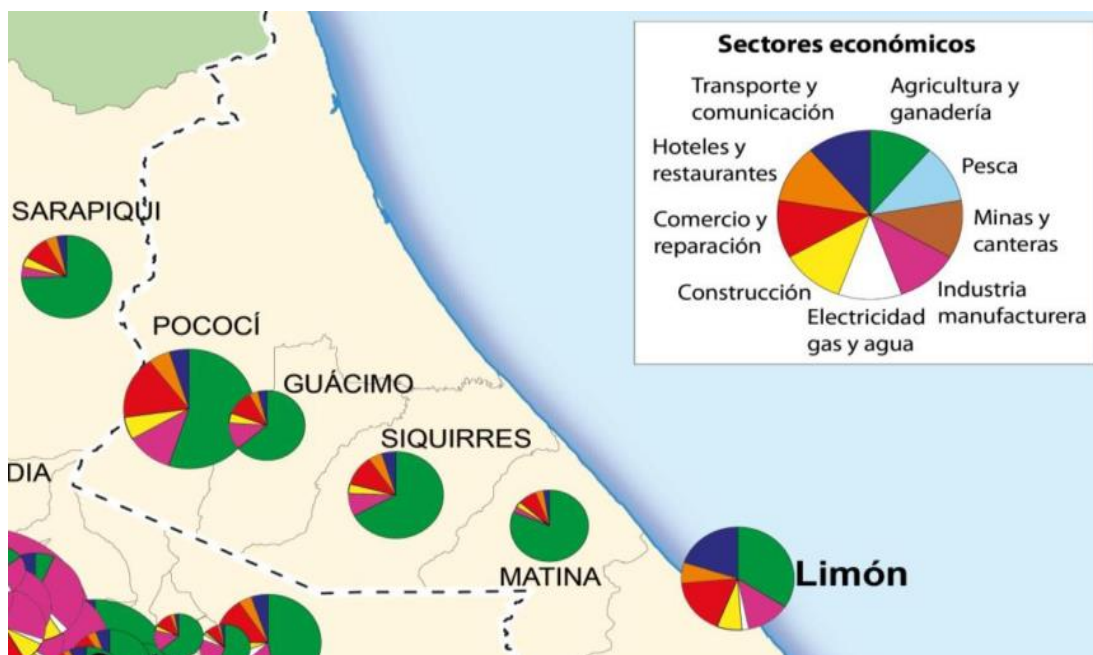


Figura 2.4. Población ocupada en las principales actividades económicas de la región atlántica.
Fuente: (JAPDEVA, 2011)

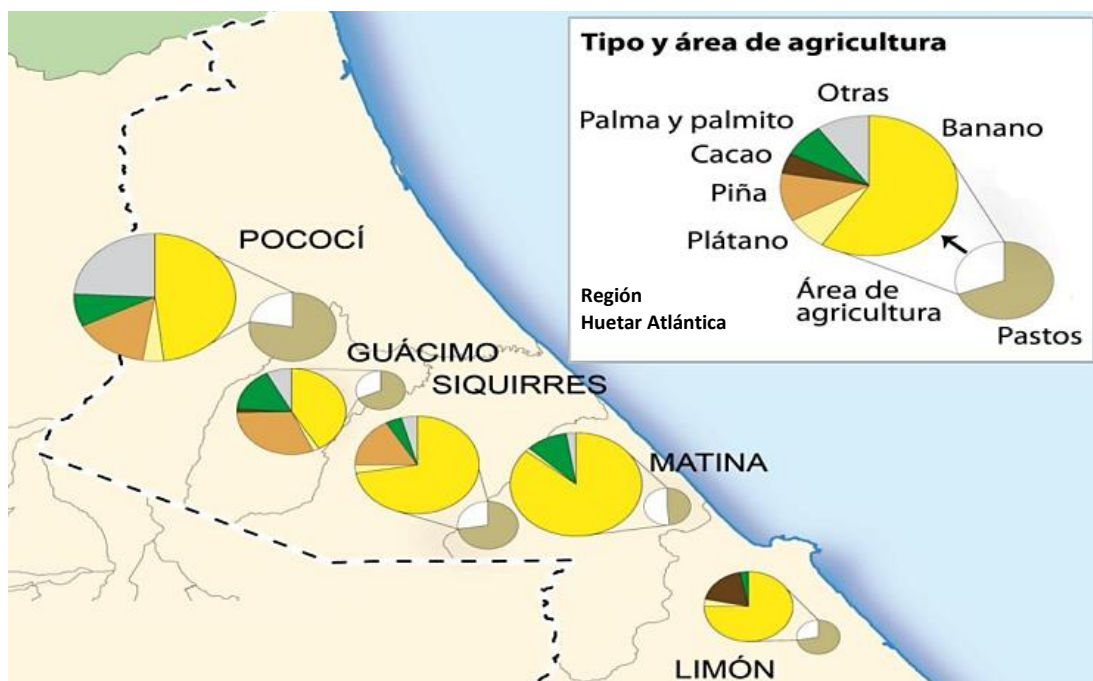


Figura 2.5. Distribución de las actividades agropecuarias en la Región Huetar Atlántica.
Fuente: (JAPDEVA, 2011)

Tabla 2.1.

Hectáreas destinadas a las principales actividades de corte agrícola en Pococí.

<i>Cultivo</i>	<i>Superficie cultivada (hectáreas)</i>	<i>Fuente</i>
Banano	8 399 ^a	(CORBANA, 2013)
Piña	4 293 ^b	(MAG, 2011)
Palmito	865 ^b	(MAG, 2011a)
Plátano	640 ^a	(SEPSA, 2013)
Palma africana	608 ^b	(MAG, 2011)
Arroz	588,5 ^a	(SEPSA, 2013)
Maíz	75 ^a	(SEPSA, 2013)
Frijol	10 ^a	(SEPSA, 2013)

^a Datos oficiales al 2012 ; ^b Datos proyectados al 2012.

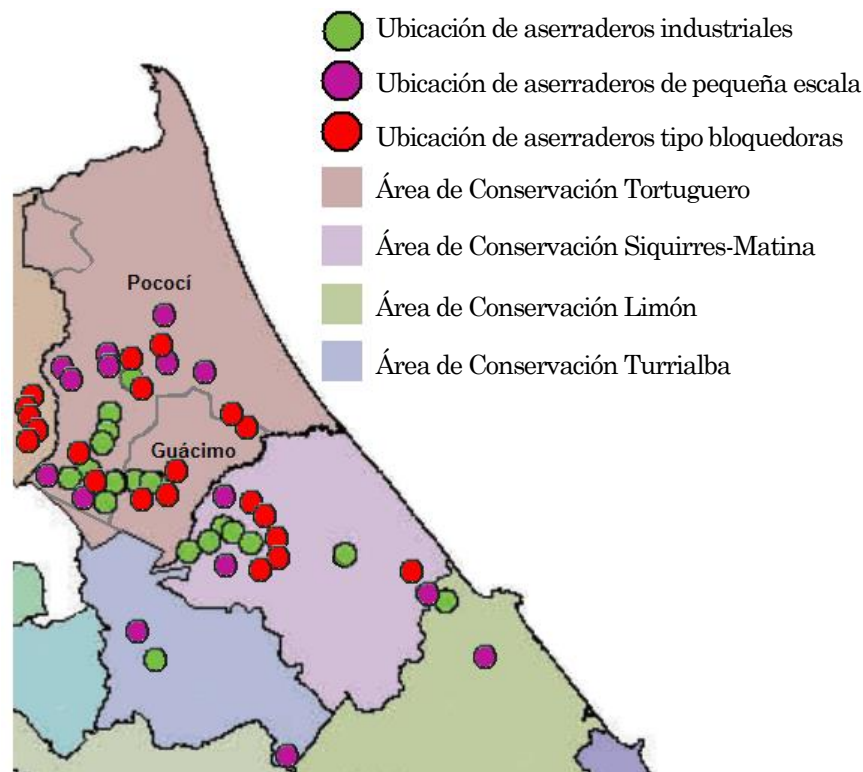


Figura 2.6. Áreas de conservación en la Región Atlántica Norte y distribución de aserraderos.
 Fuente: Elaborado a partir de datos de (SINAC, 2011)

Datos de Chavarría & Castillo (2011), señalan que en el ACTo se aprobó el aprovechamiento de un volumen de madera de 95 681,7 m³ (21,5 % del volumen nacional aprobado) correspondiente a 245 389 árboles. Esta madera proviene de modalidades de

aprovechamiento como “permisos pequeños” (menor o igual a 10 árboles), inventario forestal, sistemas de fincas agroforestales y planes forestales (manejados para futuro aprovechamiento maderero).

Respecto a la industria de la madera y aserraderos, el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (2011) en el último *Censo Nacional de la Industria Forestal Primaria 2011*, informa que para el ACTo la industria del aserrado de madera está compuesta de 41 empresas, de las cuales 38 están activas y 4 estaban inactivas temporalmente. Asimismo, destacan en la zona la presencia de aserraderos de “diámetros mayores” (industriales), que por sus dimensiones siempre se mantienen estables en el lugar de la industria; por otro lado se tienen los aserraderos con “bloquedoras”, caracterizados por sistemas construidos con espadas de motosierras o con discos intercambiables (mediana escala) y por último los aserraderos de diámetros “menores” (pequeña escala), que funcionan dentro de la industria (estacionarios) o que se desplazan al sitio de aprovechamiento. SINAC (2011), también señala que los aserraderos de diámetros mayores (industriales) tienen mayor presencia principalmente en la Zona Atlántica y Norte del país. En la Figura 2.6 se evidencia una mayor presencia de aserraderos (en escala pequeña e industrial) en el cantón de Pococí, esto respecto al cantón de Guácimo. Los resultados del censo también indican que en la ACTo, 19 aserraderos procesan madera para la construcción, 5 para la construcción y ebanistería en conjunto, 5 para materiales de embalaje, 3 únicamente para ebanistería, 3 para construcción y embalaje; además, 3 empresas no precisaron del todo su actividad. En total se encontraron 38 aserraderos activos a la fecha.

Finalmente, es importante destacar que los aserraderos de diámetros “mayores” son 13 y que en su totalidad son tipo estacionarios; los aserraderos de diámetros “menores” son 10, de los cuales 8 son estacionarios y 2 ambulantes; finalmente se tiene aserraderos tipo “bloquedoras” que en su totalidad son estacionarios.

2.4. Potencial de generación y manejo de residuos biomásicos de las principales actividades agrícolas y forestales del cantón de Pococí

Se presenta en esta sección el estudio particular de las actividades agroforestales desde el punto de vista de los residuos que generan, así como el manejo que se les da a estos como parte de las labores de gestión de residuos propias de cada actividad.

2.4.1. Biomasa residual agrícola

2.4.1.1. Banano:

Según Ramírez, Carazo, Roldán, & Villegas (2007), de la actividad bananera se puede obtener biomasa residual del banano de desecho y el pinzote.

Del pinzote se puede obtener fibras después de un proceso de secado, ya que posee un contenido de humedad superior al 90 % (Villalobos & Alvarado, 2013). Por lo que antes de pensar en utilizarlo en la producción de energía es necesario reducir su contenido de agua por lo menos a un 50 %, lo cual sería posible mediante prensas hidráulicas (Ramírez et al., 2007).

Datos de Villalobos & Alvarado (2013) apuntan que la generación de pinzote por hectárea al año corresponde aproximadamente a 4,69 toneladas, o sea, aproximadamente 39 400 ton/año tomando como referencia toda la superficie de banano cultivada en Pococí al 2012 (8 399 hectáreas). Respecto al manejo de los residuos, se informa que la totalidad del pinzote es empleado como abono orgánico en la misma plantación, y en el caso del banano de desecho, parte es para consumo humano y animal en las cercanías, o se comercia en el mercado nacional; lo demás es empleado en la industria de productos procesados a base banano.

2.4.1.2. Piña

Del cultivo de piña se obtienen dos subproductos biomásicos, a saber, la corona de piña y el “RAC” o rastrojo. El rastrojo es la materia correspondiente a las hojas de la planta que quedan en el campo una vez superado el proceso cosecha, se estima que una hectárea cultivada de piña puede generar hasta 250 toneladas de residuo, y estas son renovadas cada 2 a 2,5 años (100 ton/ha/año) (Villalobos & Alvarado, 2013). En el caso de la corona, la biomasa producida corresponde aproximadamente al 7 % de la producción de residuos totales (Ramírez et al., 2007).

Si se considera la totalidad de área proyectada de piña a cultivar en Pococí al 2012 (4 293 hectáreas), se puede calcular una cantidad de residuo de 429 300 ton/año, aunque claramente la mayor parte de esta masa está compuesta de agua, tal y como indican Villalobos & Alvarado (2013), que informan que los residuos de piña poseen un contenido de humedad entre el 86 % y 88 %, por lo que necesariamente requieren de un proceso previo para eliminar el exceso de humedad y obtener materia seca (Villalobos & Alvarado, 2013).

En lo que concierne al manejo de estos residuos, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (2011b) viene impulsando buenas prácticas de manejo del residuo, esto ya que el rastroy es hospedero de los huevecillos de la mosca de establo (*Stomoxys calcitrans*) plaga que afecta al ganado bovino. Las prácticas de manejo del residuo incluyen la incorporación al suelo durante la mecanización de este (realizada con maquinaria agrícola); también se práctica en algunos casos la quema con fuego, esto posterior a que los residuos se han dejado secar in-situ.

2.4.1.3. Palma africana

La actividad productiva de la palma genera principalmente tres residuos biomásicos, estos son la cáscara del coquito, la fibra del mesocarpio y el pinzote. Según datos, se puede obtener hasta 3,23 toneladas de pinzote por hectárea al año, para el caso del mesocarpio se generan hasta 1,94 toneladas/ha/año; y en el caso del coquito se obtiene un aproximado de 0,81 toneladas/ha/año (Villalobos & Alvarado, 2013).

Referente al manejo de estos residuos Ramírez et al., (2007) indican que más del 50% del coquito se emplea como combustible para diferentes aplicaciones (inclusive en la misma industria de extracción de aceite), el resto es empleado como abono orgánico en viveros. La fibra de mesocarpio normalmente es empleada como combustible en la misma industria. Para el caso del pinzote, se reporta que es empleado como combustible, abono orgánico y en otros casos simplemente se desecha.

2.4.1.4. Palmito

Ramírez et al., (2007) indican que de este cultivo se obtienen residuos de la cáscara de palmito y trozos de palmito no procesados. Sus datos señalan que el total de cáscara y trozos de palmito generados en el país anualmente, logró alcanzar las 9 800 toneladas, también señalan que estos fueron producidos principalmente en la Región Hueta Atlántica y Hueta Norte.

Respecto al manejo del residuo, se informa que el uso que se le están dando actualmente es para abono orgánico en el caso de la cáscara y de alimento para animales en el caso de los trozos de palmito.

2.4.2. Residuos biomásicos forestales

Costa Rica dispone de mucha información sobre especies maderables; sin embargo, existe un vacío en lo referente al área total sembrada de madera y su subdivisión por especies (Villalobos & Alvarado, 2013). El caso del cantón de Pococí está dentro de esta situación mencionada, esto aunque existe una base de datos de la cantidad de aserraderos que podrían estar en funcionamiento en la actualidad, se carece de información precisa de cuanta madera es procesada por cada uno de estos, y por consiguiente no es posible aproximar la cantidad de residuos generados con datos precisos.

Sin embargo, se esperaría que la cantidad de residuos sea significativa en la zona estudiada, esto porque los volúmenes de madera con permiso de aprovechamiento de la zona corresponde a la segunda en importancia a nivel nacional, sólo superado por la Región Huetar Norte, región para la cual sí existe información detallada de la actividad de la industria maderera, como lo es el “*Diagnóstico de las existencias de los residuos forestales en la región Huetar Norte de Costa Rica*” elaborado por Chacón (2012) para el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal.

Según datos del diagnóstico mencionado, en el 2011 el país se procesó 697 089 m³ de madera en troza, de los cuales aproximadamente 247 559,15 m³ fueron aprobados para aprovechamiento sólo en las regiones de San Carlos, Los Chiles, Pital y Cureña en la Zona Norte (36% del total nacional). En el caso de la Región Huetar Atlántica Norte o ACTo (conformado por Pococí y Guácimo) se aprobaron para aprovechamiento 95 681,7 m³ de madera en troza (13% nacional), la segunda cantidad más importante a nivel nacional (Chavarría & Castillo, 2011).

Chacón (2012) informa que del procesamiento de los 247 559,15 m³ de madera de la Región Huetar Norte, se obtuvieron alrededor de 78 500 toneladas de residuos, también indica que este valor tiene una variabilidad estimada del 10%, que depende principalmente de los criterios de subestimación del material por parte de los productores de aserradero. Además, informa que la leña es el tipo de residuo más abundante con una producción de alrededor de 36 000 toneladas/año, seguido por las astillas comúnmente conocidos como “chips” con un cantidad generada de 21 000 toneladas/año, el tercero de los residuos en mayor cantidad es el aserrín con 19 500 toneladas/año, y el tonelaje anual restante normalmente corresponde a

burucha. La Figura 2.7 muestra un esquema de los subproductos generados durante el procesamiento de la madera.



Figura 2.7. Residuos generados en la industria maderera.

