



**Evaluación de potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar**

**Luis Alberto Quintero López**

**Universidad de Manizales  
Facultad de Ciencias Contables Económicas y  
Administrativas  
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente  
Manizales, Colombia  
2017**



**Evaluación de potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de acetite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar**

**Luis Alberto Quintero López**

**Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente**

Director (a):

**Dr. En Ciencias Químicas Walter Murillo Arango**

Línea de Investigación:

Biosistemas Integrados

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas

Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Manizales, Colombia

2017



## **Agradecimientos**

Inicialmente agradecerle a Dios por estar ahí presente en cada paso, a mi familia que son el motor y mi sustento para seguir adelante, a mis amigos y colegas que sin su apoyo permanente esto no habría sido posible. De igual forma, un agradecimiento muy especial a mi tutor de tesis el doctor Walter Murillo Arango quien siempre estuvo pendiente y atento en cada paso de la construcción de la tesis.

## Resumen

Actualmente la mayoría de la energía térmica utilizada proviene de fuentes fósiles o de combustibles convencionales como la leña. En Colombia, hay 1,6 millones de familias que usan leña diariamente para cocción, de los cuales 1,4 millones son familias rurales y las restantes 200 mil son familias urbanas. Este consumo desmedido ha propiciado en gran parte un problema de deforestación debido al consumo excesivo de leña como combustible tradicional. En caso del departamento del Cesar la deforestación ha alcanzado las 448 hectáreas. El alto impacto ambiental causado hace necesario la búsqueda exhaustiva de fuentes no convencionales de energía. Esta investigación se fundamentó en la evaluación del potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana (raquis, fibra y cuesco), analizando su disposición, generación, características fisicoquímicas y energéticas para determinar su uso como alternativa a la leña como combustible. Estos residuos sólidos presentaron un considerable poder calorífico que se encuentra en rangos de 16 – 19 MJ/Kg. De igual forma, presentan un potencial energético que solo para la zona norte del departamento del Cesar en el año 2016 fue de 9.302 TJ/año. Del mismo modo, se determinó que con la utilización de estos recursos biomásicos en zonas rurales como medio combustible se estarían dejando de consumir 43.484 t/año de leña, lo que representa 1.478 hectáreas de bosque que se podrían conservar, además si se considera que solo potencial energético de esta biomasa residual podría suplir el 2,06% de la demanda energética nacional, estaríamos ante un escenario que según lo establecido representan una disponibilidad de recursos de 98.730 t/año distribuidos en 78% de raquis, 14% de fibra y 8% de cuesco solo para suplir la demanda en zonas rurales del área de estudio torno a un sustituto de la leña y al desarrollo de fuentes de energía térmica no convencionales y amigables con el medio ambiente.

**Palabras clave:** Palma Africana, Residuos Sólidos Agroindustriales, Poder Calorífico, Potencial Energético, Combustible.

## Abstract

Nowadays, most thermal energy used comes from either fossils fuels or conventional sources such as firewood. In Colombia, there are 1,6 million of families that daily use firewood for cooking, which of 1,4 million are rural families and the remaining 200 thousand are urban families. This disproportionate consumption has generated a problematic regarding to the increment in deforestation due to the excessive use of firewood as traditional fuel. In the case of Cesar Department, the deforestation has reached 448 hectares. The high environment impact caused has made necessary to find and apply non-conventional energy sources. This research is based on the agroindustrial solid waste potential energy assessment from the African palm oil (empty fruit bunch (EFB), fiber and shell) extraction process, analysing its disposition, generation, physical chemistry and energetic characteristics to determine its use as an alternative to the firewood as fuel. This solid waste shows a considerable calorific power in the range of 16-19 MJ/Kg. Furthermore, it is known an energetic potential which only for the north area of the Cesar department in 2016 was 9.302 TJ/year. In addition, it was determined that with the utilization of these biomass resources in rural zones as fuel means, it would be reducing 43.484 t/year of firewood which represents 1.478 hectares of forest that could be conserved. Also, if it is considered that only the energetic potential of this waste biomass could supply the 2,06% of the energetic national demand, we would be in an scenario that according with the established represents a resource availability of 98.730 t/year distributed in 78% of EFB, 14% fiber and 8% shell of the fruit, only to supply the demand in rural areas of the study zone as a substitute of the firewood and the development of non-conventional thermal energy and more friendly with the environment sources.

**Key words:** African palm, Agroindustrial solid wastes, calorific power, energetic Potential, Fuel.





# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>VI</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>11</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>12</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>13</b>
<b>1. Capítulo 1</b> .....	<b>16</b>
1.1 Antecedentes.....	16
1.2 Planteamiento del problema .....	22
1.2.1 Contexto del problema .....	22
1.2.2 Pregunta de Investigación .....	24
1.3 Referente teórico .....	24
1.3.1 Marco Conceptual .....	24
1.3.1.1 Residuos sólidos o biomasa.....	24
1.3.2.2 Composición de los residuos sólidos o biomasa .....	26
1.3.2.3 Contenido energético de la biomasa .....	27
1.3.2.4 Aprovechamiento de la biomasa .....	27
1.3.2.5 Análisis fisicoquímico de la biomasa .....	30
1.3.2.6 Determinación de potencial energético por modelación matemática ...	30
1.3.2.7 Procesos de conversión de la biomasa en energía térmica.....	32
1.3.2.8 Etapas de preparación y conversión de la biomasa .....	32
1.3.2.9 Procesos termoquímicos de la biomasa.....	34
1.3.2.10 Combustión de la leña.....	36
1.3.2.11 Densificación de la biomasa.....	37
1.3.2.12 Contexto de la biomasa de palma africana en la zona norte del departamento del Cesar .....	38
1.3.2 Análisis de las condiciones óptimas de aprovechamiento de biomasa de palma .....	41
1.3.3 Marco Legal .....	45
<b>2. Capítulo 2</b> .....	<b>49</b>
2.1 Justificación .....	49
2.2 Objetivos.....	52
2.2.1 Objetivo General .....	52
2.2.2 Objetivos Específicos .....	52
2.3 Materiales y Métodos.....	53
2.3.1 Localización .....	53

---

2.3.2	Enfoque de investigación .....	55
2.3.3	Tipo de investigación .....	55
2.3.4	Técnicas e Instrumentos de recolección de información .....	55
2.3.5	Población.....	56
2.3.6	Muestra.....	56
2.4	Etapas de la investigación.....	56
2.4.1	Etapa I: Disposición y Caracterización .....	57
2.4.1.1	Protocolo de Muestreo.....	58
2.4.1.2	Caracterización fisicoquímica y energética de muestras.....	59
2.4.2	Etapa II: Determinación energética de la mezcla de residuos sólidos .	61
2.4.3	Etapa III: Análisis energético.....	63
2.4.4	Etapa IV: Evaluación.....	63
<b>3.</b>	<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>64</b>
3.1	Resultados y Discusión .....	64
3.1.1	Disposición de residuos sólidos agroindustriales .....	64
3.1.2	Caracterización fisicoquímica de los residuos sólidos agroindustriales .....	66
3.1.2.1	Análisis elemental.....	67
3.1.2.2	Análisis próximo.....	69
3.1.2.3	Análisis estructural.....	71
3.1.2.4	Poder Calorífico .....	71
3.1.2.5	Análisis de Metales .....	73
3.1.2.6	Potencial Energético.....	75
3.1.3	Determinación energética de la mezcla de residuos sólidos agroindustriales .....	78
3.1.4	Análisis de viabilidad económica para la densificación de biomasa residual	80
3.1.5	Evaluación de consumo de combustible .....	84
<b>4.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>86</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>88</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>100</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1-1: Balance de masa del proceso de extracción del aceite de palma.....	19
Figura 1-2: Biomasa y su obtención .....	25
Figura 1-3: Comparativo porcentual de los gases en el efecto invernadero.....	25
Figura 1-4: Tipos de Biomasa.....	28
Figura 1-5: Procesos de conversión de la biomasa .....	33
Figura 1-6: Proceso de densificación de la biomasa.....	38
Figura 1-7: Plantaciones de palma africana al norte del departamento del Cesar .....	39
Figura 1-8: Promedio de productividad de subzonas en comparación con el promedio nacional.....	40
Figura 1-9: Planta de beneficio de palma de aceite con producción de pellets. ....	41
Figura 1-10: Balance de energía de un proceso de gasificación.....	42
Figura 1-11: Uso racional y eficiente de la energía (URE) .....	45
Figura 1-12: Fuentes no convencionales de energía .....	47
Figura 2-1: Cultivo de palma africana en la zona norte del departamento del Cesar .....	53
Figura 2-2: Diagrama de flujo de información metodológica .....	56
Figura 2-3: Protocolo de muestreo de residuos solidos .....	58
Figura 2-4: Distribución de los puntos de muestreo en una pila.....	59
Figura 2-5: Estructura del diseño experimental de mezclas.....	61
Figura 3-1: Análisis próximo de residuos sólidos de palma comparados con los de la Leña .....	69
Figura 3-2: Poder calorífico de los residuos de palma comparado con el de la leña como combustible .....	73
Figura 3-3: Contenido porcentual de metales de la biomasa residual de palma africana	74
Figura 3-4: Potencial energético de productos agroindustriales en el Cesar.....	76
Figura 3-5: Evolución de la demanda por otros energéticos – escenario base (PJ).....	77
Figura 3-6: Superficie de respuesta del diseño experimental de mezcla .....	79
Figura 3-7: Grafica de traza para el poder calorífico .....	79
Figura 3-8: Diagrama de proceso de producción de briquetas de residuos sólidos de palma .....	80
Figura 3-9: Costos de producción en % e inversión en USD. ....	81
Figura 3-10: Consumo de materia prima para densificación.....	82
Figura 3-11: Valor actual neto (VAN) (precios zona rural y urbana) USD (1000) y tasa interna de retorno (%).....	83

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1-1: Resumen casos expuestos de potencial energéticos en el marco global y latinoamericano.....	18
Tabla 1-2: Comparativo de los rendimientos energéticos de algunas biomásas residuales .....	29
Tabla 1-3: Comparativo ambiental de la combustión y gasificación.....	43
Tabla 1-4: Comparativo tecnológico desde la perspectiva de la combustión.....	43
Tabla 2-1: Plantas de beneficio de la zona norte del departamento del Cesar .....	54
Tabla 2-2: Parámetros de Caracterización de Biomasa Residual.....	60
Tabla 3-1: Disposición y producción de distintos cultivos del departamento del Cesar....	64
Tabla 3-2: Producción de residuos sólidos agroindustriales de palma África .....	65
Tabla 3-3: Análisis elemental de los residuos sólidos de palma de africana comparados con los datos de otros autores .....	67
Tabla 3-4: Análisis elemental de residuos sólidos agroindustriales comparado con otros combustibles tradicionales .....	68
Tabla 3-5: Análisis próximo de los residuos sólidos de palma africana comparados con los datos de otros autores .....	69
Tabla 3-6: Análisis estructural de los residuos sólidos de palma africana comparados con los datos de otros autores .....	71
Tabla 3-7: Poder calorífico de los residuos sólidos agroindustriales de palma africana comparados con los datos de otros autores.....	72
Tabla 3-8: Poder calorífico de biomasa residual agrícola en Colombia y Asia.....	72
Tabla 3-9: Potencial energético de residuos sólidos de palma africana .....	75
Tabla 3-10: Porcentaje máximo y mínimo de disposición de residuos sólidos.....	78
Tabla 3-11: Comparación de mezcla de biomasa residual con otros combustibles. ....	84
Tabla 3-12: Consumo de leña combustible en comparación con biomasa residual.....	85

## Introducción

La capacidad que tienen los residuos sólidos agroindustriales o biomasa residual de transformar la energía del sol y almacenarla para su posterior liberación mediante diversas técnicas para solventar necesidades energéticas convencionales, es una solución energética amigable con el medio ambiente, sostenible y eficiente (Arévalo, 2015). La biomasa es hoy una de las fuentes de energía renovable de mayor participación en la canasta energética mundial, siendo protagonista especialmente en países subdesarrollados y en vía de desarrollo (UPME, 2015a).

Según Vargas et al. (2011), la biomasa residual disponible de algunos procesos agroindustriales como el de caña de azúcar, arroz, café y palma africana, se consume directa y mayoritariamente en calderas como combustible para generar el vapor necesario y satisfacer los requerimientos energéticos de los respectivos procesos. De esta forma, las biomásas se presentan como alternativas de sustitución total o parcial de los combustibles sólidos convencionales como el carbón y la leña, estimulando una reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero-GEI, que eventualmente puede aplicar a proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio. Casi tres mil millones de personas en el mundo emplean todavía la leña como fuente de energía para calentar agua y cocinar, lo que provoca, entre otros efectos, la pérdida de millones de hectáreas de bosques tropicales y zonas arboladas. Entre el 15% y el 20% de la población colombiana depende de la leña como su principal combustible de cocción de alimentos (INCOMBUSTION 2016).

La UPME (2015b), plantea que Colombia es un país que goza de una matriz energética relativamente rica en combustibles fósiles, y su consumo está basado en un 78% de recursos primarios (petróleo, gas y carbón) de este origen. Sin embargo, el Gobierno Nacional en los últimos años ha invertido en el desarrollo y aplicación de tecnologías alternativas de producción de energía, que funcionen con recursos renovables (energía solar, eólica, biomasa, entre otras), para solucionar el problema de la crisis energética y contribuir a un medio ambiente más limpio; en este sentido, los residuos de biomasa, representan potenciales atractivos debido a su gran producción en diferentes zonas y cultivos en el país.

En Colombia, los residuos sólidos agroindustriales del proceso de obtención de aceite de palma, cada día ganan mayor importancia desde la perspectiva energética, debido al potencial que pueden generar. El uso racional de esta biomasa residual es una materia prima primordial como fuente de energía limpia, y una alternativa a los combustibles fósiles ampliamente utilizados y diseminados en el mundo. La utilización de estos combustibles no renovables ha derivado en un consenso mundial en relación a la necesidad de desarrollar nuevas formas de producción de energía renovable y sostenible, a la vez que se propenda por su inclusión en más actividades económicas, comerciales e industriales y en los diferentes sectores productivos mediante procesos de producción más limpios y eficientes (Quintero y Quintero, 2015).

La biomasa residual combinada con tecnologías modernas permite tanto la producción de electricidad como la producción de calor y su uso para fines de transporte. Siendo esta la Fuente No Convencional de Energía Renovable-FNCER más desarrollada en Colombia, específicamente a partir del uso energético de residuos agroindustriales, también se resalta que el potencial para aprovechamiento energético de las biomasa en Colombia es alto, especialmente a partir de residuos que ascienden al orden de 450 PJ/año, y que corresponden a aproximadamente el 41% de la demanda nacional de energía, pudiendo ser usados tanto con fines eléctricos como térmicos (UPME, 2015a).

Puntualmente en la evaluación energética del uso de biomasa como combustible Lezcano (2011) resalta que se hace necesario que ingresen otros participantes que proporcionen mayor diversificación y confiabilidad al sistema de generación de energía en el país, orientado al óptimo aprovechamiento sustentable y la eficiencia energética desde la evaluación de los recursos energéticos existente y su potencialidad de generación.

Sin embargo, el uso de la leña como energético comúnmente utilizado por poblaciones rurales y de escasos recursos, obedece tanto a la forma tradicional de vida de sus pobladores, como a factores económicos y a falta de acceso a otras fuentes de energía. Esto la convierte en la fuente energética más accesible; adicionalmente genera implicaciones de tipo ambiental para labores domésticas (Sierra, 2011). Según la FAO (2016), en 1990, el mundo tenía 4.128 millones de hectáreas (ha) de bosque; en 2015 esa

área había disminuido a 3.999 millones de ha. Estas ganancias y pérdidas de bosque ocurren de manera continua y las ganancias, en particular, son muy difíciles de monitorear, incluso mediante imágenes satelitales de alta resolución.

Por ello, la biomasa residual se convierte en una fuente no convencional de energía y en una alternativa renovable para la producción de energía (en forma de calor o eléctrica), y teniendo en cuenta que el departamento del Cesar cuenta con excelentes recursos de biomasa generada de la extracción de aceite de palma, pues aporta el 22% de la producción nacional (Fedepalma, 2016), es evidente que también posee una cantidad importante de los desechos de este proceso. El objetivo principal de esta investigación es evaluar el potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana (raquis, fibra y cuesco) como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar.

# 1. Capítulo 1

## 1.1 Antecedentes

En la actualidad, la búsqueda e implementación de nuevas fuentes de energía ha tomado gran importancia debido a problemas relacionados con el cambio climático y el agotamiento de combustibles fósiles; y además el uso de residuos agroindustriales ha tenido gran acogida por ser una posible fuente renovable de energía. Es evidente que existe la necesidad de evaluar tecnologías que proporcionen mayor diversificación y confiabilidad, para proporcionar un mejor planeamiento energético sostenible, con el óptimo aprovechamiento de recursos del territorio (Lezcano, 2011).

Según Cerdá (2012), la biomasa sólida es la mayor fuente de energía renovable en el mundo, supone el 9,2% de la oferta total de energía primaria en el mundo y el 70,2% de la oferta total de energía renovable. De igual forma, la leña que se obtiene sin mediar transacción comercial, se utiliza fundamentalmente para cocinar y proporcionar calor en los hogares, tiene unos niveles bajos de eficiencia y genera problemas de deforestación y de salud al emitir gases y partículas contaminantes a causa de la combustión incompleta.

En tal contexto, se ha generado la necesidad de iniciar una transición hacia el uso de recursos energéticos de carácter renovable, que a su vez contribuyan a la reducción de emisiones de efecto invernadero y a la mitigación del cambio climático que viene experimentando el planeta. Por ello, países como China, Alemania, España, y Estados Unidos, se consolidan hoy en día como pioneros en el desarrollo de las mayores capacidades instaladas en tecnologías para el aprovechamiento de la energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica y de la biomasa, como fuentes de origen renovable que hacen su



---

aporte en el proceso de transición planteado en lo que a la generación de energía se refiere (REN21, 2014).

Por otro lado, según Flores et al. (2008), la tecnología predominante que se utiliza a nivel mundial para producir energía a partir de biomasa es mediante el ciclo Rankine, el cual consiste en la combustión directa de la biomasa en una caldera para generar vapor sobrecalentado. Sin embargo, el estudio toma el caso puntual del bagazo de caña, que tiene un poder calorífico de 8,0 kJ/g, y que puede producir de modo anual energía potencial de 3.700 TJ para el estado de Morelos en México. De igual modo, consideran una eficiencia térmica de la turbina del 40%, así como una eficiencia de la caldera del 80%, por la que la cantidad potencial de energía obtenida es de 1.185 TJ, los cuales representan 15,6% de las necesidades energéticas del Estado de Morelos en el año 2005. Del mismo modo, se realiza un cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> reducidas por el reemplazo de combustible fósil, donde se consideran los 3.700 TJ/año, ya que las eficiencias de la caldera y la turbina afectan tanto el combustible fósil como al bagazo de caña. De esta forma, la reducción anual de emisiones sería de 0,545 Tg CO<sub>2eq</sub>.

Gómez, et al. (2004), establecen que el proceso de combustión directa es el más utilizado y antiguo para generación de energía con biomasa, y también es el método más económico. En el caso de generación de energía térmica, sólo requiere de una fuente para la obtención de biomasa y una caldera para la combustión; en cuanto a eficiencia, para la generación de energía eléctrica se encuentra entre el 15 a 38% y para el caso de generación térmica se encuentra por encima del 70%.