Fuente: Elaborado por Chacón (2012) a partir de (Quirós, Chinchilla, & Gómez, 2003)

A partir de los datos de la Zona Norte indicados anteriormente, y proyectándolos al volumen de madera que se procesó en Pococí y Guácimo (ACTo) al 2011 (95 681,7 m³) podría estimarse que se obtendrían hasta 30 000 toneladas de residuos madereros al año (aproximando linealmente), lo que el autor considera una cantidad nada despreciable, si se compara con los residuos biomásicos de actividades como el banano y la piña, que además son biomásas con un contenido de humedad sumamente alto (alrededor de 93% y 87% respectivamente), lo que deja claro que la masa de estos residuos agrícolas, prácticamente corresponde al agua almacenada en sus tejidos, caso que no sucede para residuos de aserradero (leña, aserrín, astillas y burucha), ya que Ramírez (2007) señala que para el caso de estos residuos, normalmente el contenido de humedad oscila entre el 15 % y el 25 %, por lo que la masa de los residuos de aserradero en su mayor parte corresponde a materia seca, lo que claramente representaría una menor inversión energética en secado, y una ventaja sobre los residuos de corte agrícola en el caso de plantearse un esquema de aprovechamiento energético con estos.

Es claro que la determinación de la cantidad de residuos generados en la actividad industrial maderera en Pococí, debe ser objeto de un método y proceso más riguroso, sin embargo, dicha cuantificación tan precisa se escapa del enfoque de los objetivos de esta

investigación. No obstante, difícilmente se puede obviar que existe una cantidad considerable de industrias madereras en el cantón de Pococí, y que por ende, que se genera una cantidad de residuos forestales significativa, que eventualmente podrían ser mejor despachados y aprovechados.

2.5. Selección del residuo biomásico para la etapa de elaboración de pellets

En el Capítulo 1 se hizo un análisis de distintas fuentes donde se exponían las principales propiedades físicas, térmicas y químicas de pellets elaborados de diversos materiales biomásicos, predominando la caracterización de los residuos madereros (distintas variedades forestales); sin embargo, también fue posible encontrar el estudio de residuos de corte agrícola (pajas, tallos, follaje, etc.) para elaborar pellets con fines energéticos. Asimismo, se describieron los procesos característicos que la biomasa debe pasar para obtener combustible densificado en diferentes variantes, haciendo énfasis en los procesos y equipos requeridos para elaborar pellets, así como las propiedades que debe tener la biomasa (humedad, tamaño partículas, poder calorífico, etc.) para entrar en procesos de peletizado. Por tanto, con base en lo estudiado en el capítulo 1, así como factores expuestos en este capítulo, referentes a la superficie cultivada, cantidad de residuo generado y las características propias de los residuos; el autor de este trabajo se inclinó por seleccionar residuos biomásicos forestales para entrar en la etapa de elaboración de pellets y su posterior caracterización. Se toman a consideración principalmente los siguientes puntos

- ✓ La cantidad aproximada de residuos generada es comparable con la de las dos actividades agrícolas más importantes de Pococí (banano y piña).
- ✓ En la zona de Pococí y Guácimo existe una cantidad significativa de empresas dedicadas al aprovechamiento de madera con alto potencial de generación de residuos.
- ✓ Los volúmenes de madera aprobados para aprovechamiento en la zona, forman parte considerable del total aprovechado a nivel nacional.
- ✓ Los contenidos de humedad de los residuos forestales son relativamente bajos, por lo que la cantidad biomasa generada corresponde en su mayoría a materia seca, caso que presenta una ventaja sobre la biomasa residual tipo agrícola.
- ✓ Los poderes caloríficos de biomásas forestales comúnmente son mayores que los de biomásas residuales agrícolas.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Recolección de los residuos biomásicos de aserradero

Los residuos fueron recolectados en un aserradero de una pequeña localidad del distrito de Roxana, cantón Pococí. Estos fueron generados a partir del procesamiento de madera de Pílón (*Hyeronima alchorneoides*) y Eucalipto (*Eucalytus spp*). En general se colectó aserrín y burucha residual en combinación de las dos especies, esto debido a que normalmente en cualquier aserradero los residuos son acumulados en un sector de este sin ningún tipo de separación. Las muestras fueron colectadas en bolsas plásticas cerradas herméticamente para evitar derrames, absorción de humedad y pérdida de material en el transporte (Figura 3.1).



Figura 3.1. Recolección de los residuos de aserradero.

a) Vista aserradero b) Residuo acumulado c) Residuo colectado

3.2. Elaboración de los pellets en el laboratorio

La totalidad de tareas de esta sección se realizaron en el taller de carpintería y en el laboratorio de la Unidad de Recursos Forestales del Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica.

3.2.1. Pretratamiento de la biomasa

Los residuos de aserradero fueron acondicionados dándoles un tratamiento previo entrar en el proceso de peletizado, tal y como muestra el diagrama esquemático de la Figura 3.2; en la Figura 3.3 se muestran los equipos empleados para estas labores. El pretratamiento consistió en triturar las partículas de mayor tamaño presentes en el material colectado en el aserradero (Figura 3.3a); seguidamente, se empleó un molino de martillos para moler y

uniformizar el tamaño de partículas (Figura 3.3b y 4.3c). Posteriormente, el material molido fue secado a un contenido de humedad de 8 % (b.h.) (Figura 3.3d). Finalmente, el aserrín se tamizó empleando una malla #10 (según Estándar ASTM-11) de apertura de 2 mm (Figura 3.3e y 3.3f).

Luego de finalizado el pretratamiento del residuo, este fue almacenado y debidamente sellado para evitar pérdida o ganancia de humedad, y seguidamente se guardó en cuarto de acondicionamiento de muestras a una temperatura de 25 °C.

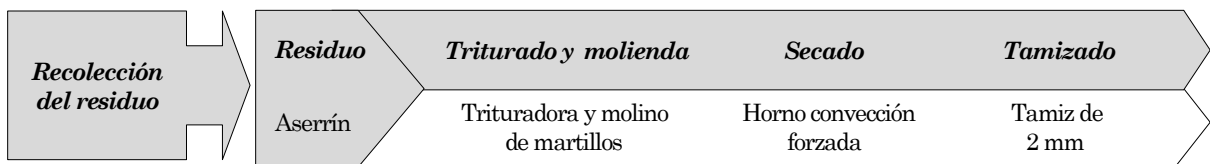


Figura 3.2. Etapas de preparación de la biomasa previas al peletizado.



Figura 3.3. Equipo empleado para el pretratamiento de la biomasa.
a) Trituradora b) Molino c) Molienda d) Horno e) Tamiz f) Residuo pre-tratado

3.2.2. Equipo y metodología empleada para elaborar los pellets

Se utilizó equipo de densificación de biomasa construido para el proyecto “Caracterización de pellets utilizando diferentes tipos de residuos lignocelulósicos y aglutinantes de procedencia nacional”, desarrollado en la Unidad de Recursos Forestales del Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica. El equipo se muestra en la Figura 3.4.

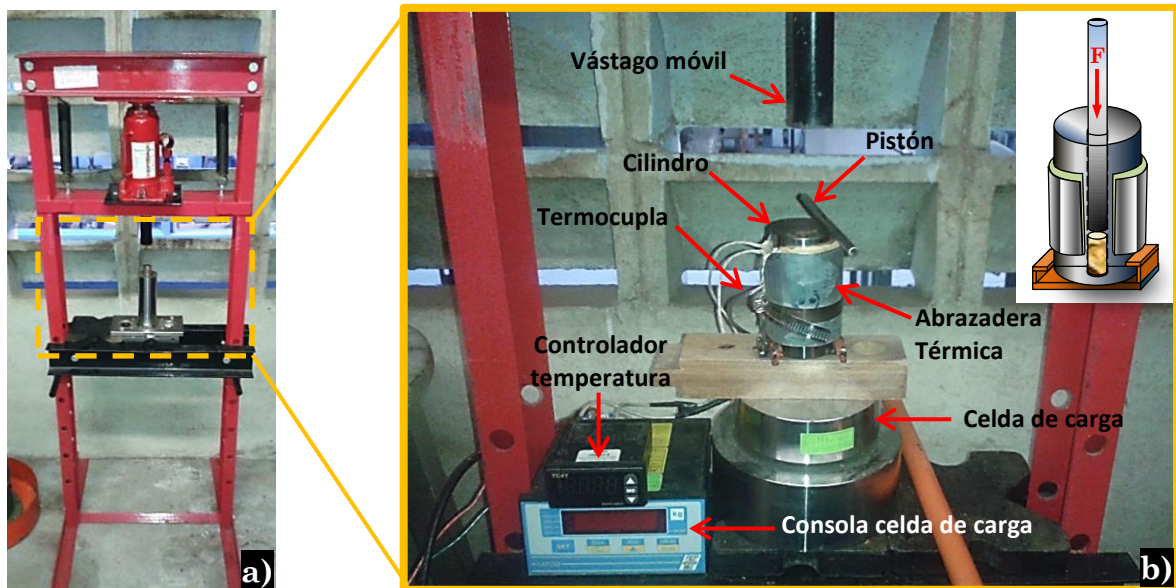


Figura 3.4. Equipo experimental empleado para elaborar los pellets.
a) Prensa hidráulica b) Cilindro - pistón (más accesorios)

Este equipo funciona mediante un sistema cilindro-pistón; está compuesto de dos cilindros que tienen 15 cm de largo y perforaciones de 8 mm y 10 mm de diámetro en su eje longitudinal (mismo diámetro que tendrán los pellets). Pistones del mismo diámetro (8 mm ó 10 mm) y 25 cm de largo se introduce en la cavidad cilíndrica para comprimir el material.

A los cilindros se les colocó un calentador eléctrico tipo abrazadera, y una termocupla que se introduce directamente en los cilindros metálicos, permitiendo registrar la temperatura del cilindro mediante una consola digital con una precisión de ± 1 °C; a partir de las lecturas de temperatura del cilindro, la consola digital regula el calor generado por la abrazadera, manteniendo al cilindro a una temperatura constante según sea la temperatura programada.

En la base del equipo de peletizado se colocó una celda de carga conectada a su propia consola digital, esta indica la fuerza aplicada y da lecturas hasta los 50 000 kgf con una precisión de ± 7 kgf.

El equipo se instaló una prensa hidráulica manual, esta posee un vástago móvil que imprime la fuerza al pistón y este a la biomasa. La prensa hidráulica es capaz de ejercer una fuerza máxima de 178 kN (12 000 kgf).

Para elaborar pellets de 8 mm de diámetro se depositó en el cilindro $1,2 \pm 0,1$ g de residuo y para el caso de los pellets de 10 mm se depositó $2,0 \pm 0,1$ g; esto con el objetivo de obtener densificados de un largo similar (alrededor de 2 cm). Todos los pellets fueron fabricados comprimiendo la biomasa durante 60 segundos.

En la fabricación de los pellets se siguió un arreglo factorial para los tratamientos aplicados durante el proceso de densificación. La Tabla 3.1 resume cada uno de los tratamientos y niveles de los que estos están compuestos.

Tabla 3.1.
Tratamientos y sus niveles

<i>Contenido humedad</i>	<i>Granulometría</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Fuerza de compresión</i>	<i>Tiempo de compresión</i>	<i>Diámetro</i>
8%	Partículas ≤ 2 mm	90 °C	300 kgf (2 943 N)	60 s	8 mm
		105 °C	500 kgf (4 905 N)		10 mm

De acuerdo con los datos de la Tabla 3.1, se obtuvieron 8 unidades experimentales, tal y como se muestra a continuación.

$$\begin{array}{cccccccc}
 1 & \times & 1 & \times & 2 & \times & 2 & \times & 1 & \times & 2 & = & 8 \\
 \text{Cont. Humedad} & & \text{Granulometría} & & \text{Temperatura} & & \text{Fuerza} & & \text{Tiempo} & & \text{Diámetro} & & \text{Unidades} \\
 & & & & & & & & & & & & \text{Experimentales}
 \end{array}$$

Los factores modificados durante la densificación corresponden a variables independientes, y se estudió el efecto de estas sobre las propiedades de los pellets. Las propiedades determinadas y los métodos empleados para esto, se detallan en la sección siguiente.

3.3. Caracterización de los pellets

3.3.1. Propiedades físicas

La densidad aparente de los pellets fue evaluada con un recipiente cilíndrico de 7,5 cm de altura y 9,0 cm de diámetro, tal y como se muestra en la Figura 3.5. El método seguido se basó en la Norma ASAE-124 para la determinación de propiedades físicas de pellets y briquetas. La muestra de pellets se depositó en el cilindro hasta llenarlo al ras, seguido se tomó la masa de la muestra en una balanza digital con una precisión de $\pm 0,1$ g. Este procedimiento se realizó por triplicado, con lo que se reportó el promedio. Para determinar la densidad aparente se empleó la siguiente ecuación

$$\rho_a = \frac{m_T}{v_c} \quad [\text{Ec. 3.1}]$$

Donde

ρ_a es la densidad aparente (kg/m^3)

m_T es la masa total de la muestra (kg)

v_c es el volumen del cilindro (m^3)



Figura 3.5. Equipo empleado para determinar la densidad aparente.

a) Llenado del cilindro b) Pesado de la muestra

La determinación de la densidad unitaria (densidad real o de partículas) y la dureza mecánica (durabilidad, porcentaje de partículas o “*DU*”), se realizó de forma consecutiva. Para determinar la dureza mecánica se utilizan muestras de 35 pellets, de estas muestras de 35 pellets se tomaron tres pellets aleatoriamente para determinar la densidad unitaria; posteriormente, estos tres pellets se devolvieron a la muestra para completar los 35 pellets, y se procedió a determinar la dureza mecánica. Lo anterior se realizó por triplicado (para la

densidad unitaria y dureza mecánica) y se reportó el promedio. Los métodos con los que se determinaron estas dos propiedades se detallan continuación.

Para determinar la densidad unitaria (ρ_u) la masa del pellet fue medida empleando una balanza digital con una precisión de $\pm 0,01$ g, seguidamente se midió el diámetro y la longitud de este utilizando un vernier digital de precisión $\pm 0,01$ mm; posteriormente se calculó su volumen (Figura 3.6). Finalmente, la densidad unitaria se determinó con la siguiente ecuación

$$\rho_u = \frac{m_p}{v_p} \quad [\text{Ec. 3.2}]$$

Donde

ρ_u es la densidad unitaria (g/dm^3)

m_p es la masa del pellet (g)

v_p es el volumen del pellet (dm^3)



Figura 3.6. Procedimiento y equipo empleado para determinar la densidad unitaria.

a) Pesado del pellet b) Medición del diámetro c) Medición del largo

Para determinar la dureza mecánica de los pellets (durabilidad, porcentaje de partículas o “*DU*”) se empleó equipo construido en el laboratorio, este consta de un tambor cilíndrico rotatorio con dos pestañas colocadas de forma longitudinal en sus paredes (Figura 3.7). El diseño de este equipo y la metodología seguida se adaptó según lo presentado por Gil et al., (2010) quienes se basaron en estándares de CEN/TS y ASAE para determinar la dureza mecánica de pellets.

El método empleado consistió en determinar la masa de 35 pellets, y depositarlos dentro del tambor para hacerlos girar a 40 rpm de forma constante hasta alcanzar un total de 625 revoluciones, o hacerlos girar por 15,6 minutos. Posteriormente la muestra se tamizó (tamiz

#10 de 2 mm) para finalmente determinar la masa del material que quedó en el tamiz. Lo anterior se realizó por triplicado, y se reportó el promedio.

La dureza mecánica (DU) se reportó como el porcentaje obtenido por la diferencia entre la masa inicial de los 35 pellets y la masa que queda en el tamiz al finalizar el tamizado; esta se determinó con la siguiente ecuación

$$DU = 100 - \left[\frac{m_i - m_f}{m_i} \right] \quad [\text{Ec. 3.3}]$$

Donde

DU es la dureza mecánica (%)

m_i es la masa inicial de los 35 pellets (g)

m_f es la masa final de los pellets que quedan en el tamiz (g)

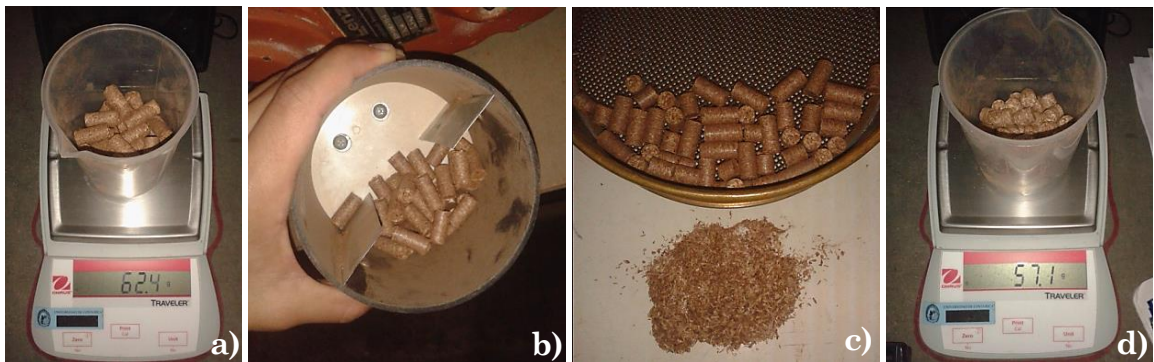


Figura 3.7. Equipo empleado para determinar la dureza mecánica.

- a) Determinación masa 35 pellets b) Muestra colocada en tambor de dureza
c) Tamizado de muestra evaluada d) Determinación masa de pellets en el tamiz.

3.3.2. Propiedades térmicas

Se determinó la conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico de los pellets empleando equipo construido en el laboratorio; este equipamiento se adaptó según lo descrito por Guo et al., (2013) y Bitra et al., (2010), en la Figura 3.8 se muestra un esquema general de los componentes que lo conforman.

El equipo funciona bajo el fundamento termodinámico de un cilindro infinito. Está construido con tubo PVC de 10 cm de diámetro y 30 cm de largo; en sus dos extremos está recubierto con aislante térmico (“Styrofoam”) y sellado con tapones de los cuales uno es removible con el fin de rellenar con muestra el cilindro. A lo largo del eje central del cilindro pasa una resistencia eléctrica de 30 cm de largo, que funciona como de fuente de calor lineal; se

asume la hipótesis que se da conducción de calor unidireccional y radial a partir de la fuente lineal de calor, esto según lo indicado por Incropera et al., (2007). Se aplicó a la resistencia un voltaje de 1,75 V y un consumo de corriente eléctrica de 1,50 A. El equipo se puso en funcionamiento dentro de una cámara tipo incubadora con temperatura constante de 23 °C.