Del mismo modo, los Malayos (los mayores productores de Aceite de palma a nivel mundial) han decidido reducir su dependencia de los combustibles fósiles, a través de la diversificación de combustibles y, en este sentido, la biomasa residual de palma africana es una de las fuentes potenciales de energía, dada su abundancia y dado que es rica en carbono, elemento químico primordial en la composición de los combustibles, conforme es también abundante en el petróleo y otras fuentes de energía fósil, se produjeron en 2011 en residuos sólidos 23,8 millones de toneladas (54%) de racimos de frutas vacías, 13,2 millones de toneladas (30%) de cáscara y 7,9 millones de toneladas (18%) de fibra. Con esta biomasa residual se analizan diferentes tecnologías para su aprovechamiento

energético, las cuales son: producción de etanol, recuperación de metano, briquetas, planta de cogeneración y compostaje, obteniendo por medio de un análisis de sensibilidad que esta biomasa puede generar energía relativamente alta, la cual puede estar en el orden de 536 – 1.133 MJ/t procesada según la tecnología aplicada (Chiew & Shimada, 2013).

Según Quintero y Quintero (2015), el potencial energético en el marco global y latinoamericano, se muestra desde la perspectiva de los diferentes tipos de biomasa (residuos forestales, residuos de agricultura, microalgas), la biomasa total disponible y la producción energética, a partir de una tabla resumen que relaciona los casos expuestos y los resultados de los estudios del potencial energético, como se muestra a continuación:

Tabla 1-1: Resumen casos expuestos de potencial energéticos en el marco global y latinoamericano

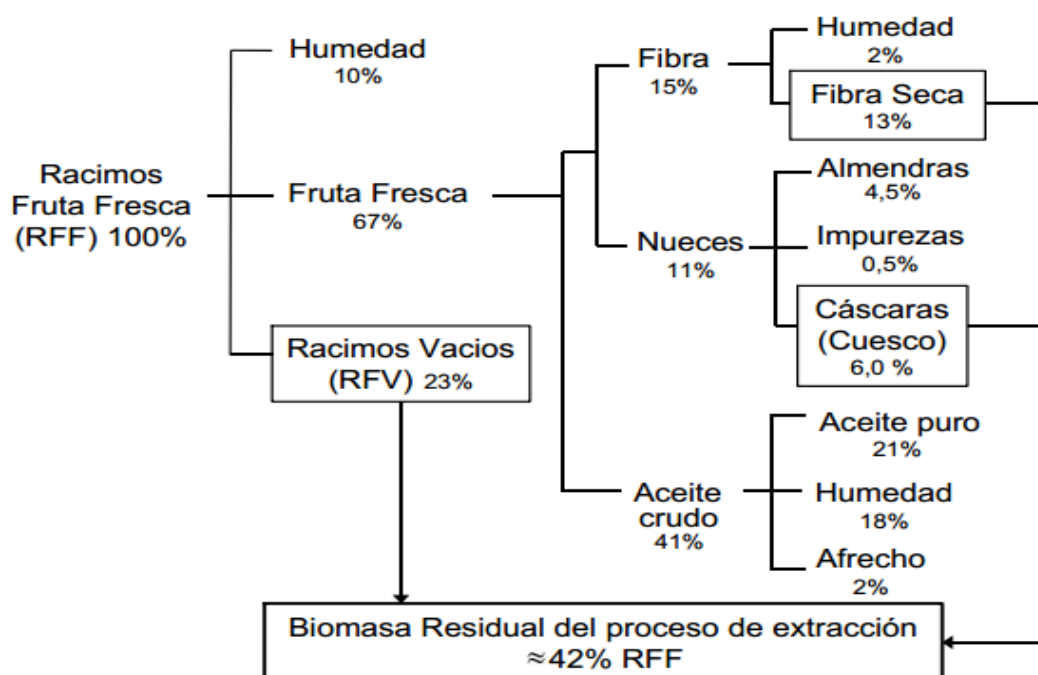
<b>Potencial Energético</b>					
<b>Estudios de Caso</b>	<b>Residuos Forestales</b>	<b>Residuos Agrícolas</b>	<b>Microalgas</b>	<b>Biomasa Disp. Total</b>	<b>Producción Energética</b>
<b>Provincia Cáceres, España</b>	463.000 Toneladas de biomasa seca				139.000teq (Toneladas equivalentes de petróleo)
<b>Portugal</b>	2.634 t/año	7.973 t/año		10.600 t/año	106.000 GJ/año
<b>Polonia</b>	Más de 100 plantaciones de cultivos energéticos de al menos 5 hectáreas, cada una para alimentar sus centrales térmicas de biomasa				100 Centrales térmicas de biomasa de 0.5 MW
<b>Irán</b>			130 t/ha/año		60.000 L de Biodiesel
<b>Indonesia, Filipinas, Malasia, Tailandia y Vietnam</b>	19 millones de toneladas de cascarilla de arroz/año				16.720 Mw
<b>Malasia e Indonesia</b>					33,7 millones de toneladas de aceite de palma
<b>África</b>	Hipótesis de plantación de sólo el 10% de la superficie de las áreas de no cultivo, la superficie no boscosa disponible y áreas no desérticas con cultivos energéticos de biomasa.				18 EJ/año

<b>Estados Unidos</b>	142 millones de Toneladas	48 millones de Toneladas			
<b>Provincia de Mendoza, Argentina</b>	308.347 Tonelada métrica/año	203.689 Tonelada métrica/año de la Viticultura		548.605 t	

Fuente: Quintero y Quintero (2015)

De igual forma, se presenta un esquema del balance de masa del proceso de extracción del aceite de palma, conformado por los racimos de fruta vacíos (RFV) o más conocidos como raquis, la fibra del mesocarpio y el cuesco o cascara de la almendra, los cuales en conjunto constituyen una fracción cercana al 42% en masa de los racimos de fruta fresca (RFF) (Gómez, et al. 2008). La biomasa generada directamente en la plantación como plantas muertas y hojas de la palma no se han considerado en este trabajo en los balances presentados, según se presenta en la figura 1-1.

Figura 1-1: Balance de masa del proceso de extracción del aceite de palma



Fuente: Gómez, et al. 2008.

Con el fin de cuantificar la generación, uso y disposición de la biomasa proveniente de las plantas de beneficio de palma africana en Colombia, se realizó por parte de Ramírez et al. (2015), una encuesta en 27 plantas de beneficio, que representan el 72,2% (3.604.319 toneladas) de los racimos de fruta fresca (RFF) procesados en Colombia durante 2013, donde se evidenció que se cuenta con más de 424.000 toneladas de biomasa seca (Raquis, Fibra de mesocarpio y Cuesco) y más de 1,5 millones de metros cúbicos de efluentes para ser utilizados. A partir del diagnóstico, se obtuvo que, del total de la fruta procesada, el 40% corresponde a biomasa sólida (base húmeda) compuesta por: 20,22%, de tusas; 13,65% de fibra de mesocarpio; 5,63% de cuesco; 0,53% de ceniza de caldera y 0,20% de lodo.

Actualmente se intenta lograr independencia de las fuentes de energía fósil principalmente de las convencionales como la leña, debido al grado de contaminación que aporta al medio ambiente y se intenta por medio de reglamentación política, desarrollo investigativo y en desarrollo empresarial se logre potenciar el estudio de las fuentes de energía alternativa y renovable (Serrato y Lemes, 2016).

El uso excesivo de leña está generando una crisis ambiental y social en los países en desarrollo. Hoy día, casi tres mil millones de personas en el mundo emplean todavía la leña como fuente de energía para calentar agua y cocinar, lo que provoca, entre otros efectos, la pérdida de millones de hectáreas de bosques tropicales y zonas arboladas. Entre el 15% y el 20% de la población colombiana depende de la leña como su principal combustible de cocción de alimentos (INCOMBUSTION, 2016). Del mismo modo, la región Caribe ha aumentado de manera considerable los terrenos deforestados, convirtiéndose en 2014 en la mayor zona con hectáreas deforestadas con 18.903 que incluyen la pérdida de bosque seco tropical, y específicamente el departamento Cesar con 448 ha deforestadas (IDEAM, 2015).

De igual manera, la tecnología de densificación tiene alto potencial como alternativa al uso de leña. Las personas que utilizan briquetas están aprovechando sus beneficios al ahorrar tiempo y energía, proteger el medio ambiente y generar ingresos por medio de su fabricación y comercialización. Además de la rapidez de fabricación a costos bajos, pueden ser adaptadas y aplicadas a diferentes entornos. La importancia de esta tecnología es el

---

uso de residuos para remplazar la leña y proteger los recursos forestales que se encuentran en constante degradación (Gamarra, 2010).

Este proceso de conversión de biomasa es una invención que consiste en preparar un combustible a partir de residuos obtenidos en un proceso de aceite de palma en el que se seca residuo agrícola triturado que tiene un contenido de agua de entre 40 y 75% en peso de agua para obtener un residuo agrícola seco que tiene un contenido de agua de entre 5 y 10% en peso y luego se compacta en gránulos, cubos o briquetas pequeñas que tienen un tamaño bidimensional de entre 5 y 1000 mm y un espesor de entre 5 y 300 mm y una densidad de entre 200 y 1200 kg / m<sup>3</sup> (US 20110297885 A1).

Según, Chiew y Shimada (2013), determinaron que esta tecnología de transformación de biomasa residual en material densificado, es una de las oportunidades que ha identificado países como Malasia, que permiten un transporte más fácil del material, una combustión de mayor calidad, una menor humedad y un aumento en el poder calorífico de los residuos sólidos de palma africana densificados. Esta biomasa densificada con contenidos de humedad menor al 10% puede generar poderes caloríficos de al menos 18 MJ/kg.

A través del Atlas de Biomasa publicado por la UPME y la Universidad de Industrial de Santander en el 2010, manifiesta que el departamento del Cesar cuenta con una gran potencial de residuos agroindustriales, de los cuales, los que generan mayor potencial energético son: la palma de aceite, caña panelera, café, maíz, arroz y plátano, y el potencial total de estos desechos en el 2010 de aproximadamente 66.000 TJ/año; a pesar de esto, el uso de los recursos energéticos ha sido deficiente, el grado de desarrollo tecnológico y el estado de la infraestructura influyen directamente sobre la eficiencia del proceso.

En el siguiente trabajo de investigación se establecen los lineamientos para evaluar el potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales de palma africana, con el fin de mostrar las características y potencialidades que esta biomasa presenta frente a un combustible tradicional como la leña en la zona norte del departamento del Cesar.

## 1.2 Planteamiento del problema

### 1.2.1 Contexto del problema

Todas las sociedades necesitan de servicios energéticos para cubrir las necesidades humanas básicas (por ejemplo, de alumbrado, cocina, ambientación, movilidad y comunicación) y para los procesos productivos, sin embargo, los elevados precios en el consumo de la energía, así como las consecuencias que se derivan del calentamiento global, evidencian la necesidad de buscar nuevas formas de energía, llámese solar, eólica o la contenida en la biomasa. Esta tendencia global, impone a los países la obligación perentoria de conocer de primera mano los recursos energéticos renovables con que cuentan (Miranda y Amaris, 2009).

Actualmente, el aumento desmedido de la población ha llevado consigo a un crecimiento industrial importante, en busca de satisfacer las necesidades energéticas, las cuales son fundamentales para el progreso y desarrollo socioeconómico de los países. Sin embargo, esto ha ocasionado un alto impacto ambiental y una búsqueda exhaustiva de alternativas a los combustibles fósiles convencionales. Según datos del Banco Mundial para el año 2015, Colombia dependía de un 76,68% de los combustibles fósiles para el consumo interno de energía, mientras que el uso de energías alternativas y residuos solo estaba relegado a un 10,93%.

En este contexto mundial en el que el 81% del total de la energía consumida proviene de fuentes fósiles y tan solo un 19% de fuentes renovables, durante los últimos 30 y 40 años se ha venido desarrollando una etapa de transición hacia el aprovechamiento de estas últimas con el fin de reducir la dependencia en la importación de energéticos fósiles de precios ampliamente volátiles, disminuir las emisiones de efecto invernadero producidas por el sector energético y contribuir así a la mitigación del cambio climático.(UPME, 2015a).

Colombia es un país que goza de una matriz energética relativamente rica tanto en combustibles fósiles como en recursos renovables, pero dado que su consumo está basado en un 78% de recursos primarios de origen fósil, debe tenerse en cuenta que dicha

---

demanda está prevista para ser cubierta por la oferta doméstica tan solo por el orden de 7 años más para el caso del petróleo y 15 años más para el caso del gas natural (UPME, 2015b).

Es indispensable tener en cuenta que Colombia cuenta con potenciales energéticos del orden de 450.000 TJ por año en residuos de biomasa, lo que representa un atractivo importante (UPME, 2015a). Si a esto le añadimos que la deforestación en Colombia cada día es más evidente sobre todo en zonas rurales debido a la utilización de la leña en sus actividades convencionales, donde según las cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE, en la Encuesta nacional de hogares, para el 2016 en Colombia 1,6 millones de familias usan leña diariamente para cocción, de los cuales 1,4 millones son familias rurales y las restantes 200 mil son familias urbanas. Sumado a eso el 60% de la madera extraída es utilizada como leña; esta actividad es causante de problemas ambientales, como la fragmentación de ecosistemas, pérdidas de hábitats, liberación de carbono al ambiente esto por la alta demanda que tiene la actividad en el mundo.

De igual forma, el proceso de combustión incompleta de la leña genera residuos después de la combustión, entre ellos los inquemados y humos, ricos en monóxido de carbono, benceno, butadieno, formaldehído, hidrocarburos, poliaromáticos parte de las emisiones de gases con efecto invernadero: 4,3 mega toneladas al año en lo que enmarca a Colombia. (Ramírez y Taborda, 2014). Del mismo modo, el uso de la leña es una de las principales fuentes de enfermedades por infecciones respiratorias agudas las cuales representan en el país un 57,2%, debido a las emisiones por el uso de este combustible (Sánchez, y Mazanett, 2016).

Actualmente el departamento del Cesar tiene 448 ha deforestadas (IDEAM, 2015), pero contrario a esto es uno de los principales productores de aceite de palma de Colombia, y en su proceso se generan residuos sólidos (raquis, fibra y cuesco) que para el año 2016 fueron de 963.096,49 t (Fedepalma, 2016) solo en lo que respecta a la zona norte del departamento. Estos residuos en muchos de los casos no son aprovechados en su totalidad por las plantas de beneficio en la zona, lo que ocasiona en cierta medida

acumulación y subutilización de los mismos, y en algunos casos críticos quemas descontroladas.

Es aquí, donde los residuos sólidos pueden ser aprovechados para proporcionar energía limpia y eficiente sobre todo en zonas rurales como una alternativa energética a los combustibles fósiles tradicionales como la leña en el departamento, disminuyendo la deforestación, emisiones y contribuyendo a la disminución de los efectos de cambio climático en la zona, establecidos por medio del gobierno departamental a través de la apropiación de los objetivos de desarrollo sostenible.

### **1.2.2 Pregunta de Investigación**

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente mencionado se plantean la siguiente formulación del problema con base al problema contextualizado en la investigación:

- ¿Cómo contribuye el aprovechamiento de los residuos sólidos agroindustriales de palma africana, a la producción eficiente de energía en remplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar?

## **1.3 Referente teórico**

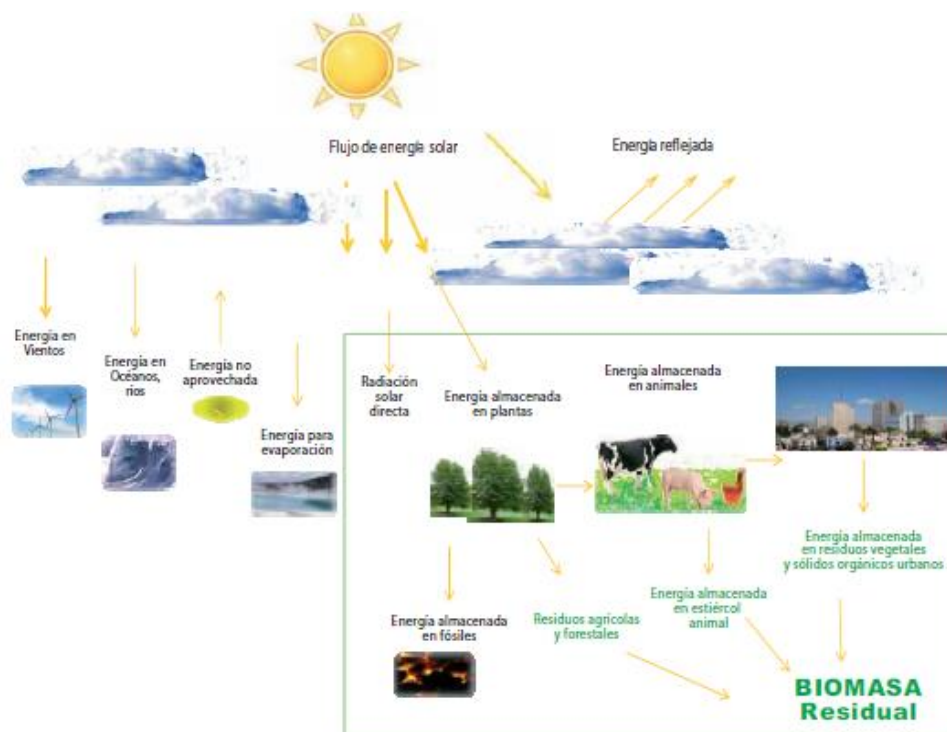
### **1.3.1 Marco Conceptual**

#### **1.3.1.1 Residuos sólidos o biomasa**

Los residuos sólidos o Biomasa es una solución que contribuye a cubrir necesidades energéticas de una forma sostenible. La Biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido en carbón y un elevado contenido en oxígeno y en compuestos volátiles. Los compuestos volátiles, con presencia de dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrógeno, son los que concentran una gran parte del poder calorífico de la biomasa (UPME, 2010). Su poder calorífico depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su contenido de humedad como se observa en la figura 1-2.



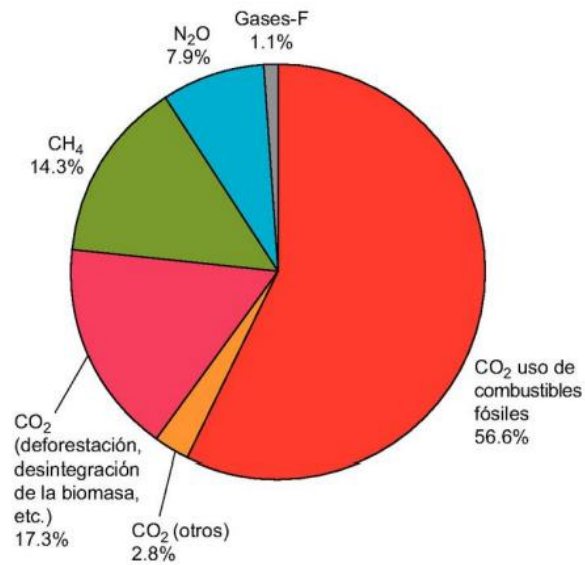
Figura 1-2: Biomasa y su obtención



Fuente: UPME, 2010.

Estas características, junto con el bajo contenido en azufre, la convierten en un producto especialmente atractivo para ser aprovechado energéticamente; cabe anotar que su aprovechamiento energético no contribuye a aumentar el efecto invernadero ya que el balance de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera es neutro. En efecto, el dióxido de carbono generado en la combustión de la biomasa es reabsorbido mediante la fotosíntesis en el crecimiento de las plantas necesarias para su producción y, por tanto, no incrementa la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera. Por el contrario, en el caso de los combustibles fósiles, el carbono que se libera a la atmósfera es el que se ha fijado en la tierra durante miles de años (Patiño, 2014) (figura 1-3).

Figura 1-3: Comparativo porcentual de los gases en el efecto invernadero



Fuente: García, 2014b.

### 1.3.2.2 Composición de los residuos sólidos o biomasa

Según Correa (2016), la biomasa es un material formado principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno; estos compuestos son los que reaccionan exotérmicamente cuando el residuo cede energía. Conocer la composición de un residuo es importante al momento seleccionar una tecnología para su aprovechamiento energético; por consiguiente, la caracterización de la biomasa involucra conocer los siguientes parámetros:

- Composición física: Involucra determinar en la sustancia su densidad aparente y Humedad y el calor.
- El análisis elemental: Reporta el porcentaje en peso de oxígeno (O<sub>2</sub>), carbono (C), hidrogeno (H), azufre (S) y Nitrógeno (N).
- El análisis próximo: Contempla evaluar el contenido de carbono fijo, el material volátil y las cenizas.
- El análisis estructural: Hace referencia a cuantificar el contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa.