Las corridas experimentales del equipo consisten en llenar el cilindro de la muestra de pellets y activar la fuente de poder, seguidamente se registra el cambio de la temperatura de la resistencia y diferentes puntos en el interior del cilindro según como se indica en la Figura 3.8. Lo anterior es realizado con 4 termopares; el termopar T_0 registra el cambio de la temperatura de la resistencia y otros tres termopares T_1 , T_2 , y T_3 registran la temperatura en puntos ubicados a una distancia radial de 1 cm, 2,5 cm y 4 cm respectivamente; un último termopar T_4 registra la temperatura de la cámara. Finalmente, el cambio en los perfiles de temperatura con el tiempo para cada uno de los puntos estudiados (T_0 , T_1 , T_2 , y T_3), se relacionan con la conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico de la muestra, de acuerdo con las ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.6 respectivamente.

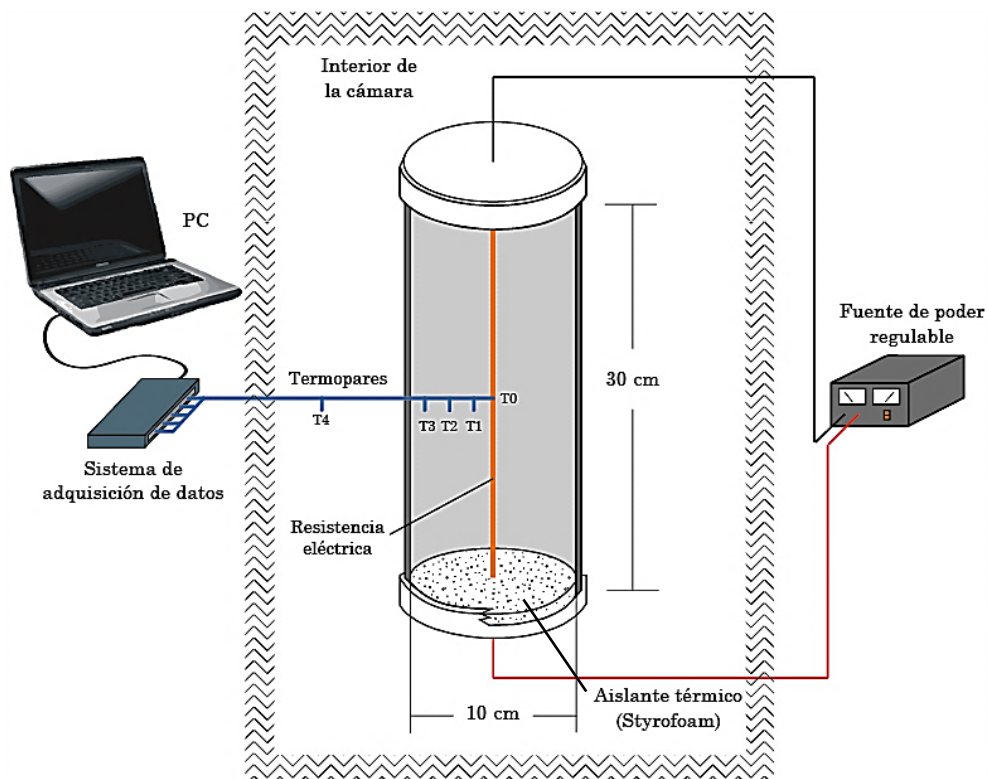


Figura 3.8. Esquema del equipo empleado para determinar las propiedades térmicas.

Para estimar la conductividad térmica se empleó la siguiente ecuación, según proponen Ramaswamy et al., (2003)

$$k = \frac{q}{4\pi L(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad [\text{Ec. 3.4}]$$

Donde

k es la conductividad térmica de la muestra ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

q es la potencia disipada por la resistencia (W)

L es la longitud del cilindro (m)

T_1 y T_2 son las temperaturas inicial y final de la resistencia respectivamente ($^{\circ}\text{C}$)

t_1 y t_2 son los tiempos inicial y final respectivamente (s)

La difusividad térmica se determinó según indican Moura, Devilla & Martins (2010), quienes proponen la siguiente ecuación

$$\alpha = \left[\frac{e^{\left(\frac{4\pi k \cdot \Delta T}{q} + \gamma\right)}}{4t} \right] r^2 \quad [\text{Ec. 3.5}]$$

Donde

α es la difusividad térmica de la muestra ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

r es la distancia radial de toma de lecturas (m)

ΔT es el gradiente de temperatura a la distancia r ($^{\circ}\text{C}$)

k es la conductividad térmica de la muestra ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

q es la potencia disipada por la resistencia (W)

γ es la constante de Euler ($\gamma = 0,5772$)

t es el intervalo de tiempo de las mediciones (s)

Una vez determinada la densidad aparente, la conductividad y difusividad térmica de las muestras, se determinó de forma indirecta el calor específico de estas empleando la ecuación 4.6, según proponen Ramaswamy et al., (2003)

$$C_p = \frac{k}{\alpha \rho_a} \quad [\text{Ec. 3.6}]$$

Donde

C_p es el calor específico de la muestra ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

k es la conductividad térmica de la muestra ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

α es la difusividad térmica de la muestra ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

ρ_a es la densidad aparente de la muestra ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

3.3.3. Propiedades fisicoquímicas

Se determinó el contenido de cenizas de los pellets siguiendo el procedimiento establecido en la Norma CEN/TS 14775:2009, elaborada por el Comité Europeo de Estandarización para la determinación del contenido de cenizas de biocombustibles sólidos; este método es equivalente al de normativas de entes como ISO o ASTM.

En resumen, el método consistió en registrar la masa de una muestra de pellets superior a 1 g y colocarla en un horno (tipo “mufla”) a 250 °C durante 1,5 horas; seguidamente se aumentó la temperatura a 550°C y se mantuvo durante un periodo de 2,5 horas. Posteriormente, se registró la masa de las cenizas obtenidas al final del procedimiento. El contenido de cenizas de la muestra expresado en porcentaje de la masa en base seca, se determinó empleando la ecuación 3.7

$$C_{bs} = \frac{100 \cdot m_f}{m_i} \cdot \frac{100}{(100 - CH_{bs})} \quad [\text{Ec. 3.7}]$$

Donde

C_{bs} es el contenido de cenizas de la muestra de pellets en base seca (%)

m_i es la masa inicial de la muestra de pellets (g)

m_f es la masa final de las cenizas (g)

CH_{bs} es el contenido de humedad de la muestra en base seca (%)

Para el anterior procedimiento se realizaron tres repeticiones para cada una de las unidades experimentales fabricadas, con lo que se reportó el promedio de las mediciones.

El poder calorífico superior (PCS) de los pellets fue determinado en el Laboratorio de Fisicoquímica de la Escuela de Química de la Universidad de Costa Rica. Para ello se empleó una bomba calorimétrica “Parr Oxigen Bombs” como se muestra en la Figura 3.9. Se determinó el poder calorífico superior tres muestras escogidas de forma aleatoria para cada unidad experimental, con lo que se reportó el promedio de cada unidad experimental.

Para calcular el poder calorífico inferior (PCI) de las muestras, se restó al (PCS), el calor de condensación de la humedad presente en las muestras. Para esto se empleó la siguiente ecuación

$$PCI = PCS - (CH \cdot L_c) \quad [\text{Ec. 3.8}]$$

Donde

PCI es el poder calorífico inferior de la muestra ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

PCS es el poder calorífico superior de la muestra ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

CH es el contenido de humedad de la muestra en base húmeda ($CH = 0,08$)
(todos los pellets fueron elaborados con aserrín al 8% de humedad, base húmeda)

L_c es el calor latente de condensación del vapor de agua liberado en la combustión de la muestra ($L_c = 2\,257 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

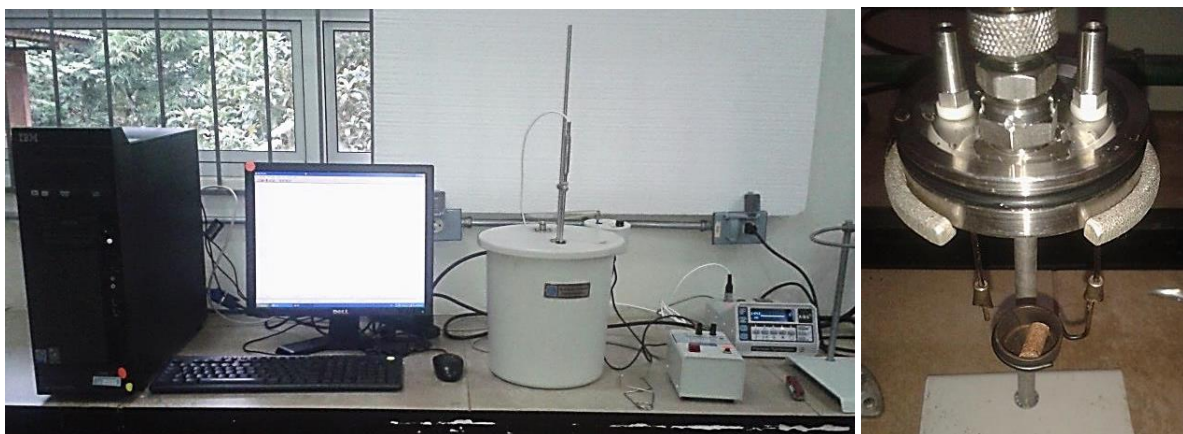


Figura 3.9. Equipo empleado para determinar el poder calorífico superior de las muestras.

La determinación del contenido de nitrógeno, cloro y azufre presente en las muestras se realizó en el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT) de la Escuela de Química de la Universidad Nacional de Costa Rica.

Para el caso particular del contenido de azufre y cloro, se empleó un Cromatógrafo de iones (Marca Dionex 5000). Este equipo analiza muestras compuestas de la disolución obtenida del lavado de los residuos de la combustión de las muestras de pellets, procedimiento que se realizó empleando una bomba calorimétrica (Marca IKA C200). La Figura 3.10 muestra el equipo empleado para este procedimiento.



Figura 3.10. Equipo empleado para determinar el contenido de azufre y cloro.
a) Bomba de combustión b) Cromatógrafo

Para el caso de la determinación del contenido de nitrógeno en las muestras se empleó el método “Kjeldahl”. Para este procedimiento, se realizó la digestión de la muestra de pellet con ácido sulfúrico y catalizadores (sulfato de cobre y sulfato de potasio); posteriormente la muestra digerida se mezcló con hidróxido de sodio para seguidamente proceder a destilar el amonio presente en esta disolución, el cual fue capturado sobre ácido bórico con rojo de metilo como indicador. Finalmente, se realizó la titulación; determinándose el contenido de nitrógeno presente en la muestra analizada, a partir de la cantidad de ácido sulfúrico empleada en la titulación. La Figura 3.11 muestra un esquema del procedimiento seguido.

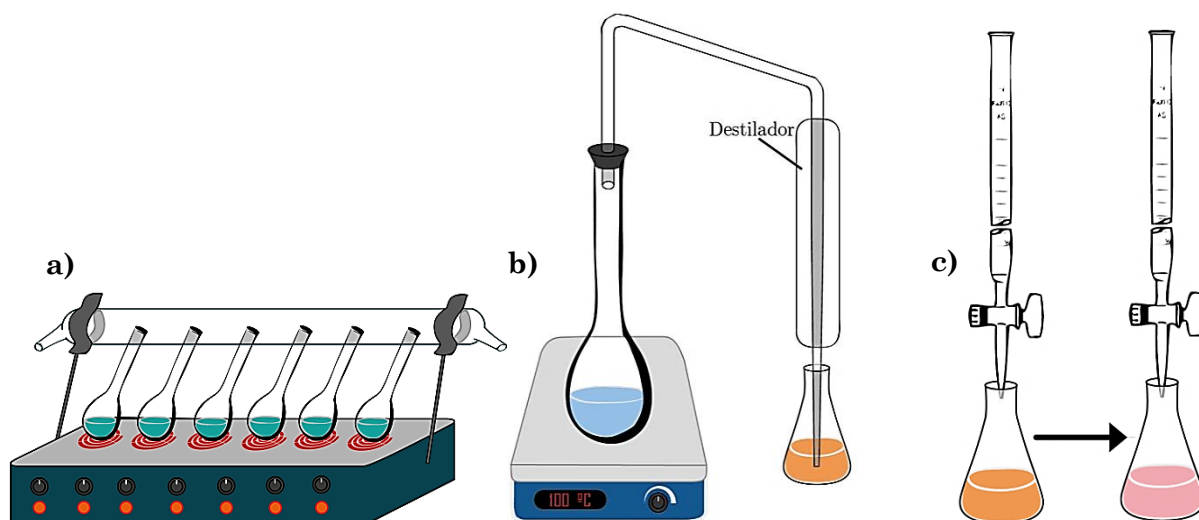


Figura 3.11. Método Kjeldahl para la determinación del contenido de Nitrógeno.
a) Digestión b) Destilación c) Titulación

3.4. Modelo estadístico del experimento y análisis estadístico de los datos

En primera instancia, se verificó que los valores obtenidos en las repeticiones de cada una de las variables de respuesta estudiadas (propiedades de los pellets), para cada uno de los tratamientos estudiados (diámetro, fuerza y temperatura), se ajustaran a una distribución estadística normal, empleando el test Shapiro-Wilk. Se usó un valor $\alpha = 0,05$ para determinar el supuesto de normalidad de los datos de cada población.

Se empleó el modelo estadístico indicado en la ecuación 3.9 para estudiar el comportamiento estadístico de los resultados obtenidos en el experimento

$$y_{ijkl} = \mu_{ijk} + e_{ijkl} \quad [\text{Ec. 3.9}]$$

$i = \text{diámetros} \quad j = \text{fuerzas} \quad k = \text{temperaturas} \quad l = \text{repeticiones}$

Donde

y_{ijkl} es el l -ésimo valor observado en el i - j - k -ésimo nivel de tratamiento aplicado.

μ_{ijk} es el promedio de la i - j - k -ésima población en tratamiento.

e_{ijkl} es el error experimental asociado al valor observado.

Sumado a lo anterior, se establece la hipótesis nula $H_0: \mu_{111} = \dots = \mu_{ijk}$, o sea que no existe diferencia entre las medias de las propiedades de los pellets, para cada unidad experimental obtenida de la combinación de tratamientos aplicados durante la densificación. Por su parte, la hipótesis alternativa se establece como $H_a: \mu_{111} \neq \dots \neq \mu_{ijk}$, lo que indica que efectivamente existe diferencia entre las medias de las propiedades de cada población de pellets. Finalmente, se realizó un análisis de la varianza de las medias de cada unidad experimental empleando el test estadístico SNK, conocido como “*T de Student*”. Para este, se empleó un valor $\alpha = 0,05$ para establecer la comparación entre medias, y verificar si existe diferencia estadística significativa entre las medias de las propiedades determinadas para los distintos tratamientos aplicados (unidades experimentales).

3.5. Incertidumbre de los resultados

Para determinar la incertidumbre de los resultados se utilizó el programa *Engineering Equation Solver* (EES); más específicamente, se empleó la herramienta de propagación de incertidumbres (*Uncertainty Propagation*).

Esta herramienta computacional calcula la incertidumbre de los resultados de acuerdo a la “incertidumbre estándar combinada”, que asocia la precisión absoluta de los equipos utilizados y las ecuaciones empleadas para determinar cada propiedad.

Respecto a la incertidumbre estándar combinada, Chacón (2004) y Harris (2001) señalan que si se define una variable R , cuya magnitud está en función de varias magnitudes experimentales ($X, Y, Z \dots$), se obtiene la ecuación 3.10.

$$R = F(X, Y, Z \dots) \quad [\text{Ec. 3.10}]$$

Además, si $(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z \dots)$ corresponden a las incertidumbres absolutas de las mediciones realizadas para $(X, Y, Z \dots)$, entonces, se tiene que la incertidumbre estándar combinada del resultado final (e_R), se define tal y como indica la ecuación 3.11.

$$e_R = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial X} \cdot \Delta_x \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial Y} \cdot \Delta_y \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial Z} \cdot \Delta_z \right)^2 + \dots \right]^{1/2} \quad [\text{Ec. 3.11}]$$

La anterior ecuación es la que el programa *Engineering Equation Solver* emplea para calcular la incertidumbre asociada a los resultados.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Propiedades físicas

El análisis y discusión de los resultados obtenidos en la determinación de cada una de las propiedades físicas de los pellets, será abordado por secciones, esto con la intención de presentar un análisis que identifique a cada propiedad evaluada, y el efecto de las condiciones de peletizado sobre estas.

En primera instancia se analiza el comportamiento general de cada propiedad través de los tratamientos; seguidamente se aborda el análisis estadístico asociado a las medias de tratamientos y su interacción. Finalmente se establece la comparación y análisis de los datos respecto a los parámetros establecidos por las normativas internacionales de calidad de pellets, por lo que se hará referencia a lo señalado en el Capítulo 1 concerniente al estado del arte, y más exactamente a la Tabla 1.5 correspondiente a las especificaciones de las principales normas de calidad de pellets europeas. Los rubros y valores ahí indicados, serán la base para establecer las comparaciones con cada una de las propiedades determinadas.

4.1.1. Densidad Unitaria

Se presenta en la Tabla 4.1 los valores determinados para la densidad unitaria, la incertidumbre (\pm) y la desviación estándar asociada a las mediciones. A partir de ella se elabora la Figura 4.1.

Tabla 4.1.

Resultados obtenidos en la determinación de la densidad unitaria.

<i>Tratamiento</i>			<i>Densidad Unitaria</i>		
<i>Diámetro (mm)</i>	<i>Fuerza (kgf)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	ρ_u (kg/dm ³)	\pm (kg/dm ³)	<i>Desv. Est.</i> (kg/dm ³)
8	300	90	0,935	0,011	0,013
		105	0,971	0,011	0,006
	500	90	1,016	0,012	0,009
		105	1,097	0,013	0,015
10	300	90	0,856	0,005	0,009
		105	0,897	0,005	0,010
	500	90	0,927	0,005	0,005
		105	0,984	0,005	0,008

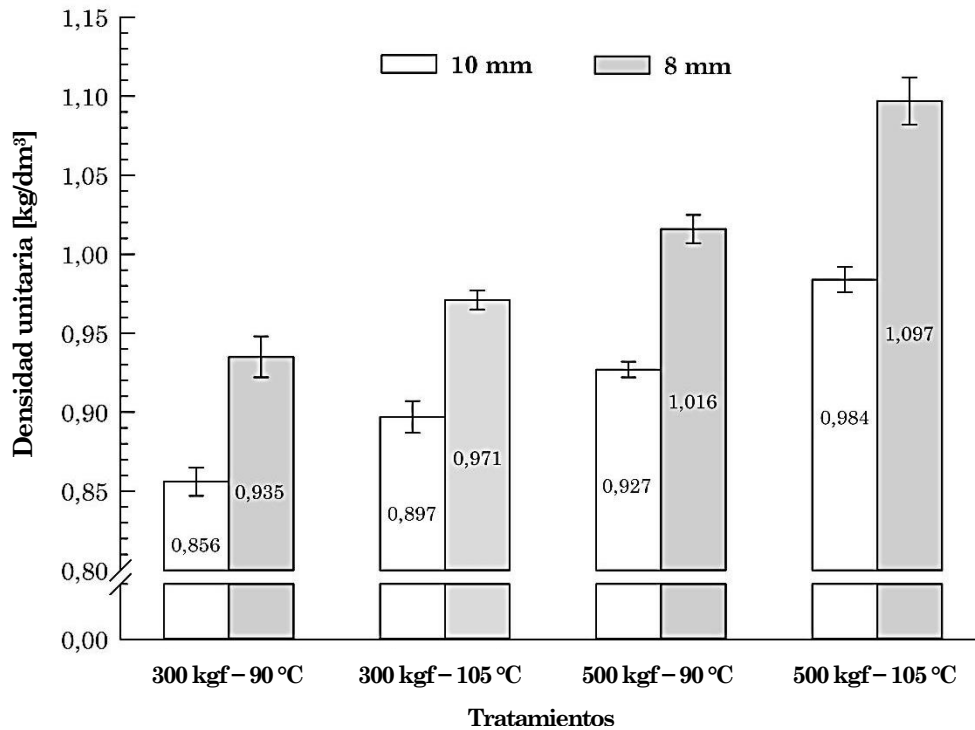


Figura 4.1. Resultados de la determinación de la densidad unitaria en los distintos tratamientos aplicados.

En la Figura 4.1 se observa de forma general como los valores inferiores determinados para la densidad unitaria en los dos diámetros, se reportan cuando los tratamientos de fuerza de compresión y temperatura tienen su menor valor (300 kgf – 90 °C). Asimismo, se puede observar como para la combinación de tratamientos de fuerza y temperatura con valores máximos (500 kgf – 105 °C), la densidad unitaria tiende a aumentar (entendiéndose cualquier aumento del valor determinado para esta propiedad como una mejora). Se destaca también, que independientemente de la combinación de tratamientos de fuerza–temperatura (4 combinaciones), la densidad unitaria determinada en todos los casos fue mayor para los pellets elaborados con 8 mm de diámetro que con 10 mm.

Lo anterior se justifica debido al efecto sobre la densidad de cada pellet que tiene el área circular – transversal del cilindro en el que la biomasa es comprimida. Visto desde un punto de vista numérico, esto se relaciona con el cociente compuesto por la fuerza dividida entre el área ($P = F/A$), cuyo producto corresponde a la presión aplicada a la biomasa para formar el pellet, y en donde es posible observar que la presión aplicada es inversamente proporcional al diámetro.

Por tanto, es esperable que para el diámetro menor, la presión aplicada sea mayor, lo que consecuentemente significa confinar en un volumen menor una misma cantidad de biomasa, lo que finalmente se refleja como un aumento de la densidad de cada pellet.

Por otra parte, la presión de densificación ($P=F/A$) posee el escenario de variación provocado por cambiar la fuerza aplicada mientras se mantiene constante el área (mismo diámetro de peletizado), en este caso, la relación pasa a ser directamente proporcional, lo que indica que un aumento de la fuerza se manifiesta como un aumento en la presión de densificación, y viceversa si se disminuye la fuerza.

Para confirmar lo anterior basta comparar en la Figura 4.1 los tratamientos (300 kgf – 90 °C) contra (500 kgf – 90 °C), o el caso de (300 kgf – 105 °C) contra (500 kgf – 105 °C). Nótese que en ambas comparaciones la temperatura aplicada es la misma, sin embargo y como es de esperarse, el valor observado en la densidad unitaria aumentó con la fuerza para los dos diámetros evaluados. Rhén et al.(2005), y Kaliyan & Vance Morey (2009) reportaron un efecto similar sobre la densidad unitaria, debido al incremento de la presión y disminución del diámetro.

Otro de los efectos sobre la densidad unitaria corresponde al de la temperatura aplicada en el equipo de peletizado (90 °C y 105 °C). Si se hace referencia a la Figura 4.1 se puede confirmar que para ambos diámetros, la densidad de cada pellet aumenta si se aumenta la temperatura en el cilindro de compresión; lo anterior se manifiesta en los dos casos de fuerza de compresión, y para ambos casos de diámetro estudiados. Mani et al., (2006) y Shankar & Bandypadhyay (2005) sostienen conclusiones semejantes, donde el aumento de la temperatura en el proceso de densificación, está estrechamente relacionado con el aumento de la densidad unitaria de los pellets.

Por otra parte, se reporta en la Tabla 4.2 el análisis de la varianza para la densidad unitaria, donde se ve la existencia de una interacción estadísticamente significativa entre todos los factores con ($p<0,001$), el caso del tratamiento diámetro \times fuerza \times temperatura ($p = 0,002 < \alpha = 0,05$) también presenta interacción estadísticamente significativa, lo que apunta a que estos tratamientos y sus combinaciones, tienen efecto significativo sobre el valor de densidad unitaria determinado. La única excepción corresponde a la combinación diámetro \times temperatura ($p =$

0,058), lo que representa que el efecto de los tratamientos de densificación sobre la densidad unitaria no es uniforme.

Tabla 4.2.

Análisis de varianza para las densidades unitarias determinadas ($\alpha = 0,05$).

<i>Fuente de variación</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrados medios</i>	<i>Valor F</i>	<i>Probabilidad P</i>
Diámetro	1	0,142	0,142	1497,205	<0,001
Fuerza	1	0,149	0,149	1577,468	<0,001
Temperatura	1	0,0523	0,0523	552,625	<0,001
Diámetro × Fuerza	1	0,00262	0,00262	27,665	<0,001
Fuerza × Temperatura	1	0,00422	0,00422	44,612	<0,001
Diámetro × Temperatura	1	0,000351	0,000351	3,716	0,058
Diámetro × Fuerza × Temperatura	1	0,000968	0,000968	10,237	0,002
Residual	64	0,00605	0,0000946		
Total	71	0,357	0,00503		

Un ejemplo cuantitativo de lo dicho anteriormente, es que una mayor contribución de la temperatura a aumentar la densidad unitaria de los pellets hechos a 8 mm que la de los fabricados a 10 mm, no puede verificarse de forma categórica, ya que como se refleja en la Figura 4.1, si para el caso de la fuerza de 300 kgf se aumenta la temperatura de 90 °C a 105 °C, el aumento porcentual de la densidad unitaria para los pellets de 8 mm es de un 3,6 %, pasando de 0,935 kg/dm³ a 0,971 kg/dm³, y en el caso de 10 mm, el aumento es de un 4,8 %, pasando de 0,856 kg/dm³ a 0,897 kg/dm³, o sea, un mayor aumento de ρ_u para los pellets de 10 mm. En el caso del tratamiento de 500 kgf, si se aumenta la temperatura, la densidad unitaria para 8 mm aumenta un 8,0 %, aumentando de 1,016 kg/dm³ a 1,097 kg/dm³ y para 10 mm un 6,1 %, incrementándose de 0,927 kg/dm³ a 0,984 kg/dm³, a diferencia del caso anterior, en esta ocasión se presenta un mayor aumento de ρ_u para los pellets de 8 mm.

Por lo tanto, el cambio de la densidad unitaria debido al aumento de la temperatura aplicada en igualdad de condiciones de fuerza, no es siempre mayor para los pellets de 8 mm, que los de 10 mm; o sea, el efecto no es uniforme. Situación similar se presenta si se compara los aumentos porcentuales en ρ_u para los dos diámetros, si se mantiene la temperatura constante, pero se aumenta la fuerza de compresión.

Por otra parte, en la Tabla 4.3 se encontró diferencia significativa entre las medias de seis de las ocho combinaciones de tratamientos estudiadas. El único caso que presenta similitud estadística corresponde a las medias de ρ_u para (8 mm – 300 kgf – 90 °C) y (10 mm – 500 kgf

– 90 °C). La anterior similitud obedece principalmente a una tendencia propia de los datos, ya que también se determinó que hay diferencia significativa entre las medias de ρ_u si se compara un mismo diámetro habiéndole aplicado el mismo tratamiento de fuerza y temperatura.

Tabla 4.3.

Comparación entre medias de ρ_u para las combinaciones de tratamientos.

Fuerza (kgf)	Temperatura (°C)	Diámetro (mm)	Medias (kg/dm ³)	n	E.E.	Comparación*
300	90	10	0,855778	9	0,003242	A
300	105	10	0,897267	9	0,003242	B
500	90	10	0,926767	9	0,003242	C
300	90	8	0,935344	9	0,003242	C
300	105	8	0,971000	9	0,003242	D
500	105	10	0,984233	9	0,003242	E
500	90	8	1,015789	9	0,003242	F
500	105	8	1,096756	9	0,003242	G

*Medias con igual letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$)

Con lo anterior se puede establecer, que dentro de los rangos de fuerza, temperatura y diámetro estudiados en esta investigación, el efecto de aumento de la densidad unitaria (mejora), se manifiesta de forma más significativa en primera instancia con la variable diámetro, en segundo plano está la fuerza de compresión y en tercer caso de significancia está el tratamiento temperatura. Resultados obtenidos por Tumuluru et al., (2010); Mani et al., (2006); Shankar & Bandyopadhyay (2005) y Kaliyan & Vance Morey (2009) sostienen conclusiones similares.

Otro de los enfoques del análisis se basa en la comparación de los resultados contra los valores mínimos estipulados, para el cumplimiento de las normativas de calidad de pellets. Respecto a esto, se debe acotar que el límite inferior definido como aceptable para la densidad unitaria (real) corresponde a 1 kg/dm³, tal y como se indica en la Tabla 1.5. Por tanto, si se hace la revisión de los resultados es posible determinar que únicamente el caso de los pellets a 8 mm de diámetro, y más específicamente los pellets fabricados a (8 mm – 500 kgf – 90 °C) y (8 mm – 500 kgf – 105 °C) poseen valores por encima del mínimo estipulado (1,016 kg/dm³ y 1,097 kg/dm³ respectivamente).

Partiendo de lo anterior, y tomando en cuenta la biomasa empleada, el tamaño de partículas (≤ 2 mm), contenido de humedad (8% b.h.), y los ámbitos de fuerza y temperatura estudiados para esta investigación, se determina que la densificación empleando fuerzas entre

300 kgf y 500 kgf dan como resultado pellets bien conformados (independientemente si el diámetro empleado para densificar es de 8 mm o 10 mm, o si la temperatura aplicada está entre los 90 °C y 105 °C), sin embargo, no todos los casos cumplen de forma satisfactoria con lo estipulado en normativas de calidad para el rubro de densidad aparente.

De forma complementaria, y aunque el tamaño de partículas no fue objeto de modificación en esta investigación, se debe indicar que por lo general disminuir el tamaño de partículas empleado (realizado durante el tamizado de la biomasa), resulta una opción sencilla para aumentar la densidad unitaria sin necesidad de mayores inversiones energéticas (y económicas consecuentemente) en el proceso de densificación (Bergström et al., 2008; Stelte et al., 2011). Por lo que esta recomendación eventualmente podría funcionar para mejorar la densidad unitaria de los pellets fabricados a (10 mm – 500 kgf – 90 °C) y (8 mm – 300 kgf – 105 °C) con $\rho_u = 0,984 \text{ kg/dm}^3$ y $\rho_u = 0,971 \text{ kg/dm}^3$ respectivamente; ya que ambos casos se encuentran relativamente cerca del valor mínimo requerido para cumplir con lo estipulado $\rho_u = 1 \text{ kg/dm}^3$.

4.1.2. Densidad Aparente

La Tabla 4.4 muestra el resumen de los valores determinados para densidad aparente en los distintos tratamientos aplicados., así como la incertidumbre (\pm) y la desviación estándar respectivamente. En la Figura 4.2 se muestra la variación de la densidad aparente a lo largo de los distintos tratamientos de densificación estudiados.

Tabla 4.4.

Resultados obtenidos en la determinación de la densidad aparente.

Diámetro (mm)	Tratamiento		Densidad Aparente		
	Fuerza (kgf)	Temperatura (°C)	ρ_a (kg/m ³)	\pm (kg/m ³)	Desv. Est. (kg/m ³)
8	300	90	505,6	6,6	1,1
		105	530,3	6,9	1,0
	500	90	577,1	7,5	1,1
		105	603,0	7,8	1,2
10	300	90	480,0	6,2	1,2
		105	496,8	6,4	1,1
	500	90	534,2	6,9	1,4
		105	552,3	7,2	1,5

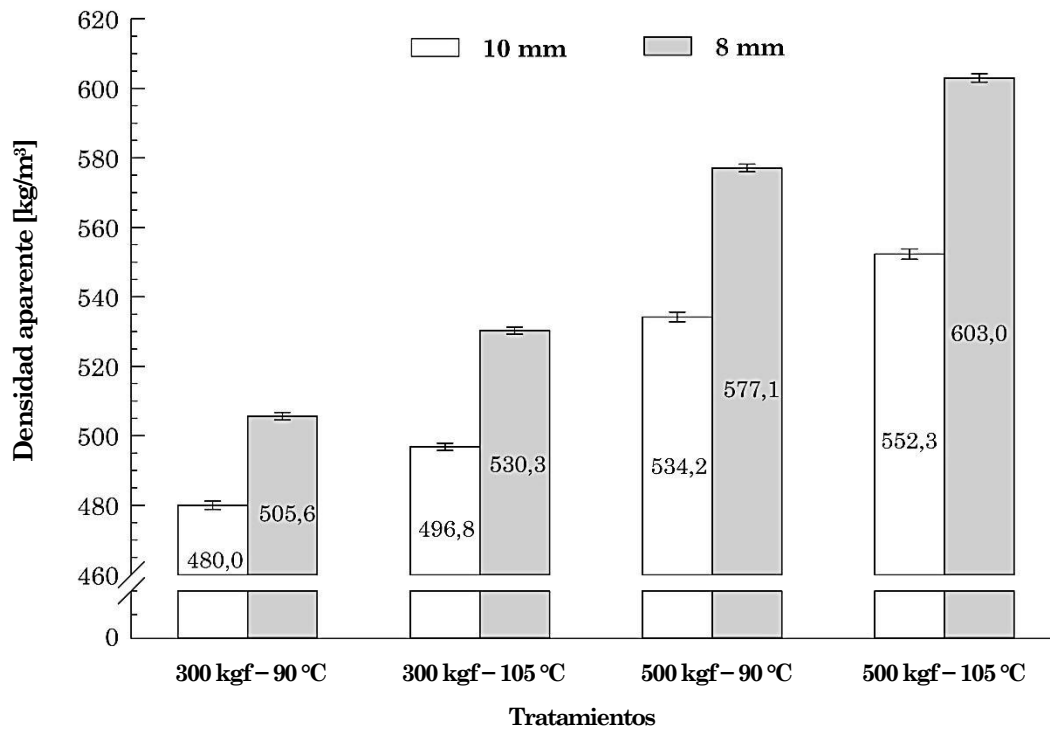


Figura 4.2. Resultados de la determinación de la densidad aparente en los distintos tratamientos aplicados.

Es notable que al igual que la densidad unitaria, la densidad aparente presenta un comportamiento con tendencia a la mejora (aumento) conforme la fuerza y la temperatura aplicada son máximas dentro de los rangos analizados (500 kgf – 105 °C), y en consecuencia, se observaron menores valores de densidad aparente para la combinación de los valores inferiores de fuerza y temperatura (300 kgf – 90 °C). Otro comportamiento semejante al de la densidad unitaria corresponde a que, nuevamente, independientemente de la combinación de tratamientos de fuerza y temperatura, la densidad aparente para pellets elaborados a 8 mm de diámetro, en todos los cuatro casos está por encima de los fabricados a 10 mm. Además, se observa en la Figura 4.2 que cualquier incremento ya sea de temperatura o fuerza, introducen tendencia de aumento en la densidad aparente, lo anterior también se observó con la disminución del diámetro.

Los tres comportamientos anteriores fueron observados con la misma tendencia para la densidad unitaria, por lo que se manifiesta una relación bastante estrecha entre la densidad unitaria y aparente. De hecho, la relación entre densidades aquí observada, fue expuesta en

forma similar por Tarasov, Shahi, & Leitch, (2013); Rhén et al. (2005); Shankar & Bandyopadhyay, (2005) y Tumuluru et al., (2010).