### **1.3.2.3 Contenido energético de la biomasa**

Una de las características más importantes de los combustibles es su contenido energético, el cual puede obtenerse de su transformación y uso. Esta propiedad es fundamental para determinar el tipo de biomasa que puede utilizarse como combustible (Arévalo, 2015).

La combustión es una reacción de oxidación de los componentes de la biomasa a alta temperatura y en presencia de una cantidad de oxígeno suficiente para producir la oxidación de los componentes de la biomasa, de la que se obtienen energía en forma de calor y dióxido de carbono, agua y cenizas como productos de la reacción. La oxidación de la materia que contenga carbono e hidrógeno, para generar metano y agua, y se lleva a cabo mediante una reacción de oxidación exotérmica. El poder Calórico Inferior (PCI) es la variable que permite cuantificar la energía liberada en los procesos de combustión de la materia (Carrasco, 2008)

### **1.3.2.4 Aprovechamiento de la biomasa**

En economías de orientación agrícola, como las de los países como Colombia, el uso apropiado de la biomasa ofrece una alternativa para reducir los costos de operación por concepto de insumos energéticos; además, es una solución para los problemas higiénico-ambientales que, en muchos casos, presentan los desechos orgánicos. Las denominadas “granjas energéticas” pueden suplir un porcentaje significativo de los requerimientos energéticos mundiales y, al mismo tiempo, revitalizar las economías rurales, proveyendo energía en forma independiente y segura y logrando importantes beneficios ambientales. Las comunidades rurales pueden ser, entonces, energéticamente auto suficientes en un alto grado, a partir del uso racional de los residuos y administrando inteligentemente la biomasa disponible en la localidad (BUN\_CA, 2002).

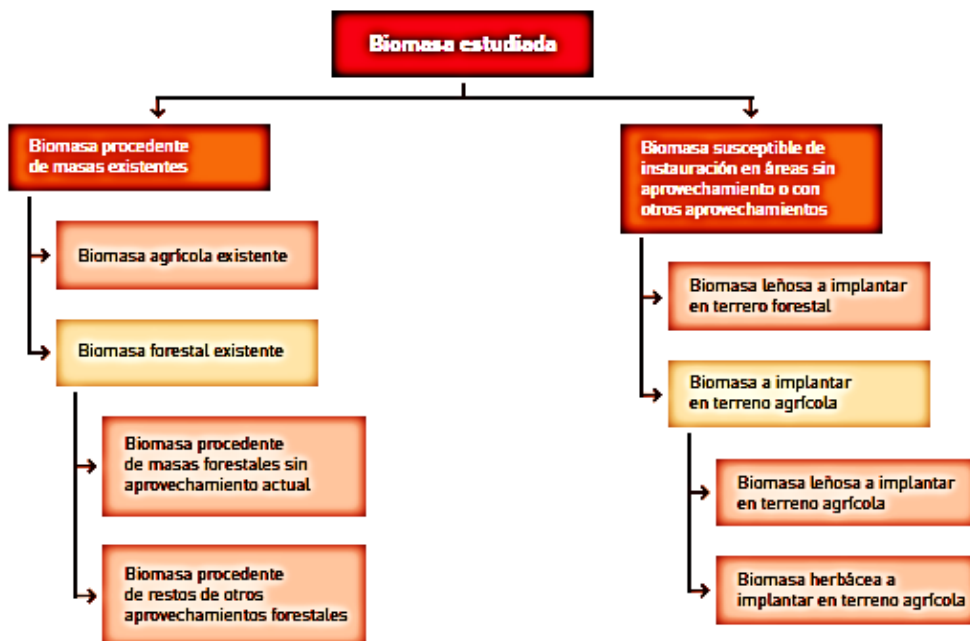
Actualmente, los procesos modernos de conversión solamente suplen 3% del consumo de energía primaria en países industrializados. Sin embargo, gran parte de la población rural en los países subdesarrollados que representa cerca del 50% de la población mundial, aún depende de la biomasa tradicional, principalmente de leña, como fuente de energía

primaria. Este supe, aproximadamente, 35% del consumo de energía primaria en países subdesarrollados y alcanza un 14% del total de la energía consumida en el nivel mundial (IEA, 2012).

Los recursos biomásicos incluyen cualquier fuente de materia orgánica, como desechos agrícolas y forestales, plantas acuáticas, desechos animales y basura urbana. Su disponibilidad varía de región a región, de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población, las actividades productivas, etc; por eso, los correspondientes aspectos de infraestructura, manejo y recolección del material deben adaptarse a las condiciones específicas del proceso en el que se deseen explotar (IDAE, 2011)

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), utiliza la definición de la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 para catalogar la “biomasa” como “todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”. En el siguiente esquema se presentan las distintas biomásas que pueden ser estudiadas.

Figura 1-4: Tipos de Biomasa



Fuente: IDAE, 2011.

La biomasa se puede generar a partir diferentes residuos agrícolas como bagazo de caña, hojas y cogollos, residuos sólidos de palma africana (raquis, fibra y cuesco), pulpa, cisco y tallos de café, cascarilla de arroz y por medio de residuos forestales como restos de podas, siegas, limpiezas de montes y aserrín. El rendimiento mundial de la palma africana expresado en su equivalente energético de la biomasa producida, es significativamente mayor que el de otros cultivos (tabla 1-2). Cabe mencionar que en momentos donde las fuentes alternas de abastecimiento energético empiezan a tener gran importancia es por los inconvenientes presentados con el petróleo, gas y carbón natural y demás fuentes naturales, la palma africana se presenta como una buena alternativa (Hernández, 2011).

Tabla 1-2: Comparativo de los rendimientos energéticos de algunas biomásas residuales

<b>Biomasa/Cultivo</b>	<b>Cantidad de Producción (t)</b>	<b>Tipo de residuo</b>	<b>Masa de residuo* (t)</b>	<b>Potencial Energético Total (TJ)</b>
Arroz	1	Cascarilla	0,200	0,0028
Café	1	Pulpa	2,131	0,0247
		Cisco	0,205	
		Tallos	3,024	
Caña Panelera	1	Bagazo	2,530	0,0084
Maíz	1	Rastrojo	0,934	0,0119
		Tusa	0,270	
Palma de Aceite	1	Cuesco	0,217	0,0303
		Fibra	0,627	
		Raquis	1,060	
Leña Combustible**	1	Combustibles indirectos de la leña	1,000	0,0138

\* Tomado de la UPME, 2010. \*\* Tomado de la FAO, 2016.

Fuente: El autor.

### **1.3.2.5 Análisis fisicoquímico de la biomasa**

Por medio del atlas de biomasa de Colombia la UPME (2010), establece la caracterización fisicoquímica de la biomasa de un material involucra realizar a la muestra un análisis último y próximo. Estos análisis se expresan en base seca, razón por la cual se requiere previamente evaluar el contenido de humedad. Con el análisis elemental se determina el contenido de compuestos simples que gasifican y que aportan energía en las reacciones de combustión. Este análisis incluye cuantificar en la muestra el porcentaje en peso de carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S) y nitrógeno (N). El análisis próximo abarca determinar en la muestra el contenido de cenizas, material volátil y carbono fijo. Sin embargo, cuando se desea valorar una aplicación industrial de un residuo, como fuente de energética, es recomendable incluir en el análisis de cuantificación de proteínas, grasas y aceites, la densidad aparente y un análisis estructural; que incluye celulosa, lignina y hemilcelulosa. De igual forma incluir un análisis de metales por medio de la cuantificación de cenizas para observar que tan beneficioso puede llegar hacer este residuo debido a que un alto contenido de ceniza y por ende de metales puede disminuir las propiedades térmicas y por ende su poder calorífico.

### **1.3.2.6 Determinación de potencial energético por modelación matemática**

La cuantificación de la energía presente en los residuos del proceso de extracción de aceite de palma se determina mediante el desarrollo de un modelo matemático que involucra la relación que existe entre la masa de residuo seco ( $M_{rs}$ ) y la energía del residuo por unidad de masa ( $E$ ) también conocida como Poder Calorífico Inferior (PCI). Los modelos matemáticos para evaluar el potencial energético de la biomasa se fundamentan en que la energía contenida en su materia es proporcional a su masa seca, y se plantea teniendo en cuenta las variables más significativas que intervienen en él, detallando como se relacionan dichas variables y cuál es el comportamiento de cada una de ellas, ajustando a su vez las unidades necesarias para la estimación del poder energético de la biomasa (Serrato y Lesmes, 2016). En la ecuación 1-1 se expresa la relación existente entre las variables y se plantea un modelo matemático según lo establecido por la UPME, 2010:

$$PE = (M_{rs}) * (E) \quad (1-1)$$

Dónde:

$PE$  = Potencial Energético (TJ/Año)

$M_{rs}$  = Masa del residuo seco (ton/Año)

$E$  = Energía del residuo por unidad de masa (TJ/ton)

La energía del residuo es equivalente al llamado Poder Calorífico inferior (PCI), cuyas unidades son TJ/ton de residuo seco (Sheng y Azevedo, 2002). Teniendo en cuenta la ecuación 1-1 y las particularidades de la producción de cada residuo seco del sector agrícola, podemos realizar el aprovechamiento energético de la biomasa agrícola en procesos termoquímicos (Junfeng, et al., 2005).

Para estimar el potencial energético (PE) de la biomasa residual agrícola, es determinante considerar las hectáreas de producción correspondientes al área cultivada ( $A$ ), las toneladas de producto principal que ofrece cada hectárea sembrada ( $R_c$ ), las toneladas de residuo obtenidas de la producción principal ( $F_r$ ) y de esas toneladas de residuos "húmedos" a cuantas toneladas de residuo seco equivalen ( $Y_{rs}$ ). Por medio de estas variables se puede establecer la masa de residuo seco ( $M_{rs}$ ) como se muestra en la siguiente ecuación:

$$M_{rs} = A * R_c * M_{rg} * Y_{rs} \quad (1-2)$$

Dónde:

$M_{rs}$  = Masa de residuo seco (t/año)

$A$  = Área cultivada (ha/año)

$R_c$  = Rendimiento de Cultivo (t Producto Principal/ha Sembrada)

$M_{rg}$  = Masa de residuo generada del cultivo (t de residuo/ t de producto principal)

$Y_{rs}$  = Fracción de residuo seco (t residuo seco/t de residuo húmedo)

Este modelo de cálculo (ecuación 1-2) y los valores de PCI permiten dar la información necesaria para la toma de decisiones sobre la planeación de fuentes de energías térmicas que permitan puntos de partidas para proponer aprovechamientos energéticos (UPME, 2010). Es importante que los residuos contengan el menor porcentaje de humedad posible, y de esta manera obtener el mayor potencial energético (PE) posible de cada residuo en estudio (Serrato y Lesmes, 2016).

### **1.3.2.7 Procesos de conversión de la biomasa en energía térmica**

Con el fin de tener un criterio para la selección tanto de los procesos como de las tecnologías a utilizar, a continuación, se hace una breve descripción de las principales tecnologías aplicadas en la utilización de la biomasa como fuente de energía térmica.

En los procesos de generación térmica, la biomasa con mayor potencial de utilización en Colombia son los residuos de bosques madereros, los de la agroindustria como, palma africana, caña de azúcar (bagazo), arroz, café, maíz, plátano y flores, también los cultivos energéticos del futuro tales como gramíneas de rápido crecimiento ricas en celulosa para la producción de alcohol de segunda generación y otros combustibles. Para el uso de la biomasa, en la mayoría de los casos es importante realizar una etapa de adecuación física, seguida por la etapa del proceso y finalmente la disposición o uso de los residuos (Quintero y Quintero, 2015)

La combustión de biomasa se considera un proceso neutro en el balance de CO<sub>2</sub> ya que durante el crecimiento la planta almacena energía y carbono tomados del ambiente, los cuales son liberados durante el proceso de combustión (IEA, 2012).

### **1.3.2.8 Etapas de preparación y conversión de la biomasa**

En los procesos industriales hay exigencias comunes para lograr mayor eficiencia como tener tamaños físicos manejables de la materia prima y un alto poder calorífico por volumen (alta densidad energética). Para el caso de residuos de cosechas agrícolas como el tallo y la espiga de arroz, gramíneas, pastos, ramas de árboles y/o cualquier otra biomasa de baja densidad, la biomasa se somete a un pre-secado, seguido de altas presiones para la

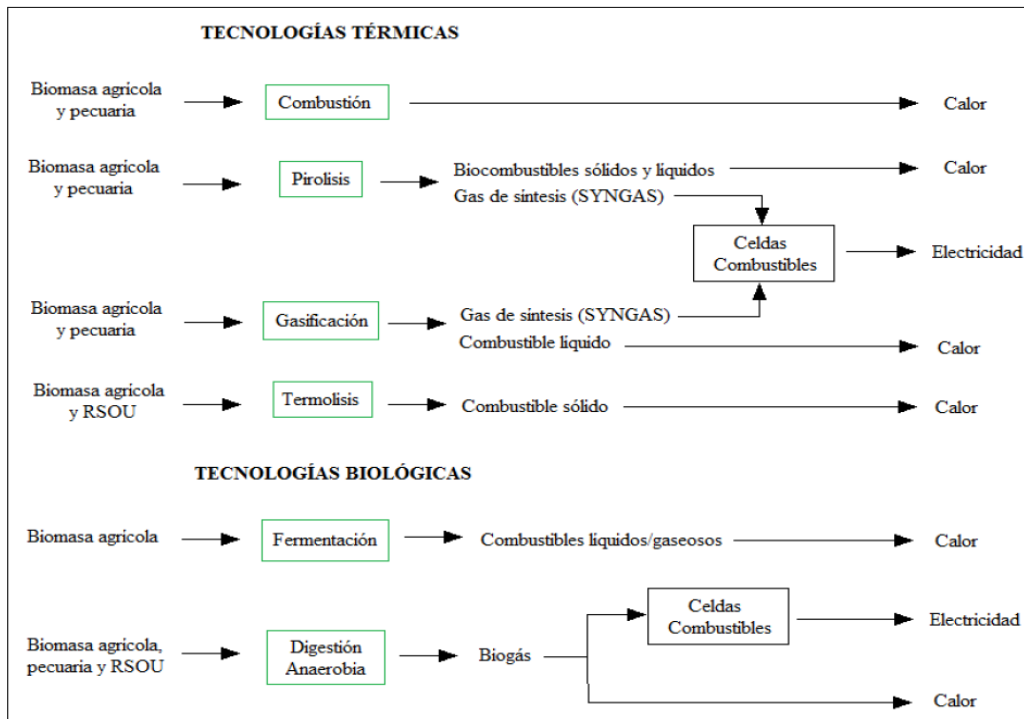


formación y densificación de las mismas con mejores propiedades. Cuando la biomasa a procesar son ramas o desechos de madera, es importante reducirlos a un tamaño uniforme por medio de limpieza y cortes adecuados. Otros desechos de maderas como aserrín se pueden utilizar directamente, pero las virutas si es importante densificarlas (Corpoema, 2010).

La combustión es la forma más antigua y más común, hasta hoy, para extraer la energía de la biomasa, por ende, es la de mayor aplicación y se encuentra en desarrollo permanente. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad (Energiza, s.f.). La oferta comercial de plantas de combustión es alta y hay multitud de opciones de integración para plantas de pequeñas y de gran escala. La tecnología de combustión se viene implementando constantemente a fin de mantener su competitividad frente a otros procesos como los de gasificación y pirolisis. Por razones económicas y medio ambientales la combustión de biomasa es una de las opciones que ha recibido mayor interés en el mundo (UPME, 2010).

Los procesos que suelen aplicarse para la conversión de la biomasa en energía; suele convertirse la biomasa en combustibles, bien sea líquidos, sólidos o gaseosos, usando procesos de conversión como se muestra en la figura 1-5. Con estos se genera biocombustibles y biogás, los cuales pueden reemplazar los combustibles fósiles en algunas aplicaciones. Para la transformación de la biomasa a otro tipo de energía se debe tener en cuenta las propiedades propias de cada uno de los residuos a los cuales se les pueda aplicar un determinado proceso de transformación (Energiza, s.f.).

Figura 1-5: Procesos de conversión de la biomasa



Fuente: UPME, 2010.

### 1.3.2.9 Procesos termoquímicos de la biomasa

Los procesos de conversión termoquímica utilizan calor como fuente de transformación de la biomasa para obtener subproductos con alto valor energético, como vapor y gases combustibles. Estos pueden ser utilizados posteriormente que permiten la generación de energía eléctrica o pueden ser utilizados como fuentes de calor directos para satisfacer necesidades de energía térmica (REN21, 2014) Entre los procesos termoquímicos se encuentran:

**Combustión o quema directa:** La combustión directa consiste en la obtención de energía mediante la combustión de la biomasa, principalmente residuos de la industria primaria, secundaria y terciaria forestal. La biomasa como combustible es quemada en una caldera en la cual se produce vapor, este viaja hacia la turbina debido a una elevación de presión. Al llegar a la turbina permite que exista un movimiento en ella, es decir existirá una energía mecánica, produciendo un movimiento en el generador eléctrico, para finalmente obtener energía eléctrica. El proceso de combustión directa es el más utilizado y antiguo para

---

generación de energía con biomasa, y también es el método más económico. En el caso de generación de energía térmica, sólo requiere de una fuente para la obtención de biomasa y una caldera para la combustión; en cuanto a eficiencia, para la generación de energía eléctrica se encuentra entre el 15 a 38% y para el caso de generación térmica se encuentra por encima del 70% (Gómez, et al., 2004).

**Combustión directa con cogeneración:** Esta tecnología es similar al proceso de combustión directa, pero en lugar de generar únicamente energía térmica también se produce electricidad, mediante la utilización de turbinas que aprovechan el vapor generado en la caldera, con un rango de potencia en general menor a 250 MW; en cuanto a la eficiencia en la conversión, ésta depende del tipo de energía generada, sin embargo, al cogenerar la eficiencia se encuentra cercana al 80% (UPME, 2010).

**Gasificación:** La gasificación es un proceso térmico en ausencia de oxígeno. Convierte la materia prima sólida o líquida en una mezcla de gases (H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>) llamado biogás, y después de obtener el biogás se utiliza en plantas para la generación de electricidad. El poder calorífico que se obtiene del biogás se encuentra entre 14 y 19 MJ/m<sup>3</sup>. La gasificación puede ser interpretada como un proceso de pirolisis que busca maximizar la fracción de gas como producto del proceso. Como ejemplo, es posible obtener carbón activado, briquetas combustibles, gas de síntesis, combustibles y energía eléctrica. Los tipos básicos de reactores que se emplean en estos procesos se clasifican en reactores de lecho fijo, móvil y fluidizado (Miranda y Amaris, 2009).

**Pirolisis o termólisis:** El proceso de pirolisis consiste en romper las moléculas orgánicas, generando gasificación de los compuestos fácilmente degradables a través de un calentamiento directo o indirecto o igualmente; descompone térmicamente los recursos en ausencia de oxígeno para generar unidades más simples como el carbono. La pirolisis utiliza calor indirecto para convertir los materiales sólidos orgánicos en gases y sólidos con alto contenido de carbón. La conversión se lleva a cabo en una cámara de reacción donde el aire, es decir, el oxígeno está totalmente excluido. Dentro de la cámara las temperaturas llegan hasta 400°C o 500°C. El producto resultante de este proceso es un gas combustible principalmente compuesto por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>), que puede utilizarse para la obtención de calor o electricidad en motores a combustión con potencias

hasta 10 MW y eficiencias de 60-70%, o en turbinas a gas con eficiencias superiores y mediante ciclos combinados de alta eficiencia. El poder calorífico del gas se obtiene es de 8 a 15MJ/m<sup>3</sup>, y el carbón vegetal resultante posee un poder calorífico de 25 a 30 MJ/kg (Serrato, y Lesmes, 2016).

### **1.3.2.10 Combustión de la leña**

La combustión es una reacción físico-química donde se desprende gran cantidad de calor y luz por medio de oxidación exotérmica. En esta reacción existe un elemento que arde (combustible) y otro que produce la combustión (comburente, materiales orgánicos que contienen carbono e hidrógeno); el segundo generalmente se encuentra en forma de O<sub>2</sub> gaseoso (Ramírez y Taborda, 2014).

El proceso no es del todo eficiente (combustión incompleta), al generar residuos inquemados o “humus” algunos de los cuales son: el CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono); H<sub>2</sub>O (agua), SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre (si el combustible contiene azufre)) y NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno) que depende de la temperatura de reacción; H<sub>2</sub> (hidrogeno gaseoso); C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> (hidrocarburo); H<sub>2</sub>S (ácido sulfúrico) y C (carbón). Para iniciar la combustión es necesario alcanzar una temperatura mínima, llamada temperatura de ignición, en °C y a 1 atm. Mientras más lento sea el proceso de combustión, a temperaturas elevadas (alrededor de 400°C), se genera lo que se conoce como doble combustión, o combustión completa, que representa mayor aprovechamiento del poder calórico del combustible y menor consumo del mismo, con menores residuos. Las propiedades de combustión en biomasa están relacionadas con propiedades físicas de la madera como la densidad, la porosidad y la superficie interna. Los valores de las propiedades térmicas como calor específico, conductividad térmica y emisividad varían con el contenido de humedad y la temperatura. La leña se caracteriza por su estructura química, donde los componentes principales son: hemicelulosa, resina, lignina, celulosa y agua. En el proceso de combustión la lignina se transforma principalmente en carbono fijo; los otros compuestos se liberan como elementos volátiles. La composición química de la madera seca es: 43 % de carbono (C), 7 % de hidrógeno (H) y 49 % de oxígeno (O) (Cerdá, 2012; Ramírez y Taborda, 2014).

### 1.3.2.11 Densificación de la biomasa

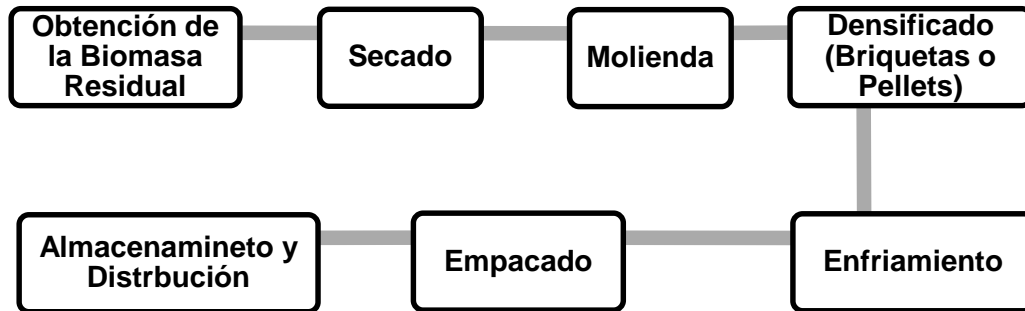
Según García (2014a), hay varios objetivos que se buscan con los procesos de densificación de biomasa dentro de los cuales se tiene:

- Disminuir el tamaño del grano (trituradora, molino, etc.), para obtener un producto de mejor consistencia y propiedades.
- Disminuir los costes del transporte generado por el traslado de biomasa a granel.
- Almacenamiento más eficiente.
- Reducción de las pérdidas de biomasa.
- Dar valor agregado a las fuentes alternativas como apoyo al ingreso de la pequeña industria colombiana.

Estos procesos de densificación requieren de un pretratamiento de la materia prima, con el fin de obtener un porcentaje de humedad del 9% al 12% que se destina principalmente para la densificación de pellets y entre el 10% y el 15% se destina para la elaboración de briquetas, ahora, los tamaños de partícula que se requiere son de aproximadamente 1,6 mm para pellets y de 13mm a 19mm para la fabricación de briquetas. Para los diferentes procesos de densificación de biomasa se deben tener en cuenta los factores que influyen en el proceso siendo la humedad el factor más relevante. Esta propiedad no se debe eliminar completamente de las fibras de biomasa ya que esta ayuda a la aglutinación al momento de realizar la densificación. También realiza la función del lubricante disminuyendo la fuerza de aplicación y reduciendo el desgaste de la matriz en el proceso de extrusión de briquetas (García, 2014a).

De igual forma, los productos densificados de biomasa residual requieren de un proceso de compresión y compactación que se puede realizar de modo artesanal o industrial, y permiten aumentar su densidad y modificar sus propiedades fisicoquímicas para obtener un combustible de características más eficientes y de fácil almacenamiento (Cabrales, 2016). En la siguiente Figura se muestra el diagrama de flujo del proceso de densificación de la biomasa.

Figura 1-6: Proceso de densificación de la biomasa.



Fuente: El autor, Adaptado de Carrasco, 2008

### 1.3.2.12 Contexto de la biomasa de palma africana en la zona norte del departamento del Cesar

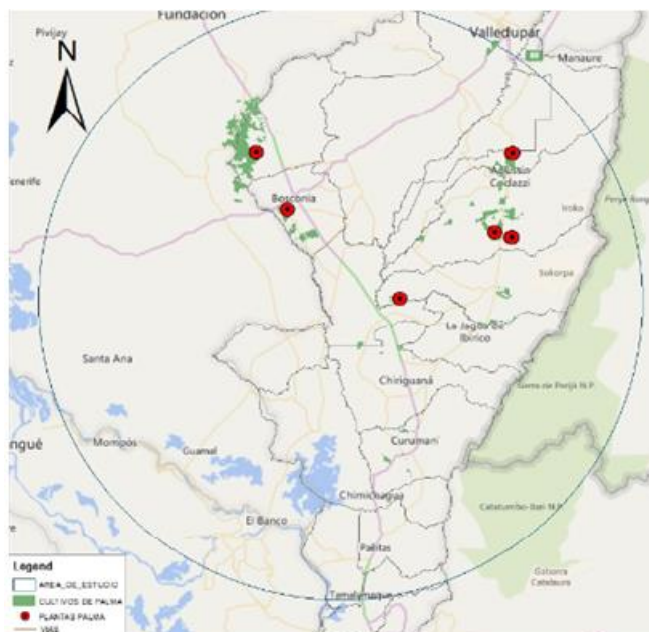
Actualmente una de las principales problemáticas en las plantas extractoras de aceite de palma africana es la acumulación de cantidades considerables de residuos sólidos o Biomasa, que dificultan en algunos casos los procesos internos de las empresas; por ello, es importante tener en cuenta la densificación de la biomasa los cuales pueden ser productos potenciales que ayuden a las empresas y además a las zonas rurales aledañas en cuanto a la sustitución del combustible tradicional que es la Leña por estos materiales densificados (García et al. (2010).

Los principales renglones económicos de la zona norte del Cesar son el agropecuario del que deriva un 30% de sus ingresos. El cultivo y procesamiento de palmas oleaginosas y otros productos agrícolas alcanzan altos niveles de tecnificación y desarrollo. Cesar es el primer productor nacional semilla de palma africana, y son alrededor de 6 las principales plantas de beneficio para el procesamiento de racimos de frutos frescos (RFF) de palma africana que se encuentran en la zona norte del departamento (figura 1-7) (Gobernación del Cesar, 2016).

Según datos del Anuario estadístico de Fedepalma (2015a), la producción en esta zona de aceite de palma crudo superó las 1.100.000 toneladas para 2014, lo que muestra una variación del 7% en comparación con lo alcanzado en 2013. Esta tasa de crecimiento fue sobresaliente en la medida en que superó al promedio anual del último quinquenio, que se

ubicó en 5,3%. En cuanto al comportamiento regional, todas las zonas mostraron incrementos interanuales, principalmente la Suroccidental que obtuvo un aumento del 28% en la producción de aceite crudo de palma, lo que puede explicarse por el ingreso de hectáreas improductivas a su fase de producción, como consecuencia del proceso de renovación del cultivo que se presenta en la zona. La producción de almendra de palma mostró una variación del 6% interanual, con 14.600 toneladas adicionales a las reportadas en 2013. En la dinámica por zonas, sobresalió la zona Norte al obtener la mayor participación del periodo con el 36% del total. En este sentido, es importante resaltar que la Zona Norte alcanzó el mayor rendimiento con 4 t/ha, superó el promedio nacional, mantuvo el comportamiento sobresaliente que exhibió en 2013 (3,7 t/ha), y evidenció un incremento de 3%.

Figura 1-7: Plantaciones de palma africana al norte del departamento del Cesar



Fuente: El autor. Adaptado de Google Maps.

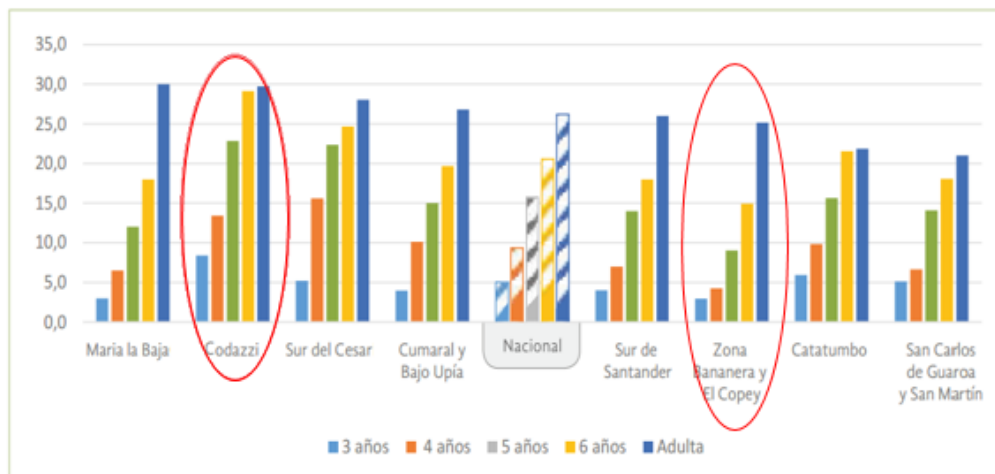
El cultivo de palma africana en su etapa de procesamiento de RFF genera alrededor de 95 millones de toneladas de racimos de fruta fresca, con un estimado de generación de residuos sólidos del 41% por cada tonelada t de RFF en donde se generan en promedio el 22 % Raquis, 14% de Fibra y el 5% cuesco, que equivale más o menos a 39 millones de toneladas de residuos sólidos producidas solo por Malasia en el año 2013, según datos

reportados por Ramírez, et al. en el 2015. Para el caso de Colombia se procesaron 4,99 millones de toneladas de RFF que equivalen a cerca de 9,5 millones de toneladas de residuos sólidos para el mismo año. (Fedepalma, 2014).

A nivel nacional la producción y por ende el procesamiento de RFF ha venido en aumento en los últimos 5 años, lo que es un panorama favorable para la zona norte del departamento del Cesar, ya que esta zona del país ha presentado el rendimiento por hectárea más alto de todas las zonas con 3,6 t/ha. De igual forma, se procesaron para el año 2016 unas 500 mil toneladas de RFF en las plantas de beneficio, lo que genera alrededor de 900 mil toneladas de residuos sólidos (raquis, fibra y cuesco) que pueden ser aprovechados en esta zona del departamento (Fedepalma, 2016).

Sin embargo, se muestran inicialmente algunos datos de promedios de producción donde se observa que las productividades promedio en palma adulta de las empresas ubicadas en las subzonas de María La Baja, Codazzi, Sur del Cesar y Cumaral - Bajo Upía, están por encima del promedio nacional. Es de recordar que este promedio corresponde al de las empresas que adoptan tecnologías adecuadas para el manejo del cultivo de la palma en sus respectivas áreas de influencia, y que, por ende, ocupan los primeros lugares en lo que concierne a productividad de la palmicultura colombiana (Mosquera, et al. 2016).

Figura 1-8: Promedio de productividad de subzonas en comparación con el promedio nacional



Fuente: Mosquera, et al. 2016

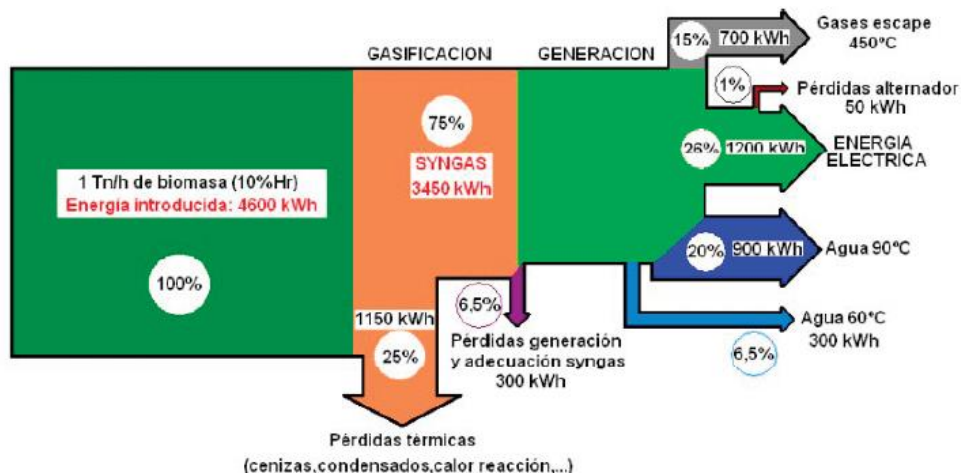




Con este proceso se obtienen un balance energético muy positivo, ya que la energía neta contenida en ella es superior a la gastada en la obtención del cultivo y en los procesos de obtención de biocombustible. De igual medida, permite que las personas de zonas rurales no tengan que usar la leña como combustible y, por ende, se puede fomentar una mejor calidad de vida y desarrollo local. Del mismo modo, la presencia de un componente ambiental bastante interesante, en el sentido de que por sí mismo el proceso de extracción de energía de esta fuente permite la eliminación de residuos sólidos que de otra forma son considerados en algunos casos basura, alimentando rellenos sanitarios.

A continuación, se presenta un balance básico de un modelo de gasificación de Biomasa que es adaptable a las condiciones en zonas rurales de la investigación.

Figura 1-10: Balance de energía de un proceso de gasificación



Fuente: Arévalo, 2015.

A pesar que es proceso de gasificación se presenta para una industrial palmera convencional, es importante destacar que estos procesos de gasificación generan emisiones neutras debido a que las emisiones de dicho proceso no representan un factor contaminante al encontrarse en un ciclo renovable; es decir, cuando la biomasa libera CO<sub>2</sub> a la atmosfera, esto no es más que la devolución al medio del CO<sub>2</sub> que fue tomado por la planta durante su crecimiento, por lo que, si se hiciera un balance anual de dicho ciclo, éste sería neutro. Adicionalmente, las emisiones no contienen contaminantes sulfurados o nitrogenados, lo cual es muy amigable con el medio ambiente.

De igual forma desde el punto de vista ambiental se puede realizar un comparativo con un proceso de combustión convencional.

Tabla 1-3: Comparativo ambiental de la combustión y gasificación

COMPUESTO	COMBUSTIÓN	GASIFICACIÓN
<b>C</b>	CO <sub>2</sub> (sin valor energético)	CO (con Valor Energético)
<b>H</b>	HO (sin valor energético)	H <sub>2</sub> (con valor energético)
<b>N</b>	NO, NO <sub>2</sub> (reducen capa de ozono)	NH <sub>3</sub> /N <sub>2</sub> (elimina lavado húmedo)
<b>S</b>	SO <sub>2</sub> /SO <sub>3</sub> (lluvia acida)	COS, H <sub>2</sub> S (se convierte en S solido)
<b>AGUA</b>	H <sub>2</sub> O (sin valor energético)	H <sub>2</sub> (con valor energético)
<b>CENIZAS</b>	Cenizas volantes se mezclan con caliza y forman residuos	Cenizas volantes y escorias se comercializan

Fuente: Miranda y Amaris, 2009.

Es evidente en el comparativo ambiental que la gasificación es un proceso de aprovechamiento tecnológico mucho más eficiente debido a que realiza una combustión completa, y con menos generación de gases de efecto invernadero. Además, proporciona valores energéticos que pueden ayudar a las actividades convencionales de la comunidad en zona rural en comparación con combustibles tradicionales como la leña. Del mismo modo, puede generar un valor agregado para las cenizas las cuales se pueden comercializar.

Tabla 1-4: Comparativo tecnológico desde la perspectiva de la combustión

COMBUSTIÓN	GASIFICACIÓN
Temperatura de operación desde 300 °C hasta 1200°C, para los distintos tipos de residuo	Temperatura de operación superior a 800°C.

Eficiencia de destrucción alta, sujeta a un control estricto.	Eficiencia de destrucción completa.
Una humedad alta del residuo afecta a los requerimientos de energía. (Indispensable realizar pretratamiento para mejorar eficiencia energética).	El proceso no se ve afectado por el contenido de humedad del residuo, ya que se inyecta aire durante el proceso.
Requiere un estricto control para la remoción de dioxinas y furanos (si se trabaja en calderas, si son estufas convencionales los residuos van al ambiente) contenidos en los residuos o formados en la destrucción de residuos.	La atmósfera reductora evita la formación de dioxinas y furanos, y por la alta temperatura son destruidos totalmente.

Fuente: Miranda y Amaris, 2009.

Con la gasificación se obtiene un combustible que puede ser empleado en una amplia variedad de aplicaciones con equipos convencionales diseñados para gases combustibles debidamente adaptados, de manera que es posible transportarlo a una cierta distancia del lugar de generación. Si el objetivo es producir vapor o electricidad, el rendimiento termodinámico global utilizando un gas sintético, que se expanda en motores térmicos, que se expanda en motores térmicos tras una combustión y aproveche la energía sobrante en los gases calientes para producir vapor, es muy superior en la gasificación que en la combustión (Miranda y Amaris, 2009).

Independiente de la tecnología aplicada el aprovechamiento debe realizarse teniendo en cuenta la disponibilidad de los residuos y así poder optimizar los procesos, y además generar fuentes no convencionales de energía que permitan a personas en zonas rurales dejar la leña a un lado y utilizar fuentes de energía eficientes que les ayuden con sus actividades diarias y con ello puedan disminuir la deforestación en esta zona del país, y que sirva como preámbulo para diversificar la canasta energética actual en la zona de estudio.

### 1.3.3 Marco Legal

Por medio de la entrada en vigencia de la **Ley 697 de 2001**<sup>1</sup> donde se declara el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, fundamental para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales. Se genera un punto de partida para diversificar la canasta energética como se muestra a continuación:

Figura 1-11: Uso racional y eficiente de la energía (URE)



Fuente: El autor.

---

<sup>1</sup> LEY 697 DE 2001. Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. Bogotá – Colombia.

Por medio del artículo tercero establece a la Biomasa como cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico y toda materia vegetal originada por el proceso de fotosíntesis, así como de los procesos metabólicos de los organismos heterótrofos. De igual forma, en el artículo 7 da estímulos para la investigación donde el Gobierno Nacional propenderá por la creación de programas de investigación en el Uso Racional y Eficiente de la Energía a través de Colciencias, según lo establecido en la Ley 29 de 1990 y el Decreto 393 de 1991.

La **Ley 1665 de 2013**<sup>2</sup> por medio de la cual el congreso de la república de Colombia aprueba el "ESTATUTO DE LA AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES (IRENA)", hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009.

La Agencia promoverá la implantación generalizada y reforzada y el uso sostenible de todas las formas de energía renovable, teniendo en cuenta:

- a) Las prioridades-nacionales e internas y los. beneficios derivados de un planteamiento combinado de energía renovable y medidas de eficiencia energética, y
- b) la contribución de las energías renovables a la conservación del medio ambiente al mitigar la presión ejercida sobre los recursos naturales y reducir la deforestación, sobre todo en las regiones tropicales, la desertización y la pérdida de biodiversidad; a la protección del clima; al crecimiento económico y la cohesión social, incluido el alivio de la pobreza y el desarrollo sostenible; al acceso al abastecimiento de energía y su seguridad; al desarrollo regional y a la responsabilidad intergeneracional.