Por otra parte, el análisis de varianza mostrado en la Tabla 4.5 muestra que existe interacción significativa entre la totalidad de los tratamientos ($p < 0,001$). Lo que apunta a que si se aumenta o disminuye el valor de la temperatura o la fuerza aplicada, e inclusive si se varía el diámetro con el que se elaboran los pellets, dará como resultado variación significativa del valor observado para la densidad aparente.

Tabla 4.5.

Análisis de varianza para las densidades aparentes determinadas ($\alpha = 0,05$).

<i>Fuente de variación</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrados medios</i>	<i>Valor F</i>	<i>Probabilidad P</i>
Diámetro	1	567,841	567,841	237,557	<0,001
Fuerza	1	16090,362	16090,362	6731,413	<0,001
Temperatura	1	14918,620	14918,620	6241,214	<0,001
Diámetro × Fuerza	1	904,539	904,539	378,414	<0,001
Diámetro × Temperatura	1	359,190	359,190	150,267	<0,001
Fuerza × Temperatura	1	56,052	56,052	23,449	<0,001
Diámetro × Fuerza × Temperatura	1	814,269	814,269	340,650	<0,001
Residual	16	38,245	2,390		
Total	23	33749,119	1467,353		

Tabla 4.6.

Comparación entre medias de ρ_a para las combinaciones de tratamientos.

<i>Fuerza (kgf)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Diámetro (mm)</i>	<i>Medias (kg/m³)</i>	<i>n</i>	<i>E.E.</i>	<i>Comparación*</i>
300	90	10	479,95	3	0,85	A
300	105	10	496,79	3	0,85	B
300	90	8	505,60	3	0,85	C
300	105	8	530,32	3	0,85	D
500	90	10	534,17	3	0,85	E
500	105	10	552,26	3	0,85	F
500	90	8	577,06	3	0,85	G
500	105	8	602,98	3	0,85	H

*Medias con igual letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$)

Por su parte, la comparación de medias indicada en la Tabla 4.6, muestran como todos los valores de ρ_a determinados en todas las combinaciones son significativamente diferentes entre sí ($p < 0,05$), reafirmando que cualquier variación de los tratamientos se reflejará como un cambio significativo en la densidad aparente, respecto a cualquier otra combinación.

Una vez confirmado en el análisis de varianza la diferencia significativa entre las medias de tratamientos, los valores observados en la Figura 4.2 permiten establecer con más claridad la significancia con la que los tratamientos afectan la densidad aparente. Es por esto que acorde a los resultados, se determina que el efecto de variación de ρ_a se muestra de forma más significativa para la variable fuerza, la segunda en significancia es la variable diámetro, y como tercero en significancia está el efecto de variación introducido por la variable temperatura. Resaltar que en este caso el orden de significancia difiere del obtenido para la densidad unitaria, donde se determinó el mayor efecto a la variable diámetro.

Respecto a la comparación de los datos contra lo establecido en normativas de calidad, se debe indicar que la densidad aparente es una propiedad de la biomasa densificada en forma de pellet, asociada principalmente a labores relacionadas con el almacenamiento y el transporte de estos; sin embargo, más allá de ser esta una propiedad física, también está estrechamente relacionada con comportamientos de combustión más lentos y altos contenidos energéticos por unidad de volumen (Kumar, Chandrashekar, & Pandey, 2009; Tumuluru et al., 2010). Es por esto, que es una propiedad normalmente tomada en cuenta a la hora de valorar la calidad de pellets tal y como se muestra en la Tabla 1.5. García-Maraver et al., (2011) incluyen en su recopilación de normativas una mayor cantidad de valores establecidos para esta propiedad, sin embargo, observaron que esto es con la finalidad de crear una estratificación por categorías de calidad, además, en general mostraron que valores de densidad aparente iguales o superiores a los 500 kg/m^3 son el mínimo normalmente establecido para entrar en diversas categorías de calidad pellets.

Complementario a lo anterior, se evidencia en la Figura 4.2 que seis de ocho tratamientos aplicados a los pellets dan como resultado valores de ρ_a superiores los 500 kg/m^3 , esto a excepción de los que son fabricados bajo los tratamientos (10 mm – 300 kgf – 90 °C) y (10 mm – 300 kgf – 105 °C). Además, se destaca que para todas las combinaciones de tratamientos, los pellets elaborados a 8 mm de diámetro siempre cumplieron con el valor requerido para la densidad aparente. Y con base a los dos casos anteriores, en que se determinó valores inferiores a los 500 kg/m^3 , se puede afirmar que bajo las condiciones establecidas para este experimento, optar por fabricar pellets con diámetros de 10 mm o superiores, darán como resultado densidades aparentes no aceptables acorde a las normativas de calidad vigentes, esto

a menos que la temperatura en el equipo de peletizado sea superior a los 90 °C y que la fuerza de compresión sea mayor o igual a los 500 kgf, como lo es el caso del tratamiento (10 mm – 500 kgf – 90 °C) con $\rho_a = 534,2 \text{ kg/m}^3$, caso que sí cumple para el rubro $\rho_a \geq 500 \text{ kg/m}^3$.

4.1.3. Dureza mecánica

Se muestra en la Tabla 4.7 los resultados obtenidos para la determinación de la dureza mecánica (DU), así como la incertidumbre (\pm) y desviación estándar asociada. A partir de esta se elabora la Figura 4.3 donde se presenta la variación observada para DU a lo largo de los tratamientos aplicados.

Tabla 4.7.

Resultados obtenidos en la determinación de la dureza mecánica

Tratamiento			Dureza mecánica		
Diámetro (mm)	Fuerza (kgf)	Temperatura (°C)	DU (%)	\pm (%)	Desv. Est. (%)
8	300	90	96,6	0,4	0,1
		105	96,8	0,4	0,1
	500	90	97,2	0,4	0,1
		105	97,5	0,4	0,1
10	300	90	96,1	0,2	0,2
		105	96,3	0,2	0,2
	500	90	96,8	0,2	0,1
		105	97,1	0,2	0,1

El caso de la dureza mecánica (directamente relacionada con su resistencia al daño, y la rotura por fricción y compresión), se comporta de forma equivalente a como ha sido la tendencia en los resultados para las demás propiedades físicas; ya que esta también tiende a mejorar conforme se aumenta la fuerza de compresión y temperatura. Se observa también que los valores para DU siempre son mayores cuando los pellets son elaborados a 8 mm de diámetro, que en el caso de los fabricados a 10 mm; lo anterior se presenta en las cuatro combinaciones mostradas en la Figura 4.3.

Como se observó con la densidad unitaria y aparente, las variables modificadas en la densificación toman especial importancia sobre el valor determinado para DU, de ahí la tendencia de esta propiedad a ser variada inclusive si uno solo de los tratamientos es modificado. Por tanto se aprecia que la relación entre DU y las densidades aparentes es

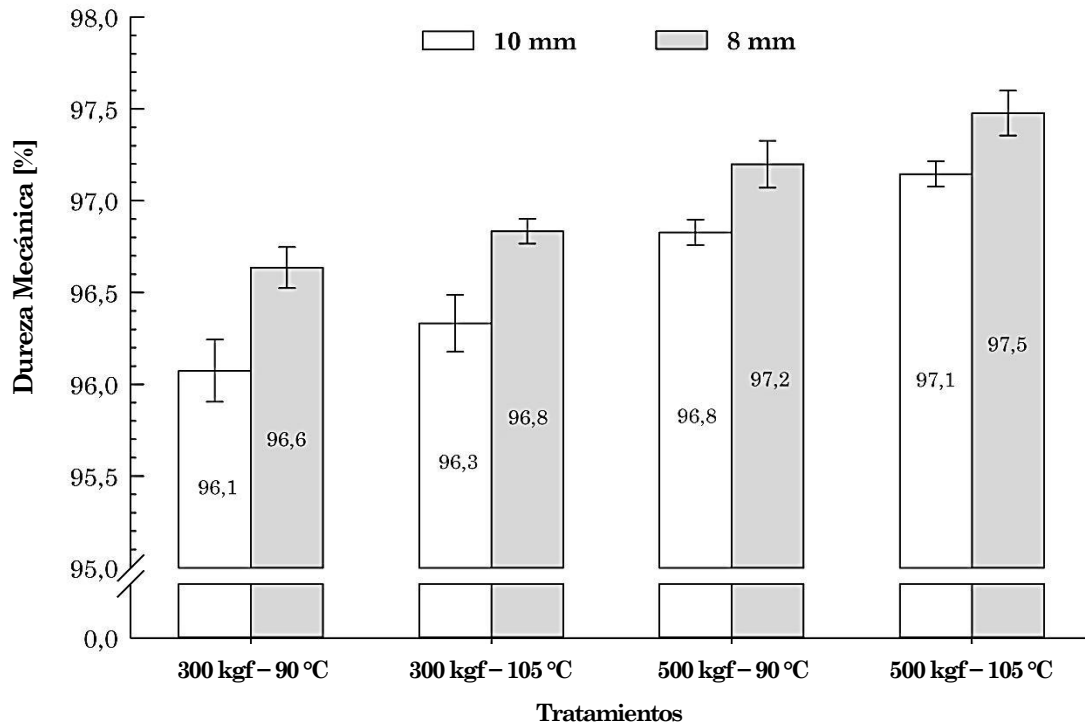


Figura 4.3. Resultados de la determinación de la dureza mecánica en los distintos tratamientos aplicados.

bastante estrecha, y que los factores que hacen incrementar la densidad también incurrirán en aumento de la dureza (Kaliyan & Morey, 2009). Para el caso, autores como Tumuluru et al, (2010) exponen que el efecto conjunto de disminuir el diámetro de pelletizado, sumado al aumento de la temperatura, se manifiesta en una mayor activación de propiedades de gelatinización de la biomasa, lo que mejora la dureza de los pellets. Asimismo, Lee et al., (2013) señalan que el aumento de la fuerza de compresión y temperatura aplicadas durante la densificación tienden a desarrollar puentes sólidos, debido a la difusión de las moléculas entre partículas de la biomasa, generándose así puntos de contacto que se manifiestan a nivel macroscópico como incrementos en la densidad y dureza del pellet. De forma complementaria Tabil & Sokhansanj (1996) apuntan a que la humedad presente en la biomasa actúa de cierta forma como aglutinante y hace que se desarrollen fuerzas del tipo Van der Waals entre partículas, lo que eventualmente provocará una mejora en la densidad y la durabilidad.

El análisis de varianza mostrado en la Tabla 4.8 señala que para el caso de la combinación de los tres tratamiento (Diámetro \times Fuerza \times Temperatura) se presenta una

interacción no significancia entre sí ($p = 0,932$), lo que apunta a que no se presentaron variaciones significativas entre los valores de DU determinados, con la modificación de los tratamientos.

Tabla 4.8.

Análisis de varianza para la dureza mecánica determinada ($\alpha = 0,05$).

<i>Fuente de variación</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrados medios</i>	<i>Valor F</i>	<i>Probabilidad P</i>
Diámetro	1	1,170726	1,170726	56,29509	<0,001
Fuerza	1	2,88392	2,88392	138,6751	<0,001
Temperatura	1	0,415461	0,415461	19,97771	<0,001
Diámetro × Fuerza	1	0,048681	0,048681	2,340858	0,146
Diámetro × Temperatura	1	0,003748	0,003748	0,180201	0,677
Fuerza × Temperatura	1	0,007284	0,007284	0,350239	0,562
Diámetro × Fuerza × Temperatura	1	0,000157	0,000157	0,007529	0,932
Residual	16	0,33274	0,0208		
Total	23	4,862716	0,211		

Tabla 4.9.

Comparación entre medias de DU para las combinaciones de tratamientos.

<i>Fuerza (kgf)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Diámetro (mm)</i>	<i>Medias (%)</i>	<i>n</i>	<i>E.E.</i>	<i>Comparación*</i>
300 kgf	90	10	96,07447	3	0,853259	A
300 kgf	105	10	96,33287	3	0,083259	B
300 kgf	90	8	96,63637	3	0,083259	C
500 kgf	90	10	96,8281	3	0,083259	C
300 kgf	105	8	96,83457	3	0,083259	C
500 kgf	105	10	97,14597	3	0,083259	D
500 kgf	90	8	97,19963	3	0,083259	D
500 kgf	105	8	97,47773	3	0,083259	E

*Medias con igual letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$)

Complementario a lo anterior, en la Tabla 4.9 se aíslan y comparan las medias de DU determinadas para cada tratamiento aplicado. Se observa que tratamientos como (10 mm – 500 kgf – 90 °C), (8 mm – 300 kgf – 90 °C) y (8 mm – 300 kgf – 105 °C) no son significativamente diferentes; lo que en términos referidos a DU equivale a que aplicar cual sea de estos tres tratamientos, dará como resultado una dureza similar. Complementario a esto, es importante hacer referencia al efecto de estos tres tratamientos anteriores sobre DU en términos del proceso de densificación como tal, ya que como es posible notar, en dos de los casos si se mantiene el diámetro de 8 mm y la fuerza de 300 kgf, aumentar la temperatura no significará un incremento en DU significativo, esto a pesar que durante la densificación se requirió más inversión energética para incrementar la temperatura del equipo de peletizado. En

el caso (10 mm – 500 kgf – 90 °C), fue necesario un aumento de la fuerza de compresión respecto a los otros dos tratamientos similares, los cuales solamente requirieron cambiar a un diámetro inferior para lograr una DU similar, lo que confirma el efecto de aumento de DU introducido con solo modificar el diámetro de peletizado.

Otro caso de diferencia no significativa se observa para las medias de DU de los tratamientos (10 mm – 500 kgf – 105 °C) y (8 mm – 500 kgf – 90 °C). Nótese que para el primero de estos dos casos, se aplicó la mayor fuerza y temperatura estudiada en este experimento, y sin embargo la dureza determinada no es significativamente diferente a la de pellets de 8 mm, a las cuales se les aplicó la misma fuerza de compresión; además, al segundo caso no fue necesario aplicar una temperatura mayor a la hora de densificar para conseguir una DU similar.

De forma general se puede observar en la Tabla 4.9 que la DU puede separarse en cinco grupos significativamente diferentes, situación que no fue observada en el análisis de la densidad aparente y unitaria, en las cuales para la mayoría de combinaciones se observó diferencias significativas con la variación de los tratamientos. A partir de esto, se puede afirmar que la dureza mecánica es la propiedad que menos varía, lo que la convierte en la propiedad menos sensible a la variación de los tratamientos estudiados. Resultados reportados por Theerarattananon et al., (2011); y Kaliyan & Vance Morey, (2009) mostraron la misma tendencia bajo diferentes condiciones de peletizado. Por su parte, Lee et al., (2013) presentaron resultados similares para distintas biomásas.

Con respecto a los resultados obtenidos en comparación con lo establecido en normativas para el rubro de la dureza mecánica, se observa en la Tabla 1.5 que para la Norma CEN/TS, el valor de DU debe ser igual o superior al 97,5 %, aunque casos como por ejemplo de la normativa Austriaca ÖNORM, el valor de DU debe estar por encima del 97,7 %, (o 2,3 % en términos de las partículas finas obtenidas al determinar DU). Otros casos como el de normas de Suecia y Alemania no son explícitas en este parámetro. En relación a lo anterior, y acorde a la reseña de normativas realizada por García-Maraver et al., (2011), se observa que normalmente si el parámetro de densidad aparente está especificado de forma explícita, no es así para la dureza mecánica; o sea, que en ambos rubros se indican de forma excluyente con bastante frecuencia, por lo que podría decirse que de forma indirecta las normativas relacionan la dureza mecánica

con la densidad aparente (por consiguiente con la densidad unitaria). Esto porque con el hecho de cumplir el rubro de DU implícitamente podría esperarse altas densidades aparentes y unitarias; el mismo comportamiento es de esperarse en sentido opuesto (Li & Liu, 2000; Kaliyan & Vance Morey, 2009).

Finalmente, si se comparan los resultados de DU con lo definido en la Tabla 1.5, se puede establecer que para los tratamientos aplicados, únicamente la densificación de pellets con diámetro de 8 mm, 500 kgf y 105 °C dan como resultado una dureza mecánica adecuada (DU=97,5 %), esto en una primera revisión. Sin embargo, cabe rescatar que otra categorización de calidad para la Norma CEN/TS incluye categorías que aceptan valores de $DU \geq 95,0 \%$ e inclusive $DU \geq 90,0 \%$, por lo que para la totalidad de tratamientos aplicados, la comparación da como resultado durezas suficientemente altas como para cumplir con lo establecido en este rubro. Aunque cabe destacar que autores como Kaliyan & Vance Morey, (2009) recalcan que valores de DU por encima del 90 % pueden ser considerados como una durabilidad aceptable. Theerarattananon et al., (2011) inclusive señalan que pellets con durezas por encima del 80% ya pueden ser consideradas como “muy resistentes”.

4.2. Propiedades térmicas

La Figura 4.4 muestra un perfil de temperaturas obtenido de forma típica con el equipo empleado para determinar las propiedades térmicas. Por motivos metodológicos relacionados con la alta cantidad de muestra de pellets necesitada para realizar una repetición para la determinación de las propiedades térmicas con el equipo experimental, (20 a 30 veces más muestra que la necesaria para realizar una corrida para determinar alguna de las propiedades físicas), se tomó la decisión de determinar las propiedades térmicas para los pellets elaborados bajo los tratamientos (10 mm – 300 kgf – 90 °C) y (10 mm – 500 kgf – 105 °C) únicamente.

Los resultados de la Tabla 4.10 muestran la conductividad térmica calculada para las dos muestras estudiadas; se indican también la desviación estándar y la incertidumbre asociada a las mediciones para ambos casos.