---

<sup>2</sup> Ley 1665 de 2013. Por medio de la cual se aprueba el "ESTATUTO DE LA AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES (IRENA)", hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009. Bogotá – Colombia.

Del mismo modo, con la creación de la **Ley 1715 de 2014**<sup>3</sup> se tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las *fuentes no convencionales de energía*, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético.

Figura 1-12: Fuentes no convencionales de energía



Fuente: El Autor.

Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda. La finalidad de la presente ley es establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de

---

<sup>3</sup> LEY 1715 DE 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético. Bogotá – Colombia.

carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda, en el marco de la política energética nacional. Igualmente, tiene por objeto establecer líneas de acción para el cumplimiento de compromisos asumidos por Colombia en materia de energías renovables, gestión eficiente de la energía y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, tales como aquellos adquiridos a través de la aprobación del estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena) mediante la **Ley 1665 de 2013**.

En este sentido la *ley 1715* define por medio de su artículo 5 a la Energía de Biomasa como Energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que se basa en la degradación espontánea o inducida de cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico y toda materia vegetal originada por el proceso de fotosíntesis, así como de los procesos metabólicos de los organismos heterótrofos, y que no contiene o hayan estado en contacto con trazas de elementos que confieren algún grado de peligrosidad.

A partir de los retos que tiene el país, se recomienda gestionar estrategias en busca de generar las condiciones necesarias para el mejoramiento de la eficiencia productiva de la agroindustria en el aprovechamiento de biomasa residual, de una manera económica, social y ambientalmente sostenible, a través de los incentivos que promueve la ley como:

- Fomentar la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda.
- Crear incentivos tributarios, arancelarios y de participación en el mercado energético para las personas o empresas que desarrollen alternativas de generación de energía por medio de los recursos renovables.
- Diversificar el sistema energético actual en cuanto a las fuentes usadas para a la generación de la energía y promueve la inversión en tecnologías renovables.
- Incentivar la economía y minimiza los conflictos ambientales causados por la dependencia actual del país de las fuentes de energía a base carbón y petróleo.



## **2. Capítulo 2**

### **2.1 Justificación**

El aprovechamiento de la Biomasa Residual para generación de energía, se ha venido incrementando en los últimos años por la necesidad de encontrar fuentes alternas a los combustibles tradicionales que se utilizan actualmente. Esta necesidad va enfocada y direccionada a cumplir con las limitaciones de sobre la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) que se derivan del protocolo de Kyoto.

Del mismo modo, la tendencia en el consumo internacional y nacional de recursos de origen fósil, el incremento de precios de estos combustibles y la aparición de nuevas legislaciones que favorecen la utilización de las energías renovables como la ley 1715 de 2014 en la cual establece para Colombia promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, y en concreto, al fomento de la energía generada a partir de recursos residuales sólidos, que promueven el aprovechamiento energético de estos recursos de diferentes fuentes para la producción de energía, en especial en zonas con tradición de uso de leña como combustible.

En este contexto mundial en el que el 81% del total de la energía consumida proviene de fuentes fósiles y tan solo un 19% de fuentes renovables, durante los últimos 30 y 40 años se ha venido desarrollando una etapa de transición hacia el aprovechamiento de estas últimas con el fin de reducir la dependencia de energéticos fósiles de precios ampliamente

volátiles, disminuir las emisiones de efecto invernadero producidas por el sector energético y contribuir así a la mitigación del cambio climático (UPME, 2015a).

En ese sentido, reducir los riesgos ocasionados por la dependencia de las fuentes energéticas poco amigables con el medio ambiente se hace determinante, y se debe avanzar en la realización de inventarios del potencial de fuentes renovables, la evaluación del desempeño de sus aplicaciones y la determinación de las condiciones óptimas para su aprovechamiento, que coadyuven decididamente a satisfacer las necesidades de la población y permitan un ritmo sostenido de crecimiento económico. (UPME, 2010).

Es por ello, que el uso de la biomasa residual agrícola cobra importancia actualmente como una fuente no convencional de energía, debido a la obligación en la mitigación del impacto ambiental por parte de las empresas generadoras y la dependencia de combustibles tradicionales como la leña, la cual representa en la matriz energética nacional una demanda interna del 5% y que ha propiciado problemas de deforestación en algunas zonas del país. En la actualidad, en promedio cada persona y cada familia emiten 6,09 y 29,8 kg/día respectivamente, en un lapso de 7:51"  $\pm$  20" horas, según Ramírez et al. (2015).

De igual forma, el uso de la leña como combustible según Mejía (2011) ha generado no solamente afectaciones ambientales, sino enfermedades a la población rural debido a la exposición a altas cantidades de CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, derivados en su mayoría por la quema en estufas ineficientes y sin sistemas de ventilación adecuados, causantes de afectaciones en vías respiratorias, asma, irritación en garganta y ojos.

Por consiguiente, la agroindustria de palma africana se muestra como una alternativa al consumo de leña, debido a sus grandes volúmenes de residuos sólidos (raquis, fibra y cuesco), que según datos reportados por la UPME (2015a) se han generado alrededor de 2 millones de toneladas, y además por el hecho de dar un valor agregado a los subproductos de esta industria donde lo que era llamado residuo se convierta en algo útil como la generación de energía amigable con el medio ambiente.

De igual forma, según Ramírez, et al. (2015) estos residuos sólidos en las plantas de beneficio son considerados por el sector palmero como una estrategia de

aprovechamiento, que permitiría obtener beneficios adicionales, creación de nuevas fuentes de ingreso, acceso a nichos de mercado especializado y mejorar aspectos de la disposición de residuos de esta agroindustria.

Tabla 1-3: Residuos sólidos potenciales para nuevos usos

<b>Unidades</b>		<b>% / RFF</b>	<b>Cantidad (t)</b>
<b>Residuos Sólidos Generados</b>	<b>Raquis</b>	22	110.932,58
	<b>Fibra</b>	12	60.508,68
	<b>Cuesco</b>	5	25.211,95
<b>Residuos Sólidos Potenciales para nuevos Usos</b>	<b>Raquis</b>	15,21	76.694,75
	<b>Fibra</b>	2,78	14.017,84
	<b>Cuesco</b>	1,59	8.017,40

Fuente: El autor. Adaptado de Ramírez, et al., 2015.

Es así, como el departamento del Cesar se muestra como una alternativa energética debido a que cuenta con más de 86.500 hectáreas sembradas de palma africana, de las cuales el 80% se encuentran en etapa de producción. El incremento en la producción sigue en aumento y solo en relación a lo establecido entre 2014 y 2017 se han generado un incremento del 20% en el procesamiento de RFF (Fedepalma, 2017). Esto es panorama alentador debido a que solo la zona norte del departamento se procesaron alrededor 500 mil toneladas de RFF, de las cuales el 42% p/p corresponden a residuos sólidos que pueden ser aprovechados para fines energéticos (Fedepalma, 2016). Con esta perspectiva se hace ideal evaluar las fuentes alternas de energía térmica, debido a las buenas características energéticas que presentan los residuos como raquis, fibra y cuesco que se encuentran entre 16 – 19 kJ/kg. Además, es importante tener en cuenta que la producción de estos residuos es constante durante todo el año, lo que permite las empresas palmaras se convierten en un aliado estratégico que contribuye activamente al desarrollo social-ambiental de la región.

Es por ello, que existe la necesidad de evaluar el potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales como alternativa energética en reemplazo de la leña en el departamento del Cesar, con el fin de aprovechar esta biomasa no solamente en las plantas de beneficio de palma, sino también contribuyendo a que estos residuos se conviertan en materia prima combustible renovable para las poblaciones aledañas en sus actividades convencionales, favoreciendo el cumplimiento de emisiones neutras de CO<sub>2</sub>, y que esto conlleve a dar un aporte al desarrollo energético sostenible de este territorio.

## **2.2 Objetivos**

### **2.2.1 Objetivo General**

Evaluar el potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar.

### **2.2.2 Objetivos Específicos**

- Diagnosticar la disposición y características fisicoquímicas de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana en el sector que impacta la zona de estudio.
- Determinar la formulación adecuada para la densificación de los residuos sólidos agroindustriales de palma, con el fin de aprovechar mejor sus características térmicas.
- Analizar las condiciones óptimas de aprovechamiento de los residuos sólidos agroindustriales para identificar potencialidades en la producción de energía eficiente y en la sustitución de combustibles como la leña.

## 2.3 Materiales y Métodos

### 2.3.1 Localización

El Cesar es uno de los 32 departamentos de Colombia. Está situado en la zona noreste del país, posee una extensión de 22.905 km<sup>2</sup> y una población de 1.166.420 habitantes. Situado en la parte nororiental del país, Cesar limita al norte con los departamentos de La Guajira y Magdalena; por el sur, con Bolívar, Santander y Norte de Santander; y por el este, con Norte de Santander y la República Bolivariana de Venezuela. Sus coordenadas son 07°41'16" y 10°52'14" de latitud norte y 72°53'27" y 74°08'28" de longitud oeste. El Cesar es un departamento que desde sus inicios siempre ha tenido su trascendencia en el ámbito agropecuario en donde su economía se establece que deriva un 30% de sus ingresos, el de servicios con el 35% y la minería con el 27% de los mismos. La ganadería vacuna ocupa un lugar de primer orden, con una población estimada en 1.513.149 cabezas (Gobernación del Cesar, 2016). Actualmente el departamento maneja un cultivo de Palma Africana el cual según datos de Fedepalma (2015b) tenía una producción de aceite de palma crudo que alcanzó las 281.000 toneladas lo que equivale al 22% de la producción Nacional, con un área sembrada del 68.511 ha, siendo el Cesar el primer productor nacional semilla de palma africana.

Figura 2-1: Cultivo de palma africana en la zona norte del departamento del Cesar



Fuente: SISPA - Fedepalma, 2016.

A partir de este potencial de palma africana en el departamento se dispuso a evaluar el potencial energético de los residuos sólidos del proceso de extracción de aceite de palma africana, específicamente de Raquis, Fibra y Cuesco en la parte norte del departamento del Cesar. La investigación se centra en las 6 plantas extractoras de la zona norte del departamento las cuales se discriminan a continuación y además se muestran por medio de la tabla 2-1.

Tabla 2-1: Plantas de beneficio de la zona norte del departamento del Cesar

Departamento	Municipio	Planta de Beneficio
CESAR	Agustin Codazzi	Extractora Sicarare S.A.S.
		Palmas Oleginosas de Casacara Ltda.
	Bosconia	Extractora Palmariguani S.A.
	El Copey	Palmeras de la Costa S.A.
	El Paso	Palmagro S.A.
	La Paz	Oleoflores S.A.

Fuente: El autor.

### **2.3.2 Enfoque de investigación**

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo donde se realizó una recolección de información primaria y secundaria con proyección fundamentada en la toma, medición, comparación y análisis de datos, que para el caso de la investigación se dio a partir de la obtención de muestras de residuos sólidos (raquis, fibra y cuesco) de palma africana.

### **2.3.3 Tipo de investigación**

La investigación realizada es de tipo *correlacional* debido a que se evaluó la relación e interacción entre variables de forma controlada, con la finalidad de analizar y determinar la relación o grado de asociación que existe entre las otras variables de estudio (Hernández, et al. 2016), que para la investigación fue aprovechar los residuos sólidos de palma africana (raquis, fibra y cusco) bajo las variables de disposición, características fisicoquímicas y energéticas, en reemplazo de la leña como combustible tradicional en zonas rurales.

### **2.3.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de información**

Se recolecto información primaria, la cual se documentó por medio de una entrevista corta realizada a las empresas procesadoras de RFF de palma africana, debido a que es allí donde se generan los residuos sólidos agroindustriales que son del interés de la investigación. Igualmente, se entrevistó la corporación autónoma regional del Cesar para obtener información relacionada con la deforestación en esta zona del departamento y correlacionarla con la investigación.

La investigación de igual forma se enmarco en la recolección de información secundaria, la cual fue información extraída de las de Asociaciones de Palmicultores entre las cuales tenemos a Fedepalma, Cenipalma, Minagricultura, Minambiente y Corporaciones autónomas regionales, además se tomaron datos publicados de diferentes autores y entidades relacionadas.

### **2.3.5 Población**

El sector palmero de la zona norte del departamento del Cesar posee dos de las plantas extractoras de aceite de palma africana más grandes de la zona, las cuales son palmeras de la Costa y Oleoflores. Por ende, la población de estudio se centró en estas dos empresas, las cuales en conjunto para el 2016 procesaron más de 350.000 toneladas de RFF y es a partir de allí donde se generan las cantidades de residuos sólidos agroindustriales para la presente investigación los cuales son Raquis, Fibra y Cuesco. Las dos plantas de beneficio presentan la mayor cantidad de producción de la zona y que además tienen plantaciones no solo en el departamento sino en departamentos cercanos, lo que hace que los análisis sean mucho más representativos para la zona de estudio.

### **2.3.6 Muestra**

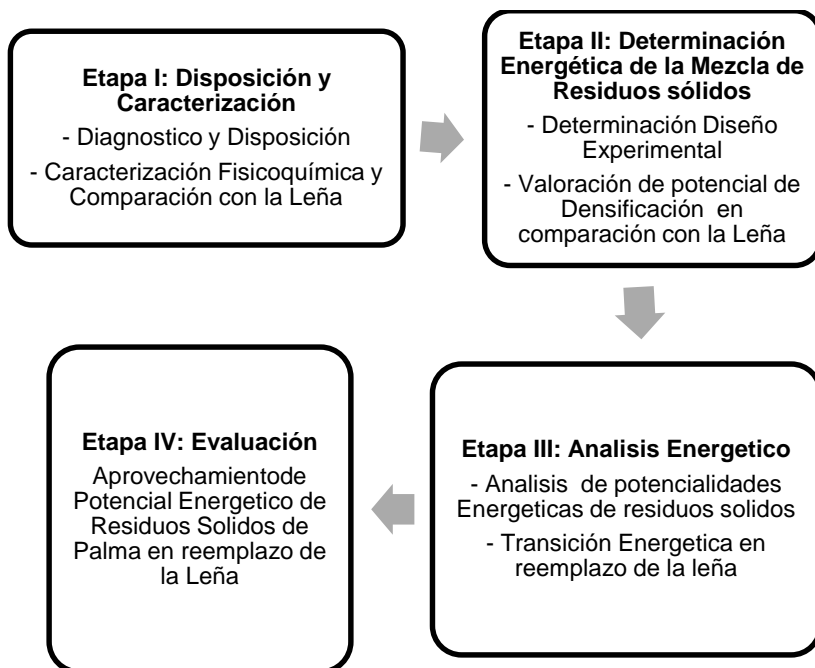
Se tomó una muestra uniforme y representativa de las plantas de beneficio de RFF en los puntos de generación del residuo los cuales son Raquis, Fibra y Cuesco. Para ello se tomaron 5 kg cada uno de los residuos, en las plantas de beneficio de Palmeras de la Costa ubicada en el municipio de Copey – Cesar y Oleoflores ubicada en el municipio de Codazzi – Cesar.

## **2.4 Etapas de la investigación**

Para el cumplimiento de los objetivos específicos y por ende el objetivo general se realizó un procedimiento gestado en Cuatro (4) etapas, las cuales llevan consigo una serie de actividades y tareas que se desarrollaron bajo una secuencia lógica que permite analizar de modo permanente la calidad de la información y que llevaron con esto a una mejor obtención de resultados. Para ello se presentan por medio de la siguiente Figura:

Figura 2-2: Diagrama de flujo de información metodológica





Fuente: El autor.

### 2.4.1 Etapa I: Disposición y Caracterización

Se realizó una correlación inicial de la producción, cosecha y rendimiento y de productos agroindustriales de la zona de estudio entre los años 2010 al 2015. La información con respecto al diagnóstico actual de los residuos sólidos de palma africana se efectuó a partir de información primaria la cual se obtuvo por medio de una encuesta a las plantas de beneficio de la zona norte del departamento del Cesar y por medio de información secundaria para el año 2016. El objetivo fue establecer las cantidades de producción y de residuos generados de raquis, fibra y cuesco en las plantas de beneficio de RFF y estimando la disposición correcta de los mismos.

De igual forma, se realizó un análisis inicial del contenido de humedad in situ, como parámetro inicial, con el fin de observar el contenido de agua de los residuos sólidos. También se establecieron las condiciones edafoclimáticas de desarrollo del cultivo y la cultura agrícola, para estimar la cantidad de residuo producido en la zona de estudio de la investigación, como lo plantea Miranda y Amaris, en el 2009. Del mismo modo, fue

indispensable realizar un protocolo de muestreo adecuado a las condiciones de los residuos sólidos de palma africana.

### 2.4.1.1 Protocoló de Muestreo

Este protocolo de muestro tiene como fundamento establecer el proceso adecuado para la toma de las muestras de residuos sólidos de Palma Africana (Raquis, Fibra, Cuesco). Para la determinación del protocolo de muestreo se tuvo en cuenta la norma internacional del Comité Europeo de Normalización (CEN). Se tomó la norma CEN/TS 14778-1:2007EX de biocombustibles sólidos; muestreo; métodos de muestreo, la cual establece un protocolo de muestreo específico para biocombustibles sólidos, como se muestra a continuación:

Figura 2-3: Protocolo de muestreo de residuos solidos



Fuente: El autor. Adaptado de Vilches, (s.f.)

A partir de la norma se estableció que para las biomásas dispuestas en pilas se debe tener en cuenta algunos factores críticos los cuales son los siguientes:

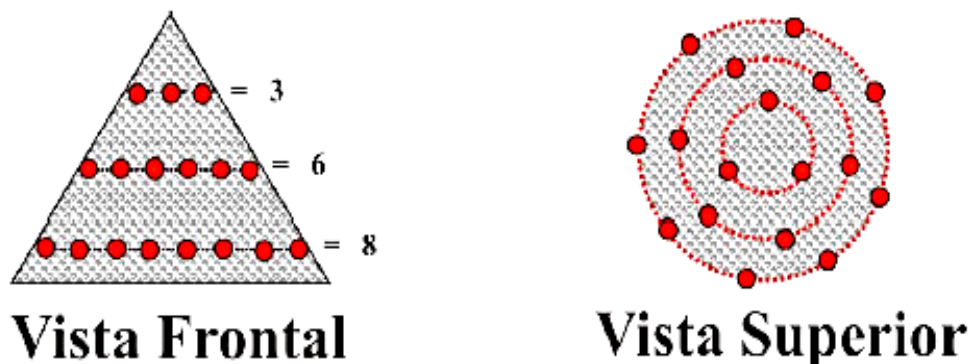
- Se tuvo en cuenta la segregación de los tamaños de partículas en las pilas.
- Existe una mayor susceptibilidad a la oxidación en la superficie que en el interior de la masa
- La humedad tiende a ser mayor hacia el interior de la masa.

Se tuvo en cuenta que cada uno de los instrumentos para la recolección recomendados para el proceso, que estuvieran en óptimas condiciones y además lo manifestado en la CEN/TS 14778-1:2007; del mismo modo, se revisaron los protocolos de muestreo del

laboratorio de carbones de la universidad nacional de Colombia sede Medellín, logrando desarrollar los siguientes pasos:

- Tomar las muestras de diferentes alturas de pila formada.
- Efectuar el muestreo alrededor de toda la pila.
- Tomar mínimo 17 muestras por pila de Biomasa en la Figura 2-4.
- Tomar una vez se haya formado la pila para evitar oxidación y segregación del carbón.

Figura 2-4: Distribución de los puntos de muestreo en una pila.



Fuente: Laboratorio de Carbones, (2016).

Se realizó la toma de muestras de raquis, fibra y cuesco en las plantas de beneficio de RFF de Palmeras de la Costa ubicada en el municipio Copey-Cesar y de Oleoflores ubicada en el municipio de Codazzi-Cesar. En cada planta se extrajo 5 kg de cada uno de los residuos sólidos. Tomadas las muestras, la composición de estas como tal no puede ser modificada, por ende, se empacó en materiales plásticos herméticos, debidamente rotulados, para que su composición no se modificara hasta la llegada al laboratorio para su caracterización.

#### 2.4.1.2 Caracterización fisicoquímica y energética de muestras

La caracterización del raquis, la fibra y el cuesco, se realizó en 3 laboratorios acreditados de Colombia los cuales fueron: laboratorio de carbones de la universidad nacional de Colombia sede Medellín perteneciente a la facultad de ingeniería de minas, donde se realizó el análisis próximo y se determinaron parámetros como: % Material volátil, % carbono fijo,

% cenizas y % humedad. En los laboratorios Dr. Calderón de la ciudad de Bogotá se realizó el análisis elemental determinando % carbono, % hidrogeno, % oxígeno, % nitrógeno y % azufre, además se obtuvo el análisis energético proporcionando datos como poder calorífico inferior (PCI) y poder calorífico superior (PCS), y en los laboratorios LasereX de la Universidad del Tolima ubicada en la ciudad de Ibagué se analizó la parte estructural donde se determinó % de Celulosa, % de lignina y % de hemicelulosa, además se determinó la composición de metales como potasio, sodio, calcio, magnesio, cobre, zinc, hierro, boro manganeso, fosforo y azufre; de igual forma un análisis básico de % humedad, % solidos totales, % grasa, % proteína y % fibra. Los datos respectivos de los laboratorios se parecían por medio del anexo 3. Los parámetros analizados fueron simplificados por la siguiente tabla:

Tabla 2-2: Parámetros de Caracterización de Biomasa Residual

<b>PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA Y ENERGÉTICA</b>					
<b>Análisis Básico</b>	<b>Análisis Próximo</b>	<b>Análisis Elemental</b>	<b>Análisis Estructural</b>	<b>Análisis Energético</b>	<b>Metales</b>
Humedad (%)	Material Volátil (%)	Carbono (%)	Celulosa (%)	Poder Calorífico Inferior (PCI) (KJ/Kg)	Potasio (%)
					Sodio (mg/Kg)
					Calcio (%)
Solidos Totales (%)	Carbono Fijo (%)	Hidrogeno (%)	Hemicelulosa (%)	Poder Calorífico Superior (PCS) (KJ/Kg)	Magnesio (%)
					Cobre (mg/Kg)
					Zinc (mg/Kg)
					Hierro (mg/Kg)
Grasa (%)	Cenizas (%)	Oxígeno (%)	Lignina (%)		Boro (mg/Kg)
					Manganeso (mg/Kg)
Proteína (%)	Humedad (%)	Nitrógeno (%)			Fósforo (%)
Fibra (%)		Azufre (%)			Azufre (%)

Fuente: El autor. Adaptado de Miranda y Amaris, 2009

Por otra parte, se selecciona un combustible fósil tradicional (leña), para que sea comparada con los datos obtenidos de la caracterización de los residuos sólidos de manera que se puedan establecer comparaciones de los poderes caloríficos y la capacidad térmica de los materiales para ser empleados en la combustión de diferentes procesos.

### 2.4.2 Etapa II: Determinación energética de la mezcla de residuos sólidos

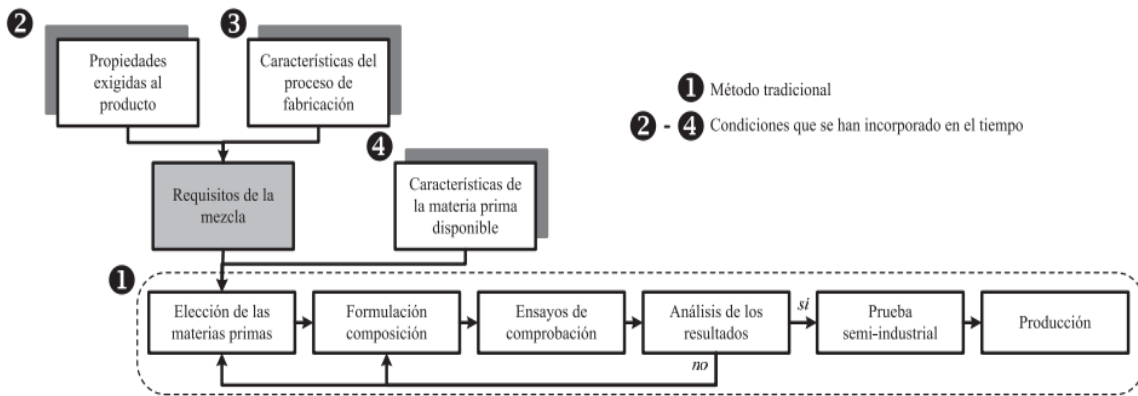
Se realizó un *diseño experimental de mezclas*, que radica en tener  $q$  componentes o ingredientes, y consiste en un conjunto de experimentos en los que se prueban combinaciones particulares o mezclas de dichos ingredientes. En este sentido, si se denotan por  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_q$ , las proporciones en las que participan los componentes de la mezcla deben satisfacer dos restricciones:

$$0 \leq x_i \leq 1 \quad (2-1)$$

$$\sum_{i=1}^q x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1 \quad (2-2)$$

Donde la primera indica que las proporciones tienen que ser cantidades entre cero y uno, y la segunda condiciona a que las  $q$  proporciones sumen siempre la unidad, lo cual causa que los niveles de los componentes  $X_i$  no sean diferentes de los diseños de experimentos factoriales y de los diseños de superficie de respuesta usuales Ortega, et al. (2014).

Figura 2-5: Estructura del diseño experimental de mezclas



Fuente: Ortega, et al. 2015.

Una vez modelada la respuesta, se puede cuantificar la influencia que tienen los diferentes componentes sobre la respuesta, tanto en forma individual como en su acción conjunta con otros componentes. En este caso, se establece un diseño Simplex-Centroide que consiste de  $2^q - 1$  corridas en todas las mezclas primarias, mezclas binarias, mezclas terciarias, etc., hasta el diseño centroide. El diseño centroide es calculado por:

$$\left(X_1 = \frac{1}{q}, X_2 = \frac{1}{q}, \dots, X_q = \frac{1}{q}\right) \quad (2-3)$$

El objetivo de utilización de este diseño de experimento de mezcla fue cuantificar la influencia que tienen los diferentes componentes sobre la respuesta, tanto en forma individual como en su función conjunta de componentes, y así predecir la respuesta en cualquier formulación posible y utilizar los modelos con el propósito de mejores resultados (eficacia).

Toda esta información se analizó por medio del programa estadístico Statgraphics Centurion XVI, en el cual se estudió los efectos de 3 componentes (raquis, fibra y cuesco) en 40 corridas con los experimentos completamente aleatorizados (ver anexo 4), donde la variable de respuesta está enfocada en maximizar el poder calorífico de la mezcla de modo que se puedan utilizar de la mejor manera los residuos a disposición y que se genere la mayor producción de energía térmica con las características analizadas del raquis, la fibra y el cuesco. De igual forma, se compara la leña con los valores energéticos de mezcla generados para determinar las potencialidades reales que se tienen para una posible

transición energética en reemplazo de la leña en esta zona del país y establecer comparaciones de los poderes caloríficos y la capacidad térmica de los materiales para ser empleados en la combustión de diferentes procesos.

### **2.4.3 Etapa III: Análisis energético**

En el análisis energético se determinó la cantidad de energía disponible en cada residuo, esto es de suma importancia y un pilar en la investigación debido a que a partir de la determinación del poder calorífico se puede inferir la cantidad de energía que pueden liberar (al reaccionar el carbono con el oxígeno para generar combustión) y cómo ésta energía se puede expresar en modo de calor (Joule por Kilogramo (J/Kg) o Calorías por Gramo (Cal/G). De igual forma, se correlaciono la información energética obtenida de las etapas I y II, con los parámetros de la leña como combustible teniendo en cuenta la disposición y los efectos al ambiente por los volúmenes de consumo. Así mismo, se realizó un análisis de viabilidad económica por medio de la herramienta de evaluación rápida BEFS establecida por la FAO en 2014, para definir las alternativas de utilización de la mezcla de residuos sólidos (raquis, fibra y cuesco) en remplazo de la leña como combustible fósil tradicional.

### **2.4.4 Etapa IV: Evaluación**

Por último, se determinaron las cantidades y el número de hogares de zona rural que consumen leña como combustible, además de los medios y frecuencias de consumo, y se compararon con los de la mezcla de la biomasa residual de palma teniendo en cuenta: el poder calorífico, energía consumida y la cantidad de leña que puede ser sustituida. De igual forma, se estimaron las tecnologías de aplicación desde la planta de beneficio de RFF con producción de densificados hasta otras un poco más avanzadas como la gasificación, como medio de optimización energética.

## 3. Capítulo 3

### 3.1 Resultados y Discusión

#### 3.1.1 Disposición de residuos sólidos agroindustriales

Con el propósito de conocer las áreas cultivadas en la zona de estudio, se obtuvo información representativa del uso actual que se le está dando a la tierra según lo expuesto por el Agronet (2016), teniendo en cuenta lo relacionado con el cultivo de palma africana y comparándolo con otros cultivos de la zona. A continuación, se presentan los valores de área sembrada, cosechada, producción y rendimiento de cultivos entre los años 2010 y 2015:

Tabla 3-1: Disposición y producción de distintos cultivos del departamento del Cesar

<b>Cultivos</b>	<b>Área sembrada, cosechada producción y rendimiento</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>
<b>Arroz</b>	Área cosechada (h)	31	4245	18122	17480	12886	16113
	Producción (t)	204	51944	95904	86850	64821	<b>85896</b>
	Rendimiento (t/h)	6,59	12,2	5,3	5,0	5.03	5,3
<b>Café</b>	Área cosechada (h)	22490	22350	22911	25107	26138	25949



	Producción (t)	13276	11036	19994	15050	16935	<b>22241</b>
	Rendimiento (t/h)	0,6	0,5	0,9	0,6	0,65	0,86
<b>Caña Panelera</b>	Área cosechada (h)	3767	3389	3327	3353	3499	3498
	Producción (t)	16517	14844	15825	13143	20071	<b>20164</b>
	Rendimiento (t/h)	4,4	4,4	4,8	3,9	5,74	5,76
<b>Palma Africana</b>	Área cosechada (h)	35623	39199	40746	44922	45022	60556
	Producción (t)	130800	142350	147950	155449	155789	<b>203867</b>
	Rendimiento (t/h)	3,7	3,6	3,6	3,5	3,9	3,4

Fuente: Agronet, 2016.

Como se puede observar en la tabla 3-1, la producción de palma africana en el departamento viene en aumento lo que es de suma importancia, debido a que es allí donde se generan los residuos sólidos agroindustriales de importancia para la investigación, en donde al año 2015 se tenía una producción de 203.867 t/año.

De igual forma, a partir de la información obtenida por medio de encuesta realizada a las plantas de beneficio en la zona y la consulta en fuentes secundarias, se obtuvo el resultado de la cantidad de residuos sólidos agroindustriales generados, para lo cual se usaron los factores de producción de residuos sólidos agroindustriales reportados por la UPME por medio del desarrollo del atlas de biomasa (UPME, 2010) en la zona norte del departamento del Cesar. De igual forma, la información reportada se encuentra de modo general para la zona, debido a que son datos confidenciales de las empresas y de los cuales no se permiten su divulgación.

Tabla 3-2: Producción de residuos sólidos agroindustriales de palma África

<b>Cultivo</b>	<b>Producción (t/año)</b>	<b>Tipo de Residuo</b>	<b>Factor de Residuo<sup>4</sup> (t residuo/t Producto Principal)</b>	<b>Masa del Residuo (t/año)</b>
Palma Africana	*504.239	Cuesco	0,22	110.932,58
		Fibra	0,63	317.670,57
		Raquis	1,06	534.493,34

\*cantidad de producción de RFF en la zona norte del Dpto. del Cesar a corte de 2016.

Fuente: Elaboración propia

Los datos de cantidades de residuos sólidos agroindustriales no son nada despreciables si tomamos en cuenta que para 1 tonelada de producción (del producto principal que es el aceite de palma) se producen 1,91 t de masa de residuo sólido en las plantas de beneficio, específicamente puntualizando en lo que refiere a Raquis, Fibra y Cuesco que son los residuos de interés de la investigación.

Sin embargo, es un potencial generoso si tenemos en cuenta que solo para la producción de la zona norte en el año 2016 tendríamos a disposición 963.096,49 t de residuos sólidos agroindustriales que pueden ser aprovechados desde las perspectivas energéticas, como se muestra en la tabla 3-2.

### **3.1.2 Caracterización fisicoquímica de los residuos sólidos agroindustriales**

El análisis de humedad in situ de las muestras de raquis, fibra y cuesco arrojó que el contenido de humedad de los residuos era del 13% para el cuesco, 65% para la tusa y del 39% para la Fibra, es importante destacar que estos valores iniciales se tomaron para analizar las condiciones necesarias para realizar una mejor preservación de las muestras analizar en el laboratorio.

---

<sup>4</sup> Tomado del factor de residuos desarrollado por la UPME (2010) por medio del atlas de Biomasa (2010), donde se relaciona las toneladas de residuo con las toneladas de producto principal.

Como el contenido de humedad era alto para la conservación adecuada de las muestras, se realizó un pretratamiento que consistía en la disminución de la humedad y de tamaño a las muestras por medio de una molienda a fin de tener residuos sólidos mucho más homogéneos y manejables. Los residuos sólidos proporcionaron humedades que se encontraban en rangos del 6 – 8%, los cuales son ideales para ser los trabajos de laboratorio necesarios para la investigación.

### 3.1.2.1 Análisis elemental

A través del análisis elemental realizado en los laboratorios Dr. Calderón de la ciudad de Bogotá, se pudo determinar la composición de Carbono, Hidrogeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre, los cuales son de mucha importancia para conocer la cantidad de aire u oxígeno que es necesario para introducir en la combustión del combustible. En la tabla 3-3 se presentan los valores del análisis elemental de las muestras tomadas en las plantas de beneficio de Palmeras de la Costa y Olefiores de la zona norte del departamento del Cesar y se comparó con los resultados de estudios realizados.

Tabla 3-3: Análisis elemental de los residuos sólidos de palma de africana comparados con los datos de otros autores

Parámetro	El Autor			García, et al. 2016			Abdullah, et al. 2011	Vassilev, et al. 2010	
	Raquis	Fibra	Cuesco	Raquis	Fibra	Cuesco	Raquis	Fibra	Cuesco
<b>Carbono (C) %</b>	46,47	49,62	50,79	47	44	50	48,9	51	51,5
<b>Hidrogeno (H) %</b>	6,22	6,18	5,91	NR	NR	NR	6,3	6,6	6,6
<b>Oxígeno (O) %</b>	42,25	37,07	36,62	NR	NR	NR	36,7	39,5	40,1
<b>Nitrógeno (N) %</b>	1,12	1,68	0,8	0,6	1,9	0,4	0,7	1,5	1,5
<b>Azufre (S) %</b>	0,077	0,116	0,055	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3

Como se puede apreciar en la tabla anterior los valores del análisis elemental en comparación con otros análisis de Colombia y el mundo, poseen características muy

similares sobre todo en el contenido de Carbono lo que indica que puede ser un residuo sólido que podría ser aprovechado en diferentes actividades de producción de energía. El análisis elemental permitió conocer la cantidad de aire u oxígeno que es necesario introducir para la combustión del combustible. Los valores reportados por las investigaciones consultadas no difieren de los resultados de los análisis realizados en la investigación. Sin embargo, se aprecia que el contenido de azufre es casi nulo por ende es una ventaja respecto a otras biomásas utilizadas para la producción de energía.

Al comparar los resultados obtenidos con el análisis elemental, en relación con los resultados para las mismas variables de los combustibles tradicionales y los resultados entrados para las muestras correspondientes en el Cesar, se puede observar que el contenido de carbono de los residuos sólidos de palma son altos, pero no se comparan con los contenidos de los combustibles tradicionales, sin embargo teniendo en cuenta que la población mundial se encuentra en una transición hacia la utilización de fuentes alternas de energía, se podrían considerar los residuos de palma africana por sus condiciones fisicoquímicas amigables con el medio ambiente tal como se muestra en la tabla 3-4.

Tabla 3-4: Análisis elemental de residuos sólidos agroindustriales comparado con otros combustibles tradicionales

<b>Parámetro</b>	<b>*Raquis</b>	<b>*Fibra</b>	<b>*Cuesco</b>	<b>**LEÑA</b>	<b>**CARBÓN (Cesar-Guajira)</b>	<b>**CARBÓN GENÉRICO</b>
Carbono (C) %	46,47	49,62	50,79	53,45	78,98	58,67
Hidrogeno (H) %	6,22	6,18	5,91	6,88	5,50	4,80
Oxigeno (O) %	42,25	37,07	36,62	38,82	8,83	13,77
Nitrógeno (N) %	1,12	1,68	0,8	0,46	1,74	0,04
Azufre (S) %	0,077	0,116	0,055	0,02	0,65	1,51

Fuente: \*Análisis propios. \*\*Incombustion, 2016.

Las diferencias entre los parámetros analizados en la investigación con relación a lo reportado para los combustibles tradicionales como la leña, no muestran una diferencia significativa; sin embargo, para el caso de análisis del % azufre son menores a los de la leña, lo que indica que, al realizar la combustión de estos materiales, los residuos sólidos de palma tendrán menos efecto de emisiones contaminantes sobre el ambiente. De igual,

forma se presentan condiciones porcentuales de oxígeno muy parecidas a la de la leña con la excepción del Raquis que muestra cantidades un poco más elevadas que la de la leña, lo que técnicamente indica un consumo en la combustión un poco más acelerado.

### 3.1.2.2 Análisis próximo

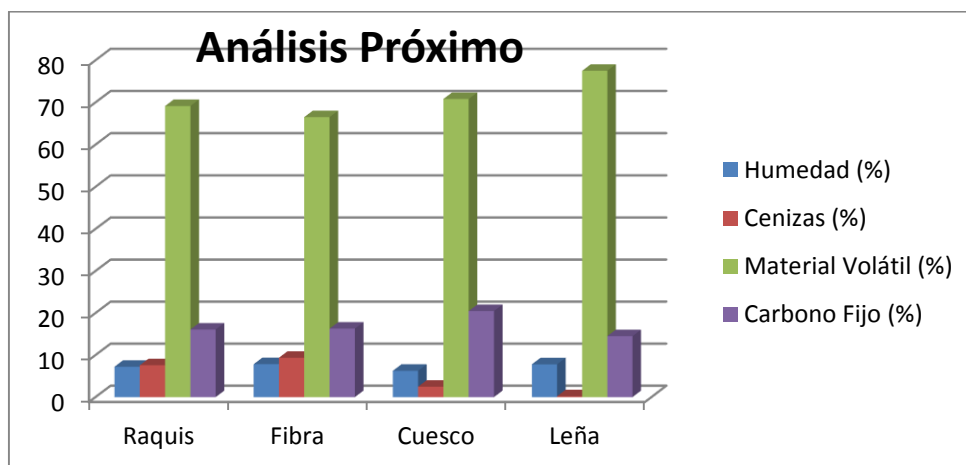
Se realizó el análisis próximo en el laboratorio de carbones de la universidad nacional de Colombia sede Medellín, con el fin de conocer las características de Carbono Fijo, Cenizas, Material Volátil y humedad que poseen los residuos sólidos de palma de aceite, y así con los datos poder disponer de elementos concretos sobre la resistencia y eficiencia en combustión de esta biomasa residual.