La conductividad térmica determinada experimentalmente por métodos como el empleado en esta investigación, normalmente se le conoce como conductividad térmica efectiva

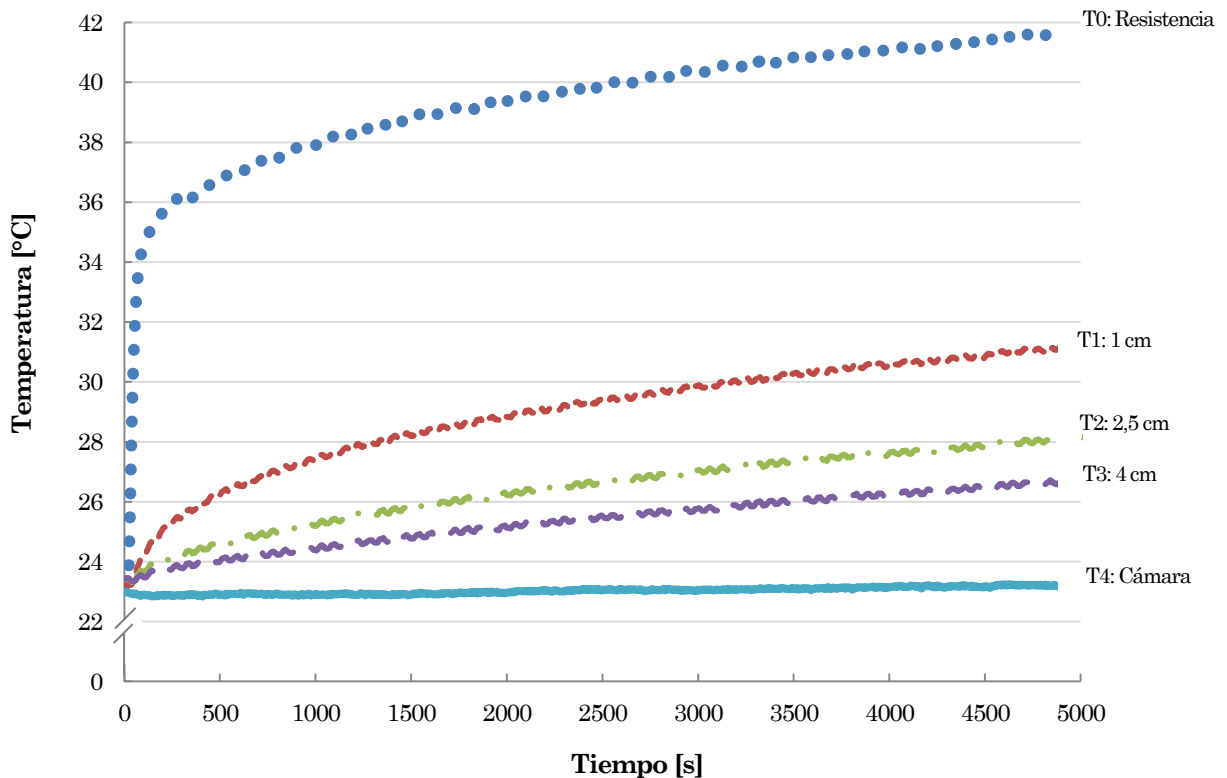


Figura 4.4. Perfil de temperatura obtenido con el equipo experimental construido para la determinación propiedades térmicas. Curva para tratamiento (10 mm – 300 kgf – 90 °C) $\rho_a = 480,0 \text{ kg/m}^3$.

(en adelante solo como conductividad térmica, k), ya que se considera la masa de pellets a granel como una sola unidad con características isotrópicas de porosidad, densidad, contenido de humedad, etc., el caso de la difusividad térmica y del calor específico guarda las mismas consideraciones. Respecto a esto, Sjöström & Blomqvist (2014) señalan que para materiales porosos como los pellets a granel, la conductividad es en realidad una combinación efectiva de la conductividad pura dentro de los pellets, la transferencia de calor por convección a la fase gaseosa e intercambio de radiación entre pellets.

Así pues, para las dos muestras aquí analizadas, más allá de establecer un análisis en términos de los tratamientos de densificación empleados, y los efectos de estos sobre las propiedades térmicas, se presenta un escenario de estudio de la variación de estas últimas debido a la diferencia entre las densidades aparentes de las dos unidades experimentales analizadas.

Tabla 4.10.

Conductividad térmica (k), difusividad térmica (α) y calor específico (C_p) determinados experimentalmente.

<i>Unidad experimental</i>	<i>Cond. Térmica [W/m·K]</i>			<i>Difusividad Térmica [m²/s]</i>			<i>Calor Específico [kJ/kg·K]</i>		
	<i>k</i>	\bar{x}	σ	$\alpha \cdot (10^{-7})$	$\bar{x} \cdot (10^{-7})$	$\sigma \cdot (10^{-9})$	<i>C_p</i>	\bar{x}	σ
10mm – 300kgf – 90°C $\rho_a = 480,0 \text{ kg/m}^3$	0,253			1,759			2,996		
	0,245	0,253 ± 0,004	0,009	1,672	1,748 ± 0,45	7,160	3,053	3,019 ± 0,062	0,030
	0,262			1,814			3,009		
10mm – 500kgf – 105°C $\rho_a = 552,3 \text{ kg/m}^3$	0,283			2,378			2,155		
	0,279	0,279 ± 0,005	0,004	2,298	2,314 ± 0,56	5,727	2,198	2,183 ± 0,048	0,024
	0,275			2,267			2,196		

Nota: \bar{x} : Promedio σ : Desviación estándar (en las mismas unidades que la propiedad correspondiente)

Dicho esto, se muestra en la Tabla 4.10 que la conductividad térmica tuvo valores entre 0,255 W/m·K y 0,279 W/m·K. para densidades de 480,0 kg/m³ y 552,3 kg/m³ respectivamente, por lo que se observa que esta propiedad aumentó con la densidad aparente de las muestras analizadas (lo que indirectamente indica que k aumentó con el valor de fuerza de compresión, y temperatura aplicada). Trabajos como el desarrollado por Guo et al., (2009) reportan que la conductividad térmica de pellets hechos de aserrines estuvo entre 0,18 W/m·K y 0,25 W/m·K. Por su parte, Sjöström & Blomqvist (2014) reportaron valores de conductividad unitaria para pellets (6 mm de diámetro y aprox. 12 mm de largo) de 0,266 W/m·K. Fasina & Sokhansanj (1995), también reportaron valores similares.

De lo anterior se entiende que los valores aquí determinados son superiores (0,253–0,279 W/m·K). Sin embargo, Sjöström & Blomqvist (2014) sostienen que la conductividad térmica varía también con la geometría específica de cada unidad de pellet, así como con el material empleado para elaborarlos, por lo que tomando el precedente que las unidades aquí analizadas poseen dimensiones de 10 mm de diámetro, y alrededor de 20 mm de largo, los valores de k reportados en distintas fuentes deben ser considerados más como referencia del valor que se puede esperar en general. A pesar de esto, Guo et al., (2013) y Sjöström & Blomqvist (2014) observaron que la conductividad térmica tiende a aumentar con la densidad aparente, tal y como se encontró en los resultados aquí expuestos. Comportamiento similar se observa para la difusividad térmica (α), en donde el valor determinado para α

aumenta con la densidad de la muestra de pellets analizada, lo que indica una mayor facilidad para transferir calor para muestras de pellets más densas, tanto en cantidad como en velocidad.

El calor específico calculado a partir de los datos experimentales de conductividad y difusividad térmica, corresponden a 3,019 kJ/kg·K y 2,183 kJ/kg·K para las densidades 480,0 kg/m³ y 552,3 kg/m³ respectivamente. Se observa que el calor específico disminuye con la densidad aparente; en relación a esto, Sjöström & Blomqvist (2014) indican que normalmente la conducta típica de sólidos y materiales a granulados, es que el calor específico disminuya con el aumento de la difusividad térmica de estos, lo que corresponde al comportamiento aquí determinado.

4.3. Propiedades fisicoquímicas

4.3.1. Contenido de cenizas

Se presenta en la Tabla 4.11 y Figura 4.5 los resultados obtenidos en la determinación del contenido de cenizas presente en los pellets, elaborados bajo los distintos tratamientos aplicados en el laboratorio, la incertidumbre (\pm) y desviación estándar asociada.

Tabla 4.11.

Contenido de cenizas en los pellets elaborados bajo los distintos tratamientos.

Diámetro (mm)	Tratamiento		Contenido de cenizas		
	Fuerza (kgf)	Temperatura (°C)	% Masa b.s.	\pm (%)	Desv. Est. (%)
8	300	90	1,29	0,01	0,05
		105	1,33	0,01	0,03
	500	90	1,29	0,01	0,02
		105	1,33	0,01	0,05
10	300	90	1,32	0,01	0,04
		105	1,30	0,01	0,02
	500	90	1,31	0,01	0,02
		105	1,29	0,01	0,04

En términos numéricos, la tendencia observada para el contenido de cenizas en la Figura 4.5 muestra un comportamiento uniforme, y que no varía de manera drástica a lo largo de los tratamientos, lo que en primera instancia apunta a que el contenido de cenizas presente en las muestras no estuvo influenciado con los tratamientos de densificación estudiados.

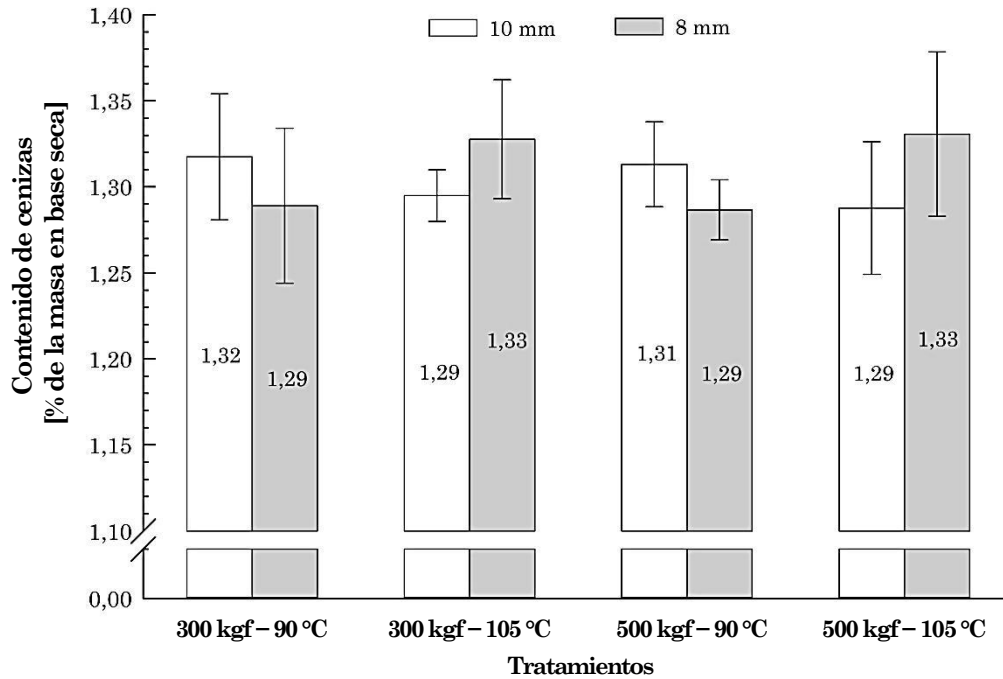


Figura 4.5. Contenido de cenizas presente en los pellets elaborados bajo los distintos tratamientos.

Con la finalidad de determinar de forma adecuada el comportamiento de los datos, se muestra en la Tabla 4.12 el resultado del análisis de varianza del contenido de cenizas determinado, en donde es evidente que para todos los tratamientos e interacción de sus combinaciones, se obtienen valores ($p > 0,05$), lo que estadísticamente apunta a la no interacción significativa entre los tratamientos; y en términos del proceso de densificación, indica que la variación de los tratamientos diámetro, fuerza y temperatura, no influye significativamente sobre el contenido de cenizas observado.

Tabla 4.12.

Análisis de varianza para los contenidos de cenizas determinados ($\alpha = 0,05$).

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad P
Diámetro	1	0,000161	0,000161	0,090655	0,767
Fuerza	1	0,000045	0,000045	0,025137	0,876
Temperatura	1	0,000450	0,000450	0,25377	0,621
Diámetro × Fuerza	1	0,000056	0,000056	0,031318	0,862
Diámetro × Temperatura	1	0,006386	0,006386	3,603074	0,076
Fuerza × Temperatura	1	0,000002	0,000002	0,001322	0,971
Diámetro × Fuerza × Temperatura	1	0,000025	0,000025	0,014342	0,906
Residual	16	0,028360	0,001772		
Total	23	0,035484	0,008897		

Tabla 4.13.

Comparación entre medias de contenido de cenizas en cada tratamiento.

<i>Fuerza (kgf)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Diámetro (mm)</i>	<i>Medias (%)</i>	<i>n</i>	<i>E.E.</i>	<i>Comparación*</i>
500	90	8	1,286667	3	0,024307	A
500	105	10	1,287733	3	0,024307	A
300	90	8	1,289033	3	0,024307	A
300	105	10	1,294933	3	0,024307	A
500	90	10	1,313133	3	0,024307	A
300	90	10	1,317467	3	0,024307	A
300	105	8	1,327633	3	0,024307	A
500	105	8	1,330633	3	0,024307	A

*Medias con igual letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$)

En los resultados mostrados en la Tabla 4.13 se observa que al aislar y comparar las medias de contenido de cenizas, no se encuentran diferencias significativas entre sí ($p < 0,05$), con lo que se confirma que el contenido de cenizas no varía con las condiciones de peletización estudiadas en esta investigación. Finalmente, se puede afirmar que la variación observada en la Figura 4.5 corresponde a diferencias no significativas, por lo que todos los resultados de esta propiedad corresponden a una misma población de datos, que de hecho tiene un 1,31 % como promedio de contenido de cenizas en base seca. Resultados similares fueron observados por Poddar et al, (2014) quienes mostraron variación de propiedades fisicoquímicas seleccionadas (entre ellas el contenido de cenizas), con la aplicación de altas presiones de compresión y bajas temperaturas, para distintas biomásas.

En respuesta a lo que la normativa de calidad normalmente estipula para el contenido de cenizas, se puede observar en la Tabla 1.5 que los valores establecidos para diferentes categorizaciones de calidad corresponden a porcentajes debajo del 0,5 % hasta 3 %, donde los valores inferiores normalmente corresponde a categorías de calidad superiores. El caso de los resultados obtenidos para la biomasa empleada en esta investigación, apunta a que se obtiene un contenido de cenizas que corresponde a la categoría (A=1,3%), determinándose una respuesta satisfactoria para el este rubro en la mayoría de las Normas presentadas en la Tabla 1.5.

4.3.2. Poder Calorífico

Los resultados obtenidos en la determinación del poder calorífico superior, para los pellets elaborados bajo los distintos tratamientos estudiados, así como la incertidumbre asociada (\pm) y desviación estándar respectiva, se muestran en la Tabla 4.14 y Figura 4.6.

En los resultados se observa que para el poder calorífico se presenta una tendencia ambigua a lo largo de las combinaciones de tratamientos analizadas, por lo que en una revisión inicial, no es posible definir de forma certera la capacidad de los tratamientos y rangos aquí estudiados, para influir sobre el poder calorífico superior (PCS) determinado.

Tabla 4.14.

Poder calorífico determinado en los distintos tratamientos aplicados.

Diámetro (mm)	Tratamiento		Poder Calorífico [kJ/kg]			
	Fuerza (kgf)	Temperatura (°C)	Superior	Inferior	± [kJ/kg]	Desv. Est. [kJ/kg]
8	300	90	18 837	18 656	13	19
		105	18 937	18 756	12	12
	500	90	18 877	18 696	13	18
		105	18 984	18 803	13	29
10	300	90	18 907	18 726	13	40
		105	18 854	18 673	12	46
	500	90	18 861	18 680	13	32
		105	18 960	18 779	12	39

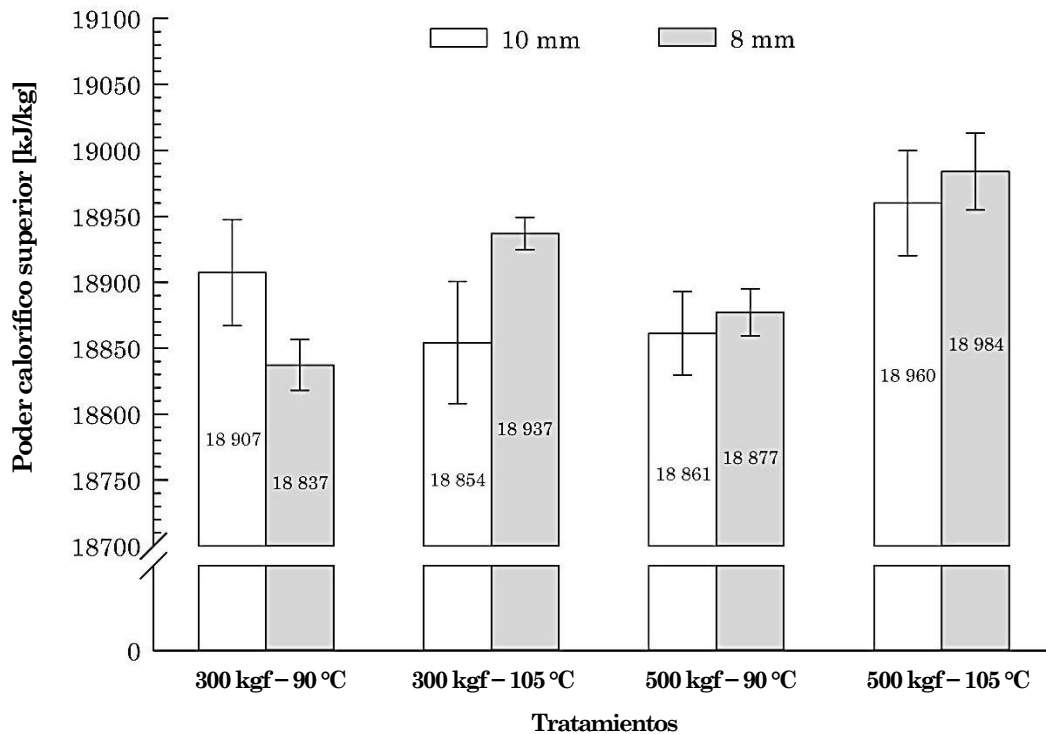


Figura 4.6. Poder calorífico superior determinado en los distintos tratamientos.