Tabla 3-5: Análisis próximo de los residuos sólidos de palma africana comparados con los datos de otros autores

Parámetro	El Autor			Incombustion, 2016		
	Raquis	Fibra	Cuesco	Raquis	Fibra	Cuesco
Humedad (%)	7,21	7,84	6,26	19,48	19,48	23,02
Cenizas (%)	7,58	9,36	2,47	7,2	18,07	7,79
Material Volátil (%)	69,14	66,51	70,80	76,28	70,48	79,24
Carbono Fijo (%)	16,07	16,29	20,47	16,52	11,05	12,97

Como se puede apreciar los contenidos de humedad son relativamente bajos, al igual que los contenidos de cenizas. Sin embargo, es evidente que los materiales volátiles se encuentran en altos porcentajes lo que es una característica ventajosa para las biomásas residuales sobre las fósiles convencionales y las hace ideal para procesos de combustión (Miranda y Amaris, 2009).

Figura 3-1: Análisis próximo de residuos sólidos de palma comparados con los de la Leña



Fuente: El autor.

Es importante tener en cuenta los datos del análisis próximo del combustible tradicional como la leña, los cuales no son muy diversos debido a la gran cantidad de tipo de leña utilizada como combustible, sin embargo, se realiza una comparación según los datos reportados por Vassilev, (2010) en su artículo publicado "Una visión general de la composición química de la biomasa". Por medio de los datos expuestos es claro que la leña posee características ideales para el uso en biorefinerías y en zonas rurales para cocción de alimentos debido a su muy bajo porcentaje de cenizas, de igual forma muestran contenidos de volátiles superiores al 65% lo que proporciona una indicación de su reactividad y facilidad de ignición que tienen los residuos sólidos de palma al igual que la leña.

Por otro lado, el contenido de carbono fijo es superior a los datos que nos suministra la leña como combustible, lo que da a entender que los residuos de palma contienen una cantidad de masa efectiva que puede quemarse como combustible después de la salida de volátiles mayor a la de la leña, proporcionando bases para la aplicación en procesos tecnológicos de combustión.

### 3.1.2.3 Análisis estructural

Este análisis se desarrolló en el laboratorio Laserex de la universidad del Tolima y se compararon con estudios recientes reportados por García, et al., en el año 2016, como se muestran a continuación:

Tabla 3-6: Análisis estructural de los residuos sólidos de palma africana comparados con los datos de otros autores

Parámetro	Autor			García, et. al., 2016		
	Raquis	Fibra	Cuesco	Raquis	Fibra	Cuesco
<b>Lignina (%)</b>	22,49	36,81	49,6	15	24	48
<b>Celulosa (%)</b>	42,34	27,99	9,6	43	30	26
<b>Hemicelulosa (%)</b>	15,3	7,48	4,51	21	21	19

Según este escenario podemos asegurar que los datos tomados para la investigación y comparados por datos de otras investigaciones y parámetros en el mundo son muy parecidos; es importante destacar que los porcentajes (%p/p) de Celulosa son menores a otros reportados lo que indica que estos residuos sólidos podrían ser usados como una alternativa a los combustibles convencionales.

Del mismo modo es importante comparar estos productos biomásicos en estudio con los de la leña, los cuales según estudios realizados en diferentes partes del mundo presentan los rangos más comúnmente encontrados son: Celulosa: 38-50%; Hemicelulosa: 23-32% y Lignina: 15-25% (Chaves et al., 2013).; en este sentido podríamos afirmar que a medida que los materiales biomásicos presenten más cantidad de lignina y menos de celulosa, mayor va ser el poder de generación de energía, debido a una mayor cantidad de enlaces Carbono – Carbono en sus estructuras moleculares.

### 3.1.2.4 Poder Calorífico

El poder Calorífico se determinó por medio de reportes del laboratorio Dr. Calderón de la ciudad de Bogotá.

Tabla 3-7: Poder calorífico de los residuos sólidos agroindustriales de palma africana comparados con los datos de otros autores

Parámetro	Autor, 2016			Gómez, et. al., 2008			*Incombustion, 2016 - **Osorio, 2013		
	Raquis	Fibra	Cuesco	Raquis	Fibra	Cuesco	Raquis	Fibra	Cuesco
<b>Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)</b>	15,87	17,42	18,50	17,9	18,4	22,2	20,09	18,40	18,66
<b>Poder Calorífico Superior (MJ/kg)</b>	17,14	18,68	19,71	16,9	17,1	21,1	8,16	19,20	21,44

\*Datos reportados para Poder Calorífico Inferior de raquis, fibra y cuesco.

\*\*Datos reportados para Poder Calorífico Superior raquis, fibra y cuesco.

Los datos de poder calorífico presentan valores semejantes a los reportados por otros autores, pero es evidente que para nuestro caso el cuesco es el que presentan valores superiores tanto para el poder calorífico superior como para el inferior, por ende, puede enfocarse como un punto de partida interesante para generar procesos para la generación de energías de fuentes no convencionales. Los resultados obtenidos en la caracterización de poder calorífico inferior tanto en Colombia como en Asia, coinciden mucho con los valores registrados por medio de los análisis expuestos por la investigación como se evidencia por medio de la tabla 3-8, sin embargo, como podemos observar los rangos son variables en distintas partes del mundo. Estas diferencias pueden asociarse a las variedades de especies vegetales, las condiciones edafoclimáticas en las cuales se desarrolla el cultivo y el manejo agronómico dado a los residuos (UPME, 2010).

Tabla 3-8: Poder calorífico de biomasa residual agrícola en Colombia y Asia

Parámetro	Unidad	Culping, et al. 2004 (Asia)	UPME, 2010 (Colombia)
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg	16,00 – 20,00	8,00 – 20,00

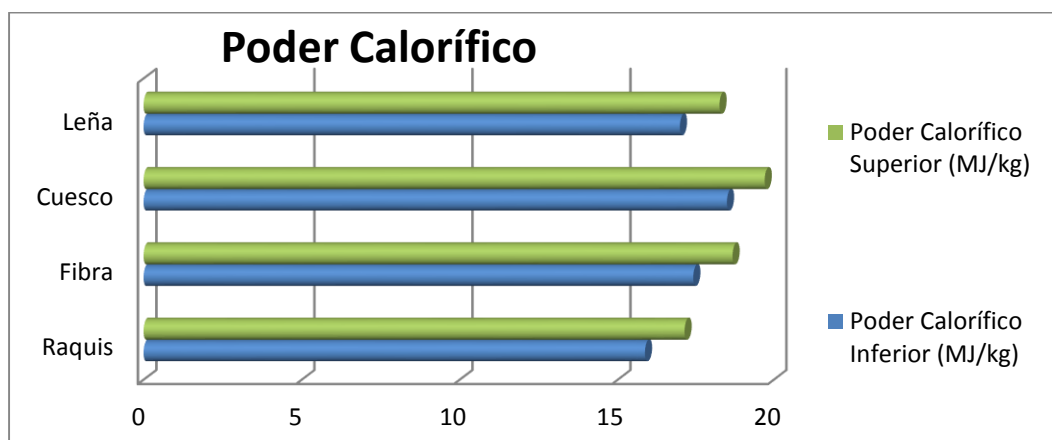
Fuente: UPME, 2010.

De igual forma, según los datos reportados por Incombustion en 2016, es claro que el poder calorífico de la leña es superior que los registrados por el raquis, pero es inferior en



el caso de la fibra y el cuesco tanto para el poder calorífico superior como inferior como muestra la figura 3-2. Si realizamos un comparativo con combustibles fósiles como el carbón, los cuales poseen un poder calórico de alrededor 26,8 KJ/g (Rojas, et. al. 2008; UPME, 2010).

Figura 3-2: Poder calorífico de los residuos de palma comparado con el de la leña como combustible



Fuente: El autor.

Identificando la finalidad de la investigación en el proceso de transición energética hacia fuentes no convencionales de energía que en este caso están direccionadas al aprovechamiento de los residuos sólidos de palma africana, es evidente que por el poder calorífico que proporcionan estos residuos pueden convertirse en una alternativa ideal para el reemplazo de la leña en diferentes actividades convencionales, ya que presenta condiciones similares a la del combustible actualmente utilizado que es la leña como se observa en la anterior figura.

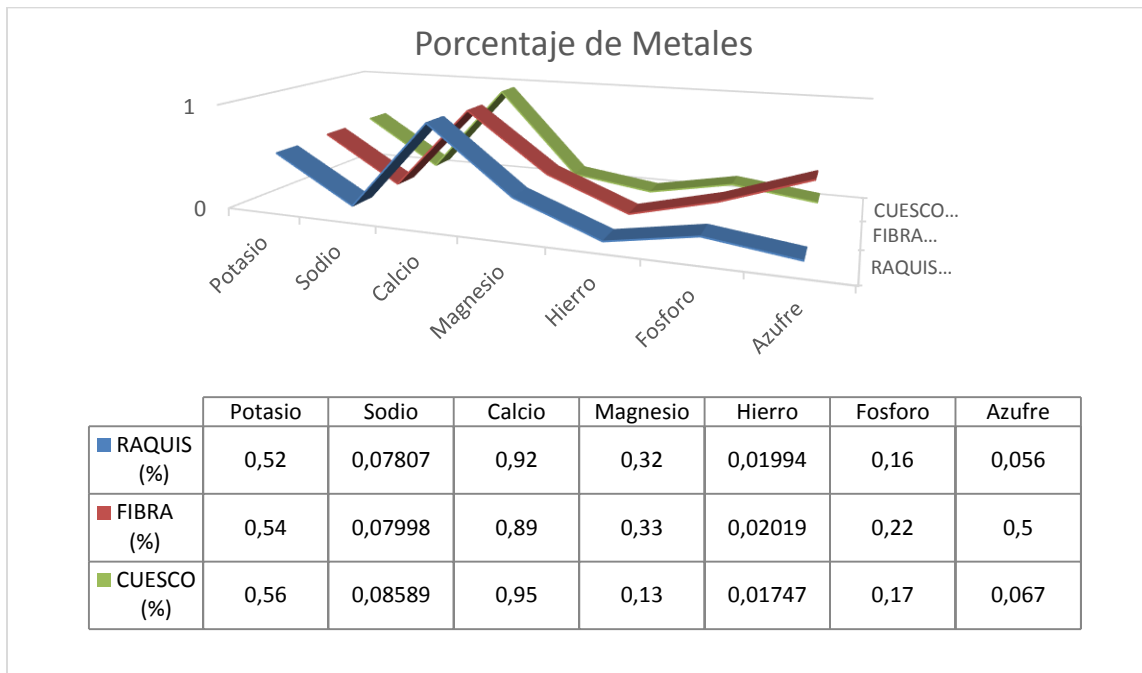
### 3.1.2.5 Análisis de Metales

La caracterización fisicoquímica de los compuestos metálicos de la biomasa residual de palma africana se realizó a partir de los contenidos de ceniza. Estos contenidos son variables, pero son un indicador importante si se tiene en cuenta que estos pueden ser utilizados en un escenario industrial. Es de analizar que estas propiedades metálicas son

importantes desde el punto de vista energético debido a la incidencia que tiene en la cantidad de biomasa realmente combustible.

Por lo tanto, se realizó un análisis comparativo de los residuos de palma solamente, teniendo en cuenta los resultados de la caracterización de metales que se muestra a continuación:

Figura 3-3: Contenido porcentual de metales de la biomasa residual de palma africana



Fuente: El autor.

Se presentaron valores de sustancias tales como potasio (K) y magnesio (Mg) en rangos bajos lo que disminuyen el punto de fusión de las cenizas, disminuyendo su depósito en ductos y otros elementos de las calderas, generando aislación y corrosión. De igual modo, con los valores reportados de calcio (Ca), se nos presenta como un indicador de aprovechamiento para las cenizas; el azufre (S), se presentan en muy mínimas cantidades (<0,5%) lo que es determinante para los procesos de combustión, debido a que producirá en cantidades muy mínimas de volátiles que pueden llegar a la atmosfera como gases de efecto invernadero perjudiciales para el ambiente.

Es importante establecer que la composición de metales de la leña como combustible es de igual forma muy variable y depende de la composición de especie, la edad, el tamaño y forma del residuo, por lo que un análisis para cada especie de leña utilizada en la zona de estudio no se justifica del punto de vista práctico.

### 3.1.2.6 Potencial Energético

Si tomamos en cuenta el potencial que puede generar una tonelada de residuos de palma africana y los comparamos con los resultados generados para una tonelada de producción de residuos sólidos y además con la producción de la zona de estudio para el año 2016, podemos observar la gran oportunidad de generar potencial energético de estos residuos según datos de la tabla 3-9.

Tabla 3-9: Potencial energético de residuos sólidos de palma africana

<b>Cultivo</b>	<b>Producción</b> (t/año)	<b>Tipo de Residuo</b>	<b>Factor de Residuo<sup>5</sup></b> (t residuo/t Producto Principal)	<b>Masa del Residuo</b> (t/año)	<b>Potencial Energético</b> (TJ/año)
Palma Africana	504.239	Cuesco	0,22	110.933	1.542
		Fibra	0,63	317.671	3.941
		Raquis	1,06	534.493	3.819
<b>Total</b>				<b>963.097</b>	<b>9.302</b>

Fuente: El autor.

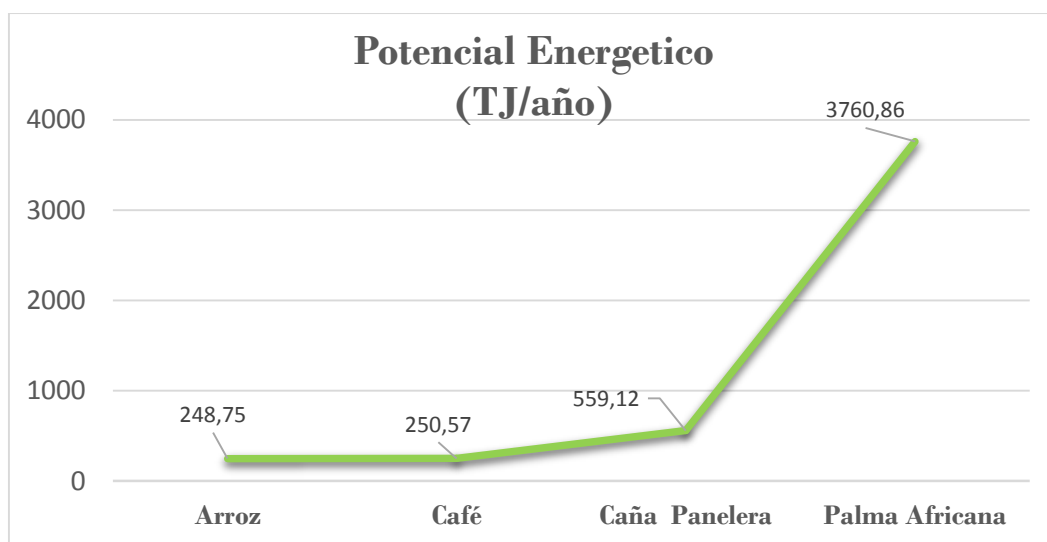
Es importante establecer que estos valores de potencial energético se calcularon a partir de los datos de la caracterización y los modelos matemáticos establecidos por UPME y publicados en el Atlas de Potencial de la Biomasa Residual en Colombia (2010). De igual forma, es importante tener en cuenta que solo para la zona de estudio se tiene un potencial energético de 9.302 TJ/año, lo que es una ventaja competitiva y de aprovechamiento para la zona. Según el Plan energético Nacional: ideario a 2050 (2015b), las cifras de producción de potencial energético del país de fuentes agrícolas y pecuarias sumaban

<sup>5</sup> Tomado del factor de residuos desarrollado por la UPME por medio del atlas de Biomasa (2010).

unos 448.410 TJ por año que representan aproximadamente un 28% de la demanda energética interna de todo el País y la UPME proyecta en el Plan de Expansión de Referencia 2014-2028 que se podrían adicionar al parque generador del país 191 MW de biomasa de palma.

Esto es de mucha importancia debido a que solo con la producción de residuos sólidos de la zona de estudio estaríamos generando 2,06% de la demanda energética de todo el país. De igual forma, si comparamos estos datos con algunos productos biomásicos de la región estipulados en la producción podemos evidenciar lo siguiente:

Figura 3-4: Potencial energético de productos agroindustriales en el Cesar<sup>6</sup>



Fuente: El autor.

Al comparar con otros residuos sólidos agroindustriales de interés de la zona de estudio, podemos apreciar que la actividad agroindustrial que genera más biomasa residual es el cultivo de palma africana por ende su cantidad de potencial energético aprovechable es mucho mayor debido al poder calorífico que presentan cada uno de los residuos sólidos que se encuentran en el rango de 15,8 – 18,5 MJ/kg, lo que conlleva desde el punto de

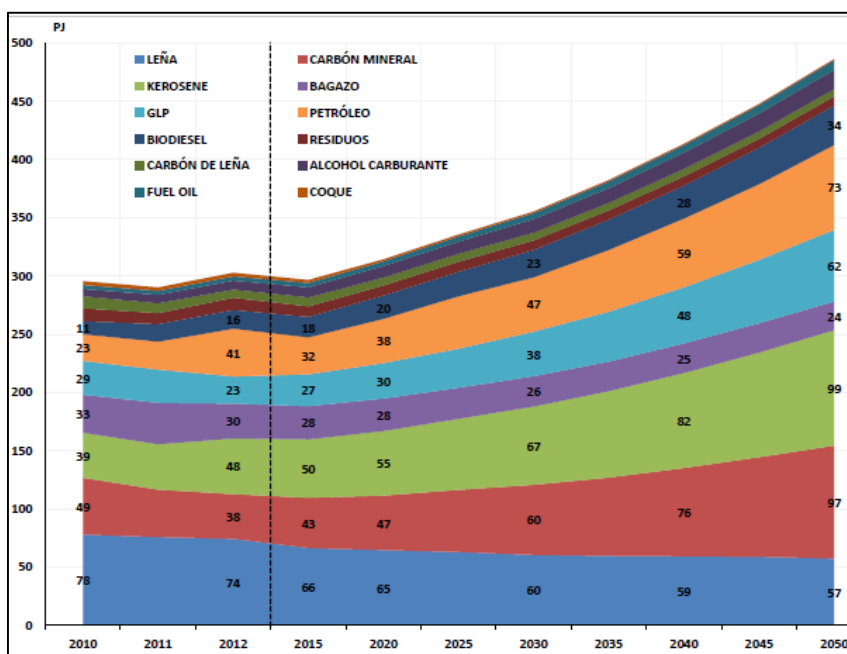
<sup>6</sup> Datos reportados a partir de la encuesta nacional agropecuaria (ENA) - DANE en el año 2016.

vista económico a minimizar los costos de combustibles para generación de energía térmica en procesos energéticos.

La diferencia es bastante clara debido a que el departamento del Cesar es el segundo productor de aceite de palma africana del país, y por ende la generación de residuos es alta al igual que es indispensable proveer estos residuos sólidos para procesos más integrados en la producción de energías renovables en el departamento. De igual forma, es una oportunidad para la transformación de estas biomasas en energía térmica, que permita reemplazar productos convencionales y de tradición como es la leña, y así reducir los índices de deforestación que actualmente se perciben en la zona de estudio.

Si estos datos los comparamos con el de consumo de leña a nivel nacional y las perspectivas de consumo a futuro, según el Plan energético Nacional: ideario a 2050 de la UPME (2015b), podemos observar que a futuro se busca la disminución del uso de la leña como combustible y se evidencia el aumento en la utilización de Residuos sólidos (entre ellos los de palma africana) como una alternativa amigable al medio ambiente y en pro de la disminución de los gases de efecto invernadero como se muestra en la siguiente figura.

Figura 3-5: Evolución de la demanda por otros energéticos – escenario base (PJ)



Fuente: UPME, 2015b.

De igual forma, la leña continúa utilizándose como una fuente de energía térmica fundamental sobre todo en zonas rurales, a pesar de los esfuerzos por reducir su consumo y optar por fuentes renovables de energía que presenten menos emisiones de CO<sub>2</sub>, como podría darse con los residuos sólidos de palma africana.

Según Aristizábal (2010), el consumo de combustibles leñosos ha fluctuado entre 1800 y 1900 millones de metros cúbicos en la última década a nivel mundial, no se tiene certeza de que porcentaje de las emisiones de dióxido de carbono corresponde a la utilización de leña para propósitos domésticos, solo se estima que más o menos el 17% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial son por actividades relacionadas con la deforestación a partir en la mayoría de los casos por prácticas domésticas tradicionales en el consumo de la leña como combustible.