Por otra parte, es importante retomar que el valor determinado experimentalmente con el método de la bomba calorimétrica corresponde al PCS, sin embargo, en la Tabla 4.14 también se muestran resultados correspondientes al poder calorífico inferior (PCI) que responden al valor solicitado por las normativas de calidad. Además, cabe recordar que el PCI mostrado es resultado de la resta al PCS, del calor de condensación de la humedad presente en las muestras, esto de acuerdo con la ecuación 3.8, por lo que en términos numéricos, a todos los valores de PCS se les sustrajo los mismos 181 kJ/kg, correspondientes al 8% de humedad al que fue secada la biomasa residual durante el pretratamiento, esto con tal de cumplir con el rubro de contenido de humedad establecido comúnmente en normativas ($\leq 10\%$ b.h.).

Dicho lo anterior, se presentan en las Tabla 4.15 y Tabla 4.16 el análisis de varianza y la comparación de medias obtenidas a partir del PCS, que corresponde a la variable determinada en el laboratorio.

Tabla 4.15.

Análisis de varianza para los PCS determinados ($\alpha = 0,05$).

<i>Fuente de variación</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrados medios</i>	<i>Valor F</i>	<i>Probabilidad P</i>
Fuerza	1	8066,667	14455,04	14,64172	0,011
Temperatura	1	23814	23814	24,20327	<0,001
Diámetro	1	1066,667	1066,667	1,084103	0,313
Fuerza \times Temperatura	1	9440,667	9440,667	9,594986	0,007
Diámetro \times Fuerza	1	294	294	0,298806	0,592
Temperatura \times Diámetro	1	9760,667	9760,667	9,920217	0,006
Fuerza \times Temperatura \times Diámetro	1	7776	7776	7,903108	0,013
Residual	16	15742,67	983,9167		
Total	23	75961,33	61202,58		

Tabla 4.16.

Comparación entre medias del poder calorífico superior determinado para cada tratamiento.

<i>Fuerza (kgf)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Diámetro (mm)</i>	<i>Medias (kJ/kg)</i>	<i>n</i>	<i>E.E.</i>	<i>Comparación*</i>
300	90	8	18837	3	18,11	A
300	105	10	18854	3	18,11	A
500	90	10	18861	3	18,11	A
500	90	8	18877	3	18,11	AB
300	90	10	18907	3	18,11	ABC
300	105	8	18937	3	18,11	BCD
500	105	10	18960	3	18,11	CD
500	105	8	18984	3	18,11	D

*Medias con igual letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$)

Los resultados de la Tabla 4.15 muestran que el PCS estimado se vio influenciado de forma significativa debido a la interacción de tratamientos, esto porque se obtienen valores p menores a 0,05 para todos los factores, a excepción del caso de la variable diámetro y la combinación diámetro \times fuerza, ($p=0,313$) y ($p=0,592$) respectivamente, lo que apunta que para estos dos casos no existe influencia significativa sobre el PCS determinado.

Complementario a esto, se muestra en la Tabla 4.16 el resultado de comparación de las medias para el PCS, donde se observa como a pesar de existir diferencias entre las medias de tratamientos, estas podrían ser agrupadas en tres subgrupos con similitud estadística, tal es el caso de las medias identificadas como A–A–A–AB, otro subgrupo formado por las medias ABC–BCD, y finalmente un subgrupo formado por las medias CD–D. Se destaca que estos tres subgrupos están compuestos de combinaciones de tratamientos que no tiene una misma fuerza, temperatura o diámetro, de hecho responden a una agrupación casi aleatoria más que a otra tendencia, lo que responde a la interacción entre tratamientos no uniforme vista en la Tabla 4.15, tal y como se indicó en el párrafo anterior.

Debido al comportamiento indeterminado de los resultados, y tomando como referencia el análisis anterior, es que se afirma que no es posible ratificar que estas diferencias sean debido a que en realidad el PCS se ve afectado por los tratamientos estudiados; o por otro lado, se deba a la variabilidad misma de las muestras empleadas, lo que apuntaría a que en realidad todos los valores observados para PCS correspondan a una misma población (PCS no es afectado por los tratamientos).

La ambigüedad de resultados no se presenta como inconveniente para comparar el PCI determinado, respecto a los valores de PCI que las normativas de calidad establecen. De hecho, según normas se observa que el PCI debe ser como mínimo igual o superior a los 16,9 MJ/kg (16 900 kJ/kg) tal y como se puede ver Tabla 1.5. Si se observan los resultados obtenidos para el PCI en la Tabla 4.14, y se toma el valor inferior (18 656 kJ/kg) o en su caso un promedio de todos los valores observados (18 721 kJ/kg), se puede afirmar que la biomasa densificada empleada satisfizo lo estipulado para este rubro independientemente del tratamiento aplicado y la norma con la que se le compare.

4.3.3. Contenido de Nitrógeno, Cloro y Azufre

En primera instancia se debe resaltar, que la inclusión de estos elementos en los rubros de normativas principalmente obedece a que durante las reacciones de combustión, estos tienden a generar compuestos cuyos efectos son la corrosión y deterioro de los equipos de combustión, además tienen un alto grado de peligrosidad para la salud humana, y por último y no menos importante, generan emisiones relacionadas con gases de efecto invernadero (Carroll & Finnan, 2012; Obernberger, Brunner, & Barnthaler, 2006; Obernberger & Thek, 2010).

Para el caso del contenido de N, Cl y S presente en la biomasa empleada en esta investigación, se muestran en la Tabla 4.17 los resultados para varias repeticiones realizadas de los métodos de laboratorio utilizados, con lo que se calculó un promedio para cada elemento. Se indica también la incertidumbre asociada a cada valor obtenido, esto de acuerdo con el procedimiento definido en el Laboratorio de Química de la Atmósfera (UNA) para el cálculo de las incertidumbres.

Tabla 4.17.

Resultados de la determinación del contenido de N, Cl y S.

<i>Repetición</i>	<i>Nitrógeno</i>		<i>Cloro</i>		<i>Azufre</i>	
	<i>% Masa</i>	<i>± (%)</i>	<i>% Masa</i>	<i>± (%)</i>	<i>% Masa</i>	<i>± (%)</i>
1	0,1163	0,0036	0,0571	0,0008	0,03850	0,00021
2	0,1153	0,0040	0,0614	0,0007	0,04201	0,00025
3	0,1124	0,0039	0,0629	0,0008	0,03204	0,00026
4	0,1122	0,0039	0,0584	0,0008	0,02358	0,00025
5	0,1109	0,0039	0,0638	0,0008	0,02226	0,00024
6	0,1107	0,0038	----	----	----	----
<i>Desv. Est. (%)</i>	0,0023	----	0,0029	----	0,0088	----
<i>Promedio</i>	0,1129	±0,0039	0,0592	±0,0008	0,0317	±0,00024

Si se hace referencia a la Tabla 1.5, se observa que el contenido de nitrógeno, cloro y azufre son rubros a cumplir e indicar. Para el caso, se tiene que el contenido de nitrógeno debe estar por debajo del 0,3% para calidades de pellets superiores, y se llegan a aceptar porcentajes de nitrógeno de hasta un 3%; los resultados obtenidos muestran un contenido de nitrógeno promedio del 0,1129 %, por lo que la biomasa seleccionada cumple con este rubro para cualquiera de las normas de calidad reseñadas. El contenido de cloro promedio estimado corresponde a un 0,0592 %, valor que está muy cercano al valor estipulado para las categorías de calidad más exigentes, sin embargo se puede ver que el valor estimado cumple con las

categorías que aceptan contenidos de cloro menor o igual a 0,07 %; a pesar de esto, en general se puede afirmar que la biomasa estudiada posee contenidos de este elemento en cantidades permisibles. En el caso del porcentaje de azufre presente en el material, se estimó un contenido promedio de 0,0317 %, valor que responde de forma satisfactoriamente al 0,04 % o 0,05 % normalmente estipulado como mínimo para cumplir con este rubro, en todas las normativas reseñadas.

Por tanto, se puede concluir que en general la biomasa seleccionada para densificación, responde de forma adecuada a los contenidos máximos para ser aceptada en las categorías de calidad más exigentes.

4.4. Comparación general de los resultados contra normativas de calidad de pellets

En esta sección se realiza una retrospectiva general de los resultados obtenidos a lo largo de la caracterización física y fisicoquímica. Para ello se toma cada una de las unidades experimentales, y se comparan los resultados con lo indicado en la Tabla 1.5 correspondiente a las normas de calidad oficiales en Europa. La Tabla 4.18 y Tabla 4.19 muestran los resultados obtenidos de esta comparación.

Se observa que de acuerdo a la cantidad de parámetros no cumplidos por las ocho unidades analizadas, las normas de Austria y Suecia son las más exigentes, seguidas por la norma de Alemania y del Comité Europeo de Normalización. Además, se muestra un cumplimiento no uniforme de los parámetros de calidad debido a la consideración o no de algunos rubros en la Tabla 1.5, así como rangos de aprobación no equivalentes entre normativas. A pesar de esto, destaca la unidad experimental (8 mm – 500 kgf – 105 °C) como la de mejores características físicas, ya que cumple con más rubros para mayor cantidad de las normativas reseñadas en la Tabla 4.18. Otros casos de pellets elaborados a 8 mm y 10 mm respondieron de forma aceptable para las propiedades físicas según varios autores, tal y como se comentó en secciones anteriores, sin embargo, en términos más restrictivos como lo requerido por normativas de alta exigencia, no se da un cumplimiento para todas las categorías de calidad. Un caso que ejemplifica esto, se presentó para el rubro de la dureza mecánica, para la cual se indica con un símbolo “±” que los pellets entraron en categorías de calidad inferiores.

Tabla 4.18.

Comparación de los resultados obtenidos contra los parámetros normados para propiedades físicas.

Parámetro	Unidad experimental	Austria	Suecia SS 187120			Alemania		Unión Europea
		ÖNORM M7135	G1	G2	G3	DIN 51731	DIN Plus	CEN/TS 14961:2005
Densidad	8mm - 300kgf - 90°C	√	-	-	-	√	√	-
Unitaria	8mm - 300kgf - 105°C	√	-	-	-	√	√	-
	8mm - 500kgf - 90°C	√	-	-	-	√	√	-
	8mm - 500kgf - 105°C	√	-	-	-	√	√	-
	10mm - 300kgf - 90°C	√	-	-	-	√	√	-
	10mm - 300kgf - 105°C	√	-	-	-	√	√	-
	10mm - 500kgf - 90°C	√	-	-	-	√	√	-
	10mm - 500kgf - 105°C	√	-	-	-	√	√	-
Densidad Aparente	8mm - 300kgf - 90°C	-	×	√	√	-	-	-
	8mm - 300kgf - 105°C	-	×	√	√	-	-	-
	8mm - 500kgf - 90°C	-	×	√	√	-	-	-
	8mm - 500kgf - 105°C	-	√	√	√	-	-	-
	10mm - 300kgf - 90°C	-	×	×	×	-	-	-
	10mm - 300kgf - 105°C	-	×	×	×	-	-	-
	10mm - 500kgf - 90°C	-	×	√	√	-	-	-
	10mm - 500kgf - 105°C	-	×	√	√	-	-	-
Dureza mecánica	8mm - 300kgf - 90°C	×	×	×	×	-	×	±
	8mm - 300kgf - 105°C	×	×	×	×	-	×	±
	8mm - 500kgf - 90°C	×	×	×	×	-	×	±
	8mm - 500kgf - 105°C	×	×	×	×	-	×	√
	10mm - 300kgf - 90°C	×	×	×	×	-	×	±
	10mm - 300kgf - 105°C	×	×	×	×	-	×	±
	10mm - 500kgf - 90°C	×	×	×	×	-	×	±
	10mm - 500kgf - 105°C	×	×	×	×	-	×	±

Clave: √ : cumplido ± : cumplido para categoría de segunda calidad
 × : no cumplido - : no indicado en norma

Tabla 4.19.

Comparación de los resultados obtenidos contra los parámetros normados para propiedades fisicoquímicas.

Parámetro	Unidad experimental	Austria	Suecia SS 187120			Alemania		Unión Europea
		ÖNORM M7135	G1	G2	G3	DIN 51731	DIN Plus	CEN/TS 14961:2005
Cenizas	8mm - 300kgf - 90°C	×	×	√	√	√	×	±
	8mm - 300kgf - 105°C	×	×	√	√	√	×	±
	8mm - 500kgf - 90°C	×	×	√	√	√	×	±
	8mm - 500kgf - 105°C	×	×	√	√	√	×	±
	10mm - 300kgf - 90°C	×	×	√	√	√	×	±
	10mm - 300kgf - 105°C	×	×	√	√	√	×	±
	10mm - 500kgf - 90°C	×	×	√	√	√	×	±
	10mm - 500kgf - 105°C	×	×	√	√	√	×	±
PCI	8mm - 300kgf - 90°C	√	√	√	√	√	√	√
	8mm - 300kgf - 105°C	√	√	√	√	√	√	√
	8mm - 500kgf - 90°C	√	√	√	√	√	√	√
	8mm - 500kgf - 105°C	√	√	√	√	√	√	√
	10mm - 300kgf - 90°C	√	√	√	√	√	√	√
	10mm - 300kgf - 105°C	√	√	√	√	√	√	√
	10mm - 500kgf - 90°C	√	√	√	√	√	√	√
	10mm - 500kgf - 105°C	√	√	√	√	√	√	√
Nitrógeno	8mm - 300kgf - 90°C	√	-	-	-	√	√	√
	8mm - 300kgf - 105°C	√	-	-	-	√	√	√
	8mm - 500kgf - 90°C	√	-	-	-	√	√	√
	8mm - 500kgf - 105°C	√	-	-	-	√	√	√
	10mm - 300kgf - 90°C	√	-	-	-	√	√	√
	10mm - 300kgf - 105°C	√	-	-	-	√	√	√
	10mm - 500kgf - 90°C	√	-	-	-	√	√	√
	10mm - 500kgf - 105°C	√	-	-	-	√	√	√

Clave: √ : cumplido ± : cumplido para categoría de segunda calidad
 × : no cumplido - : no indicado en norma

Tabla 4.19 (Continuación).

Comparación de los resultados obtenidos contra los parámetros normados para propiedades fisicoquímicas.

Parámetro	Unidad experimental	Austria	Suecia SS 187120			Alemania		Unión Europea
		ÖNORM M7135	G1	G2	G3	DIN 51731	DIN Plus	CEN/TS 14961:2005
Cloro	8mm - 300kgf - 90°C	×	×	×	-	×	×	±
	8mm - 300kgf - 105°C	×	×	×	-	×	×	±
	8mm - 500kgf - 90°C	×	×	×	-	×	×	±
	8mm - 500kgf - 105°C	×	×	×	-	×	×	±
	10mm - 300kgf - 90°C	×	×	×	-	×	×	±
	10mm - 300kgf - 105°C	×	×	×	-	×	×	±
	10mm - 500kgf - 90°C	×	×	×	-	×	×	±
	10mm - 500kgf - 105°C	×	×	×	-	×	×	±
Azufre	8mm - 300kgf - 90°C	√	√	√	-	√	√	√
	8mm - 300kgf - 105°C	√	√	√	-	√	√	√
	8mm - 500kgf - 90°C	√	√	√	-	√	√	√
	8mm - 500kgf - 105°C	√	√	√	-	√	√	√
	10mm - 300kgf - 90°C	√	√	√	-	√	√	√
	10mm - 300kgf - 105°C	√	√	√	-	√	√	√
	10mm - 500kgf - 90°C	√	√	√	-	√	√	√
	10mm - 500kgf - 105°C	√	√	√	-	√	√	√

Clave: √ : cumplido ± : cumplido para categoría de segunda calidad
 × : no cumplido - : no indicado en norma

Por otra parte, las propiedades químicas y fisicoquímicas como el contenido de cenizas, PCI y contenido de N, Cl y S, fueron similares para todas las unidades experimentales, las cuales cumplen de forma satisfactoria para cada rubro evaluado, esto tomando en cuenta distintas estratificaciones de calidad, acorde a lo estipulado según sea el caso que se examine..

CONCLUSIONES

El equipo de diseño experimental construido para elaborar los pellets dio como resultado, la fabricación exitosa de estos a partir del residuo biomásico seleccionado, lo anterior, para todos los tratamientos y sus combinaciones aquí estudiadas.

Se demostró que las propiedades físicas son las que poseen mayor tendencia a variar, debido al efecto de las condiciones de densificación estudiadas en esta investigación.

En general, las propiedades físicas determinadas, presentaron valores más satisfactorios cuando se empleó el menor diámetro de densificación, la mayor fuerza de compresión y la mayor temperatura de peletizado. Esto fue constante para las ocho combinaciones de tratamientos estudiadas.

La densidad unitaria determinada para los pellets elaborados bajo los distintos tratamientos, fue influenciada de forma más significativa por la variable diámetro, seguido por la fuerza de compresión, y en última instancia estuvo el efecto de la temperatura de peletizado.

La densidad aparente varió de forma significativa debido al efecto de la fuerza de compresión principalmente, en segundo caso de significancia se encontró al diámetro de densificación, y por último, el efecto de la temperatura aplicada para densificar.

Se observó que la dureza mecánica fue la propiedad que menos varió con las combinaciones de tratamientos estudiadas, por lo que se concluyó que es la propiedad menos sensible a la variación de los tratamientos.

Se determinó la relación directa que la dureza mecánica guarda con la densidad unitaria y la densidad aparente.

Tanto la conductividad térmica como la difusividad térmica, guardan una relación directamente proporcional con el aumento de la densidad aparente de los pellets.

El calor específico tiene una relación inversamente proporcional con el aumento de la densidad aparente de los pellets, disminuyendo este, para mayores densidades aparentes de los pellets.

No se observó diferencia significativa en el contenido de cenizas de las distintas unidades experimentales, por lo que se concluyó que los tratamientos aplicados durante la densificación no tienen influencia alguna sobre esta propiedad.

La variación observada en los valores de poder calorífico superior fue ambigua, por lo que no fue posible determinar de forma certera que los tratamientos aplicados a la biomasa durante la densificación, tengan efecto sobre esta propiedad fisicoquímica.

El poder calorífico inferior y contenido de cenizas determinado para los pellets en todas las combinaciones de tratamientos estudiadas, satisficieron lo estipulado en las normas de calidad consultadas.

Se estimó de forma satisfactoria el contenido de elementos químicos de interés presentes en la biomasa densificada; asimismo, se determinó que estos contenidos cumplen con los valores máximos, acorde a lo estipulado para cada rubro, en las normativas de calidad de pellets consultadas.

En general, se concluye que la biomasa empleada, los rangos estudiados de diámetro, fuerza de compresión y temperatura de peletizado, dan como resultado pellets con propiedades físicas y químicas que se ajustan de forma apropiada a los valores estipulados en las normativas de calidad pellets consultadas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar este estudio, y abarcar más biomásas residuales haciendo énfasis en las de corte netamente agrícola, cuya caracterización y aplicación con fines energéticos, al menos en Costa Rica, es un tema no estudiado con la profundidad debida.

Realizar un estudio similar al aquí desarrollado, pero con combinación de distintas biomásas, y analizar el efecto de esta combinación sobre las propiedades de los densificados, ya sea en forma de pellets u otras opciones de densificación.

Analizar el efecto de la variación del contenido de humedad presente en la biomasa, sobre las propiedades físicas, térmicas y fisicoquímicas de densificados en forma de pellets u otras opciones de densificación.

Estudiar el efecto sobre las propiedades de los pellets, si se emplean diferentes condiciones de densificación a las evaluadas en esta investigación; por ejemplo, temperaturas, fuerzas y diámetros de densificación menores y/o mayores.

Evaluar el efecto del tamaño de partículas de la biomasa empleada, sobre las propiedades de los pellets resultantes.

Abordar el estudio de la adición de aglutinantes y evaluar su efecto sobre las propiedades de interés para biomasa densificada en forma de pellets u otras opciones de densificación.

Debido a la importancia de las propiedades físicas y térmicas en modelos físicos y numéricos, se recomienda continuar con la determinación y análisis de estas bajo distintos métodos.

Evaluar el efecto del uso de densificados como los pellets, en procesos de aprovechamiento energético como la combustión convencional, así como modalidades tales como la gasificación, esto en términos físicos así como empleando modelos simulación numérica.

Se recomienda abordar el estudio de procesos de pretratamiento de la biomasa como la torrefacción, esto con tal de evaluar su efecto sobre las propiedades físicas, térmicas y fisicoquímicas del material final densificado.

REFERENCIAS

- Agencia de Servicios Agropecuarios de Pococí. (2011). Área de influencia ASA de Pococí. *MAG*. Retrieved June 2, 2014, from <http://www.mag.go.cr/regiones/rha/pococi.html>
- Antolín, G. (2006). *La gestión y el aprovechamiento de los residuos en la industria de madera*. Buenos Aires, Argentina.
- Arauz, L. F. (2011). HUMANO SOSTENIBLE Informe Final Agricultura : prácticas y desafíos ambientales 2011.
- Bergström, D., Israelsson, S., Öhman, M., Dahlqvist, S.-A., Gref, R., Boman, C., & Wästerlund, I. (2008). Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. *Fuel Processing Technology*, *89*(12), 1324–1329. doi:10.1016/j.fuproc.2008.06.001
- Bitra, V. S. P., Banu, S., Ramakrishna, P., Narender, G., & Womac, A. R. (2010). Moisture dependent thermal properties of peanut pods, kernels, and shells. *Biosystems Engineering*, *106*(4), 503–512. doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.05.016
- BP. (2013). *BP Statistical Review of World Energy*. London, UK.
- Brown, M. (1998). *Handbook of thermal analysis and calorimetry. Vol. 1*. (P. Gallagher, Ed.). Ohio: Elsevier.
- Cabral, J., Tatiane, D., Braga, M., Mitiko, M., Behling, C., Dias, P., & Dilicio, J. (2012). *Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais*. Brasil.
- Carroll, J. P., & Finnan, J. (2012). Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. *Biosystems Engineering*, *112*(2), 151–159. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.03.012
- Chacón, J. (2004). *Prácticas recomendadas para determinar y reportar la incertidumbre de las mediciones en química analítica* (1. ed.). San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Chacón, L. (2012). *Diagnóstico de las existencias de los residuos forestales en la región Huetar Norte de Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- Chavarría, M., & Castillo, M. (2011). *Reporte Estadístico Forestal 2011*. San José, Costa Rica.
- Chaves, B. (2011). Plan regulador de Pococí, Limón, Costa Rica. Retos y compromisos. *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*, *XII*, 61–77.
- Chinchilla, É. (2013a, June 16). Planta en San Carlos elabora combustible con desechos. *La Nación*. San José, Costa Rica. Retrieved from http://www.nacion.com/nacional/comunidades/Planta-San-Carlos-combustible-desechos_0_1348065287.html
- Chinchilla, É. (2013b, June 16). Empresa fija su atención en los desechos de piña. *La Nación*. San José, Costa Rica. Retrieved from http://www.nacion.com/nacional/comunidades/Empresa-fija-atencion-desechos-pina_0_1348065324.html
- Chinchilla, N. (2013, November 13). Desarrollan comprimidos de residuos para producir energía. *Blog de Noticias TEC*. Cartago, Costa Rica. Retrieved from <http://www.tec.ac.cr/prensa/blog/Lists/Entradas-de-blog/Post.aspx?ID=468>
- Clarke, S., Eng, P., & Preto, F. (2011). *Biomass densification for energy production* (pp. 1–8). Ontario, Canada.
- Cocchi, M., Nikolaisen, L., Junginger, M., Goh, C. S., Hess, R., Jacobson, J., Ovard, L. P., et al. (2011). *Global wood pellet industry, market and trade study*. Paris, France.

- CORBANA. (2013). Zonas de producción. *Área en producción bananera en Pococí*. Retrieved June 2, 2014, from https://www.corbana.co.cr/categories/categoria_1348198131
- EIA. (2011). *Annual Energy Outlook 2011* (Vol. 0383). Washington, USA.
- Erlich, C., Ohman, M., Bjornbom, E., & Fransson, T. (2005). Thermochemical characteristics of sugar cane bagasse pellets. *Fuel*, *84*(5), 569–575. doi:10.1016/j.fuel.2004.10.005
- Fasina, O., & Sokhansanj, S. (1995). Bulk thermal properties of alfalfa pellets. *Canadian Biosystems Engineering*, *37*(2), 91–95.
- Fernández, H. (2012). *Valorización integral de la biomasa leñosa agroforestal a lo largo del gradiente altitudinal en condiciones mediterráneas*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Franco, A. (2007). An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. *Applied Thermal Engineering*, *27*(14-15), 2495–2504. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.02.008
- García-Maraver, a., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for pellet quality. *Renewable Energy*, *36*(12), 3537–3540. doi:10.1016/j.renene.2011.05.013
- Ghadernejad, K., Kianmehr, M. H., & Arabhosseini, A. (2012). Effect of moisture content and particle size on energy consumption for dairy cattle manure pellets. *CIGR Journal*, *14*(3), 125–130.
- Gil, M. V., Oulego, P., Casal, M. D., Pevida, C., Pis, J. J., & Rubiera, F. (2010). Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. *Bioresource technology*, *101*(22), 8859–67. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.062
- Gonzalez, J. N. (2009). *Elaboración de pellets por medio de residuos agrícolas*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Guerrero, M. (2013). *Decimonoveno Informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible: Recursos Forestales*. San José, Costa Rica.
- Guo, W. (2013). *Self-Heating and Spontaneous Combustion of Wood Pellets during Storage*. University of British Columbia.
- Guo, W., Lim, C. J., Bi, X., Sokhansanj, S., & Melin, S. (2013). Determination of effective thermal conductivity and specific heat capacity of wood pellets. *Fuel*, *103*, 347–355. doi:10.1016/j.fuel.2012.08.037
- Guo, W., Lim, J., Sokhansanj, S., Bi, X., & Melin, S. (2009). Determination of Thermal Conductivity of Wood Pellets Using Line Heat Source Method. *2009 Reno, Nevada, June 21 - June 24, 2009*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers. doi:10.13031/2013.27366
- Harris, D. (2001). *Análisis químico cuantitativo* (2da. ed.). Barcelona, España: Reverté.
- Hernández, E. (2008). *La crisis mundial y sus repercusiones en el desarrollo de los programas nacionales de biocombustibles*. Universidad del Mar.
- Holman, J. (1986). *Transferencia de calor*. México: CECSA.
- IEA. (2007a). *Energy technologies at the cutting edge*. Paris, France.
- IEA. (2007b). Biomass for Power Generation and CHP. *Energy Technology Essentials*, 1–4.
- IEA. (2007c). *Bioenergy Project Development & Biomass Supply*. Paris, France.

- IEA. (2011). *Clean energy progress report*. Paris, France.
- IEA. (2013). *Tracking Clean Energy Progress 2013*. Paris, France.
- Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T., & Lavine, A. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). USA: John Wiley & Sons.
- INEC. (2012). *X Censo Nacional 2011: Resultados generales*. San José, Costa Rica.
- IRENA. (2012). *Biomass for Power Generation*. Bonn, Germany.
- IRENA. (2013). *Renewable Power Generation Costs in 2012: An Overview*. Bonn, Germany.
- JAPDEVA. (2011). *Plan regional de competitividad territorial para la región Huetar Atlántica vision 2012-2022*. Limón, Costa Rica.
- Kaliyan, N., & Morey, R. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. doi:10.1016/j.biombioe.2008.08.005
- Kumar, R., Chandrashekar, N., & Pandey, K. K. (2009). Fuel properties and combustion characteristics of Lantana camara and Eupatorium spp. *Current Science*, 97(6), 930–935.
- Lam, P. S., Sokhansanj, S., Bi, X., Lim, C. J., & Melin, S. (2011). Energy Input and Quality of Pellets Made from Steam-Exploded Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Energy & Fuels*, 25(4), 1521–1528. doi:10.1021/ef101683s
- Lee, S. M., Ahn, B. J., Choi, D. H., Han, G.-S., Jeong, H.-S., Ahn, S. H., & Yang, I. (2013). Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Biomass and Bioenergy*, 48, 1–9. doi:10.1016/j.biombioe.2012.10.015
- Li, Y., & Liu, H. (2000). High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, 19, 177–186.
- Liu, Z., Liu, X., Fei, B., Jiang, Z., Cai, Z., & Yu, Y. (2013). The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. *Renewable Energy*, 55, 1–5. doi:10.1016/j.renene.2012.12.014
- MAG. (2011a). *Informe por ASA de la producción agropecuaria*. San José, Costa Rica.
- MAG. (2011b). *Manejo adecuado de los rastrojos de piña*. San José, Costa Rica.
- Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2004). Evaluation of compaction equations applied to four biomass species. *Canadian Biosystems Engineering*, 46(Tabil 1996), 55–61.
- Mani, Sudhagar, Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2006). Specific energy requirement for compacting corn stover. *Bioresourcetechnology*, 97(12), 1420–6. doi:10.1016/j.biortech.2005.06.019
- Melin, S. (2011). *Quality Certification and Standards for Solid Biofuels*. Wood Pellet Association of Canada. Retrieved from http://www.pellet.org/linked/2011-05-11_standards_certification_-_staffan.pdf
- Miranda, M. T., Arranz, J. I., Román, S., Rojas, S., Montero, I., López, M., & Cruz, J. a. (2011). Characterization of grape pomace and pyrenean oak pellets. *Fuel Processing Technology*, 92(2), 278–283. doi:10.1016/j.fuproc.2010.05.035
- Miranda, T., Arranz, J. I., Montero, I., Román, S., Rojas, C. V., & Nogales, S. (2012). Characterization and combustion of olive pomace and forest residue pellets. *Fuel Processing Technology*, 103, 91–96. doi:10.1016/j.fuproc.2011.10.016

- Mohsenin, N. (1980). *Thermal properties of foods and agricultural materials*. New York, USA: Gordon and Breach Science Publishers.
- Moura, J., Devilla, I., & Martins, D. (2010). Seminário de Iniciação Científica. *Propriedades térmicas dos grãos de quinoa (Chenopodium quinoa, Wild)* (pp. 1–6). Goiás, Brasil.
- Obernberger, I., Brunner, T., & Barnthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, *30*(11), 973–982. doi:10.1016/j.biombioe.2006.06.011
- Obernberger, Ingwald, & Thek, G. (2010). *The Pellet Handbook*. London, UK: Earthscan.
- Ortiz, L. (2008). Producción de biocombustibles sólidos en España. Vigo, España.
- Peng, J. H., Bi, H. T., Lim, C. J., & Sokhansanj, S. (2013). Study on Density, Hardness, and Moisture Uptake of Torrefied Wood Pellets. *Energy & Fuels*, *27*(2), 967–974. doi:10.1021/ef301928q
- Platts. (2011). *World Electric Power Plants Database*. New York, USA: Platts.
- PNUD. (2008). *Diagnóstico sobre seguridad ciudadana en diez cantones de Costa Rica: Pococí* (pp. 1–49). San José, Costa Rica.
- Poddar, S., Kamruzzaman, M., Sujan, S. M. a., Hossain, M., Jamal, M. S., Gafur, M. a., & Khanam, M. (2014). Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value. *Fuel*, *131*, 43–48. doi:10.1016/j.fuel.2014.04.061
- ProDUS. (2006). *Diagnóstico del Plan Regulador de Pococí*. San José, Costa Rica.
- Quirós, R., Chinchilla, O., & Gómez, M. (2003). Rendimiento en aserrío y procesamiento primario de madera proveniente de plantaciones forestales. *Agronomía Costarricense*, *2*(29).
- Ramaswamy, H., Raghavan, V., Chakraverty, A., & Mujumdar, A. (2003). *Handbook of Postharvest Technology*. CRC Press.
- Ramírez, F., Carazo, E., Roldán, C., & Villegas, G. (2007). *Encuesta de Oferta y Consumo Energético Nacional a Partir de la Biomasa en Costa Rica: Año 2006*. San José, Costa Rica.
- Rhén, C., Gref, R., Sjöström, M., & Wästerlund, I. (2005). Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. *Fuel Processing Technology*, *87*(1), 11–16. doi:10.1016/j.fuproc.2005.03.003
- Rojas, A. (2004). *Prefactibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera*. Universidad de Chile.
- Roy, M. M., Dutta, A., & Corscadden, K. (2013). An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace. *Applied Energy*, *108*, 298–307. doi:10.1016/j.apenergy.2013.03.044
- SEPSA. (2013). *Boletín estadístico agropecuario N°23*. San José, Costa Rica.
- Shankar, J., & Bandyopadhyay, S. (2005). Process variables during single-screw extrusion of fish and rice-flour blends. *Journal of Food Processing and Preservation*, *29*(2), 151–164. doi:10.1111/j.1745-4549.2005.00020.x
- SINAC. (2011). *Censo Nacional de la Industria Forestal Primaria de Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- Sjöström, J., & Blomqvist, P. (2014). Direct measurements of thermal properties of wood pellets: Elevated temperatures, fine fractions and moisture content. *Fuel*, *134*, 460–466. doi:10.1016/j.fuel.2014.05.088

- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2011). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 90(11), 3285–3290. doi:10.1016/j.fuel.2011.05.011
- Tabil, L., & Sokhansanj, S. (1996). Process Conditions Affecting the Physical Quality of Alfalfa Pellets. *Applied Engineering in Agriculture*, 12(3), 345–350. doi:10.13031/2013.25658
- Tarasov, D., Shahi, C., & Leitch, M. (2013). Effect of Additives on Wood Pellet Physical and Thermal Characteristics: A Review. *ISRN Forestry*, 2013, 1–6. doi:10.1155/2013/876939
- Telmo, C., & Lousada, J. (2011). Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2634–2639. doi:10.1016/j.biombioe.2011.02.043
- Theerarattananoon, K., Xu, F., Wilson, J., Ballard, R., Mckinney, L., Staggenborg, S., Vadlani, P., et al. (2011). Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Industrial Crops and Products*, 33(2), 325–332. doi:10.1016/j.indcrop.2010.11.014
- Tokman, M. (2008). *Política energética: Nuevos Lineamientos*. Chile.
- Tumuluru, J. S., Tabil, L., Opoku, A., Mosqueda, M. R., & Fadeyi, O. (n.d.). Effect of process variables on the quality characteristics of pelleted wheat distiller's dried grains with solubles. *Biosystems Engineering*, 105(4), 466–475. doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.01.005
- Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683–707. doi:10.1002/bbb.324
- Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Kenny, K. L., & Hess, J. R. (2010). *A Review on biomass densification technologies for energy application*. Idaho.
- Vásquez, G. (2011). *Plan de trabajo Municipalidad de Pococí 2011-2016*. Pococí, Limón, Costa Rica. Retrieved from <http://www.scribd.com/doc/79749542/PLAN-DE-GOBIERNO-MUNICIPALIDAD-DE-POCOCI-2011-2016>
- Villalobos, A., & Alvarado, G. (2013). *Caracterización de principales residuos de biomasa lignocelulósica en Costa Rica*. San José, Costa Rica.