### 3.1.3 Determinación energética de la mezcla de residuos sólidos agroindustriales

#### 3.1.3.1 Diseño y optimización de la mezcla

Los resultados muestran la correlación que permite establecer la variable respuesta con relación al porcentaje de residuo sólidos a disposición en las plantas de beneficio de RFF. El libro de datos se encuentra consignado en el anexo 4. Por medio de la base de entrada de datos se realizaron las corridas, y se establece como variable respuesta el poder calorífico. Para ello el modelo considera valores porcentuales máximos y mínimos de cada uno de los residuos, tal como se muestra en la tabla 3-12.

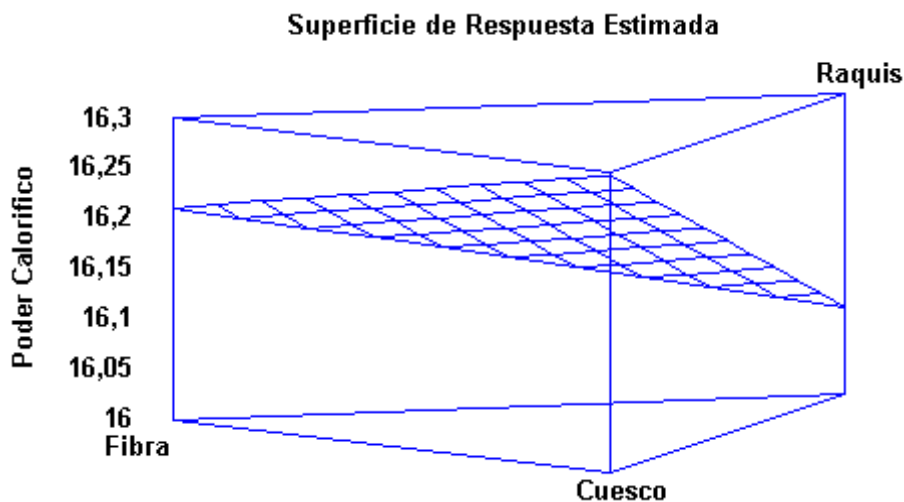
Tabla 3-10: Porcentaje máximo y mínimo de disposición de residuos sólidos

<b>Factor</b>	<b>Bajo (%)</b>	<b>Alto (%)</b>	<b>Óptimo (%)</b>
<b>Raquis</b>	78,0	86,0	78,0
<b>Fibra</b>	14,0	22,0	14,0
<b>Cuesco</b>	0,0	8,0	8,0

Fuente: El autor.

De igual forma, se establecen que los valores de respuesta en relación entre el poder calorífico y la composición de la mezcla fue estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95 %.

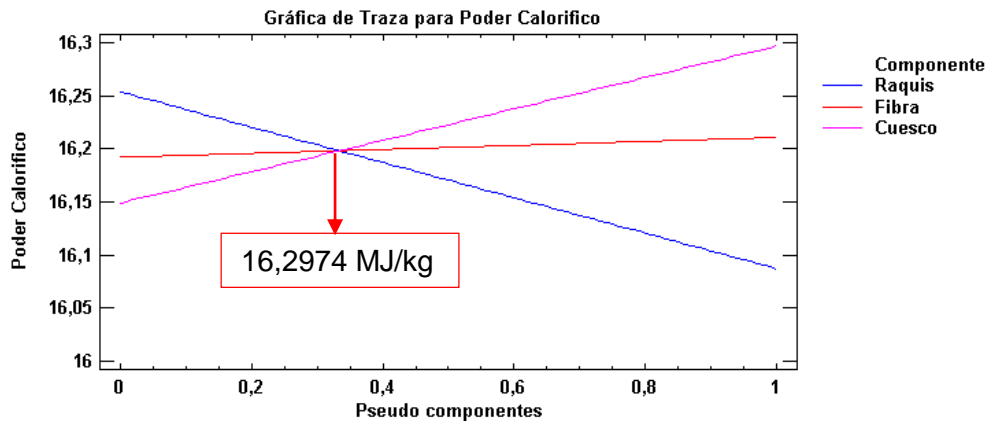
Figura 3-6: Superficie de respuesta del diseño experimental de mezcla



Fuente: El autor.

Se puede definir el óptimo de los tratamientos presentados está dado por la utilización en la mezcla en el 78% para el raquis, 14% para la fibra y el 8% para el cuesco. Esta información es correlativa con la disposición debido a que el raquis es el residuo de mayor producción en las plantas de beneficio de RFF.

Figura 3-7: Grafica de traza para el poder calorífico



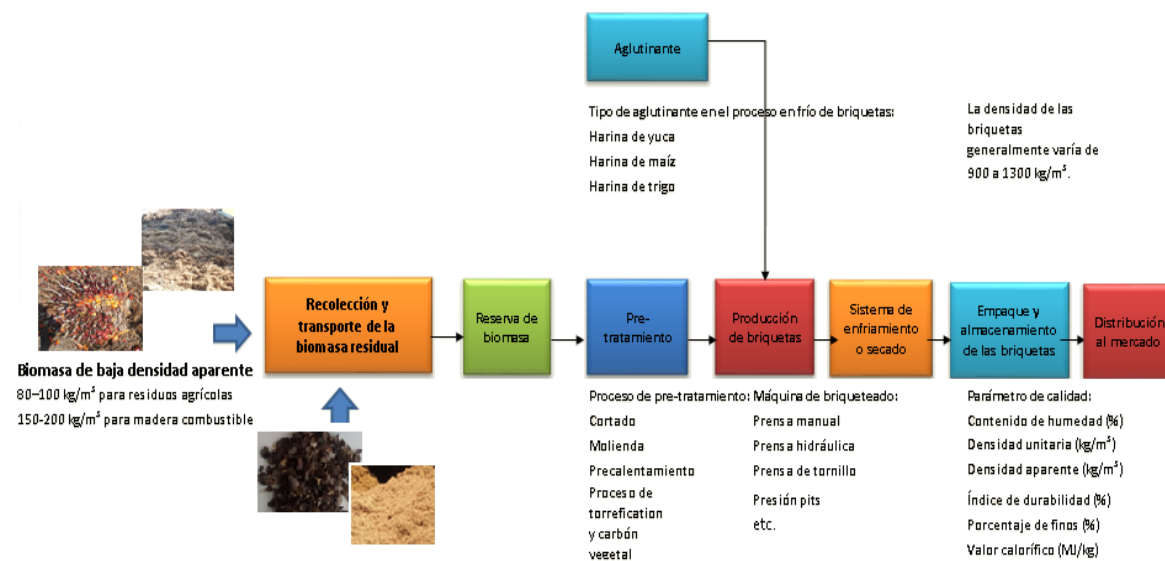
Fuente: El autor.

El poder calorífico de la mezcla proporciona características ideales para su utilización como fuente combustible debido a que se establece un valor de respuesta óptima de 16,3 MJ/kg (como se muestra en la figura 3-7), que comparado con el de la leña como combustible que es de 16,99 MJ/kg, no presenta diferencias significativas, y además estaríamos aportando a la disminución de la deforestación en la zona. Además, La densificación proporciona mejoras en las características de almacenamiento, transporte y disposición final, aumentando el área de contacto y proporcionando características idóneas para la generación de energía térmica.

### 3.1.4 Análisis de viabilidad económica para la densificación de biomasa residual

Por medio de la herramienta de evaluación rápida BEFS establecida por la FAO en 2014, se evaluó la factibilidad de aprovechamiento a partir de la densificación a través de la producción de briquetas, pensando en un proceso de desarrollo tecnológico que permite medir los índices de rentabilidad y viabilidad económica para este tipo de proyectos. Para el desarrollo del proceso se tiene en cuenta el siguiente diagrama de flujo como fundamento primordial de suplir energía para la calefacción y cocina en los hogares rurales por medio de material densificado de residuos sólidos de palma africana.

Figura 3-8: Diagrama de proceso de producción de briquetas de residuos sólidos de palma



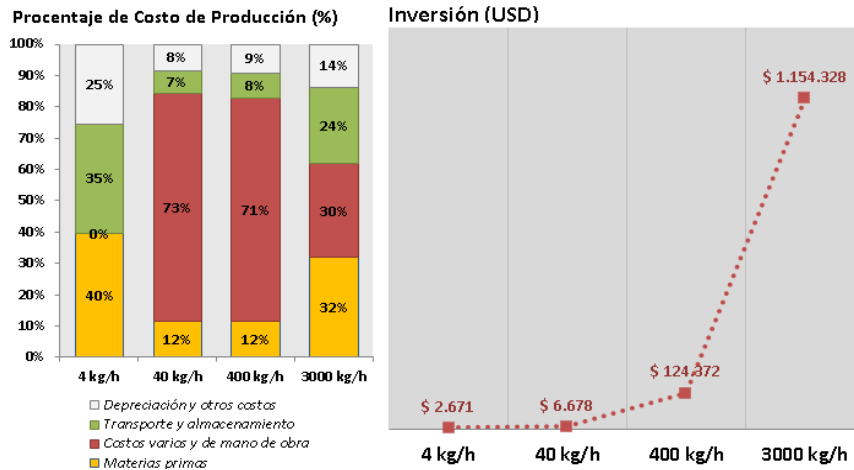
Fuente: El autor. Adaptado de la FAO, 2014.



Los cálculos utilizados por el programa para el análisis de los datos muestran Los resultados a partir de los costos de producción de las briquetas para las capacidades predefinidas: 4 kg/h, 40 kg/h, 400 kg/h y 3000 kg/h, de modo que se realiza un análisis a partir de una producción manual, mecanizado a pequeña escala, mecanizado a mediana escala y mecanizado a gran escala respectivamente. Es importante establecer que los datos generados son para biomasa a las cuales se les ha realizado un pretratamiento donde se considera el tamaño entre los 6-8 mm con 10-20% de contenido de polvo (< maya 4) y con un contenido de humedad que no exceda el 10%. No obstante, el proceso de pretratamiento involucra secado para remover el exceso de humedad, reducción de tamaño (cortado, molienda) y precalentamiento de la biomasa (no mayor a 300°C) para ayudar en la pérdida de fibras de la biomasa y ablandar su estructura para reducir el desgaste de la prensa de tornillo (FAO, 2014). El precalentamiento también puede ahorrar la energía eléctrica necesaria en la fabricación de briquetas. De igual forma, según datos reportados por Zapata et al. (2017), es posible producir densificación de biomasa de palma torrefacto bajo rangos de 220 y 270 °C con características comparables a los estándares internacionales. Sin embargo, la experimentación indica que la temperatura de transición vítrea de la lignina en estos residuos es más cercana a los 100 °C, puesto que la densificación no mejora significativamente al aumentar la temperatura en el material torrefacto.

Según lo que plantea la herramienta de evaluación rápida BEFS, se determinaron los costos de producción en % de inversión en dólares como muestra la figura 3-11, por medio de la información que el mismo programa propone.

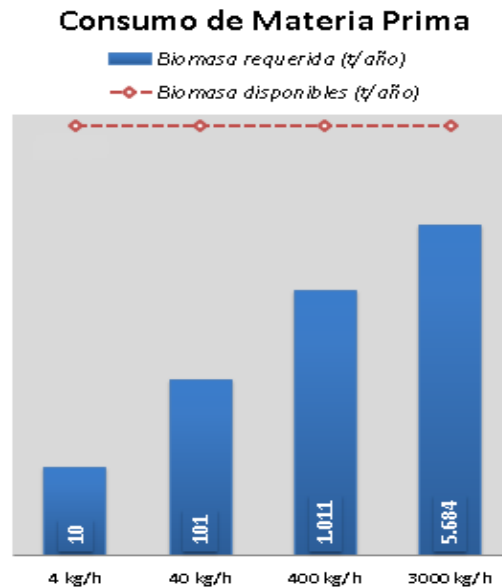
Figura 3-9: Costos de producción en % e inversión en USD.



Fuente: El autor. Adaptado de la FAO, 2014.

Como podemos observar los costos de producción para cualquier tipo de proceso es favorable teniendo en cuenta los niveles de materias primas, costos varios, mano de obra, transporte y depreciación. De igual modo, esto se evidencia con los valores de inversión según el tipo de proceso y los costos que puede representar la instalación de una planta de briquetas, donde la mayor inversión se genera a partir de una mayor producción de este producto densificado que es de 1.154.320 USD para generar 3 t/h.

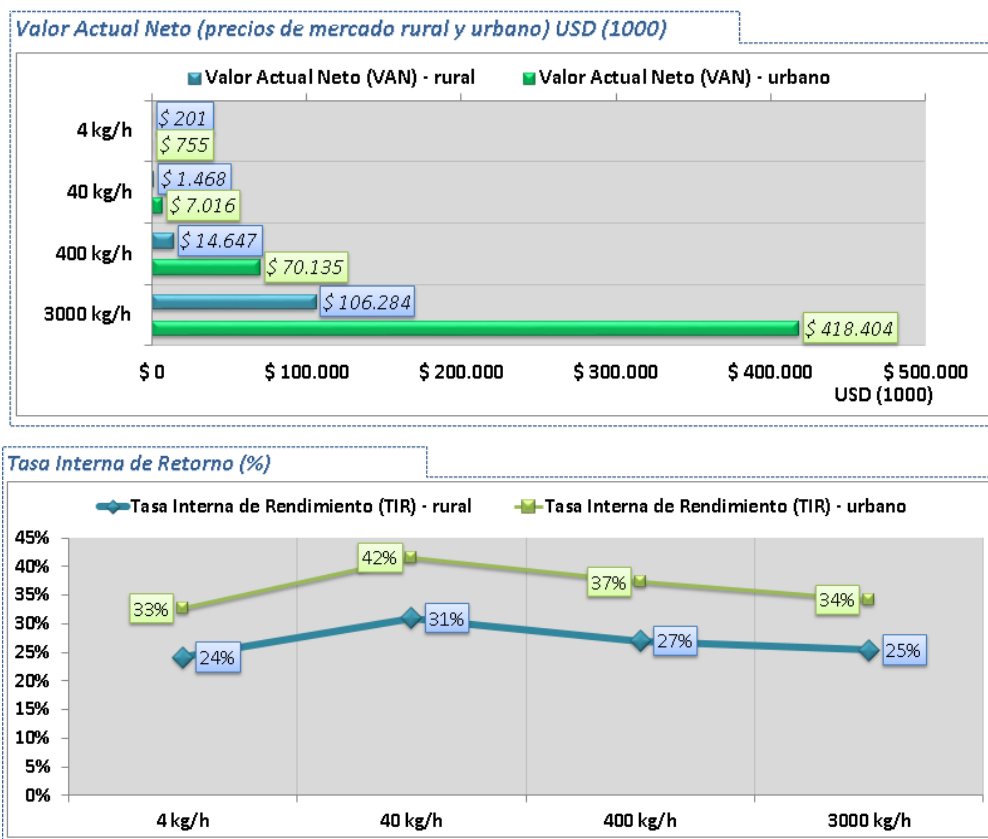
Figura 3-10: Consumo de materia prima para densificación



Fuente: El autor. Adaptado de la FAO, 2014.

Si analizamos el proceso desde el punto de vista de la disponibilidad podemos observar en figura 3-12 que la disponibilidad de materia prima anual es más que suficiente para emprender cualquiera de los procesos de densificación, sea de modo manual, mecanizado a pequeña escala, mecanizado a mediana escala y mecanizado a gran escala.

Figura 3-11: Valor actual neto (VAN) (precios zona rural y urbana) USD (1000) y tasa interna de retorno (%).



Fuente: El autor. Adaptado de la FAO, 2014.

Es evidente que tanto para la implementación del proceso en zona rural como la proyección para zona urbana la densificación de residuos sólidos de palma africana es viable, debido a que el valor actual neto siempre es mayor que cero. De igual modo, la tasa interna de retorno genera valores porcentuales superiores a la tasa de oportunidad y además son positivos lo que proyecta los procesos hacia una buena rentabilidad y viabilidad. En el peor de los casos propuestos (proceso manual rural) genera una tasa interna de retorno del 24%; por ende, es indispensable comenzar a pensar en medios de implementación para

producción de combustibles que no solo será rentable económicamente, sino que ambientalmente tendrá un aporte positivo por la disminución del uso de leña y en la deforestación de la zona. Socialmente será un cambio positivo y un ejemplo a seguir para generaciones futuras en la protección, conservación y aprovechamiento de recursos agrícolas industriales para la producción de energía térmica amigables con el medio ambiente.

### 3.1.5 Evaluación de consumo de combustible

Según la según la FAO en 2014, con los datos determinados en el proceso de densificación y en la producción de briquetas, se puede establecer con el poder calorífico y las estimaciones de eficiencia de las estufas para cocción de alimentos, la energía útil de las briquetas comparada con otros combustibles. La quema de las briquetas presenta una eficiencia en quemado del 50% y puede generar en una estufa convencional 8.15 MJ/kg de energía útil al usuario final; si comparamos la energía útil de las briquetas con la energía de la leña como combustible (Eficiencia del 20%), podemos evaluar que la leña combustible rinde el 41% de la energía útil de la briketa. Esto significa que se necesitan 2,40kg de leña combustible para proporcionar energía útil igual a 1kg de briketa. Una evaluación similar con el carbón como se presenta en la tabla 3-12.

Tabla 3-11: Comparación de mezcla de biomasa residual con otros combustibles.

	<b>Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)</b>	<b>Eficiencia en Estufa<sup>1</sup> %</b>	<b>Energía Útil (MJ/kg)</b>	<b>Factor de Conversión Kg de combustible<sup>2</sup></b>
<b>Mezcla de Biomasa Residual Densificada</b>	16,29	50%	8,15	1,00
<b>Leña</b>	16,99	20%	3,40	2,40
<b>Carbón</b>	27,00	25%	6,75	1,21

1. Tomado de relación establecida por la FAO 2014.  
2. Se establece según los datos arrojados en la Investigación comparado con la energía de 1 kg de briquetas, siguiendo metodología de la FAO 2014.

Fuente: El autor.

El factor de conversión para calcular el consumo equivalente de briketa de la mezcla de residuos sólidos es por lo tanto el valor de 2,40 kg de madera combustible y 1,21 kg de

carbón comparado con la energía de 1 kg de briqueta como se muestra en la Tabla 3-12, y que según los datos reportados por Young y Khennas (2003), donde por 1 kg de energía de la briqueta se deben establecer 6,11 kg de leña combustible y 1,14 kg de carbón. De igual forma, si tomamos en cuenta la población rural que utiliza leña como combustible en la zona de influencia de la investigación, teniendo en cuenta la información de población rural de la zona de estudio reportada por el DANE para 2016, y conociendo que según informes de la UPME (2014) el 61% de la población rural utiliza leña como combustible, se puede evaluar que la energía necesaria requerida para el desarrollo adecuado de sus actividades se puede suplir con una cantidad de mezcla de biomasa densificada de 18.118,6 toneladas al año, lo que representa que se dejen de utilizar 43.484,64 toneladas de leña como combustible al año, significando que cada hogar dejaría de consumir anualmente 8 ton de leña como combustible al año.

Tabla 3-12: Consumo de leña combustible en comparación con biomasa residual

<b>Población Rural que Consume Leña<sup>1</sup></b> (Promedio de hogares)	<b>Consumo de Leña<sup>2</sup></b> (Kg/Hogar/día)	<b>Poder Calorífico Inferior</b> (MJ/kg)	<b>Energía Consumida Leña</b> (MJ/día)	<b>Consumo de Combustible de Leña</b> (kg/año)	<b>Consumo de Combustible Biomasa Residual</b> (Mezcla densificada) (Kg/año)
5440	21,90	16,99	2024120,64	43484640	18118600
1: Población tomada según registros de proyección del DANE para 2016. Se estima que el 61% de la población rural consume leña como combustible (UPME, 2014). 2: Tomado del Documento cifras de consumo de leña UPME 2014.					

Fuente: El autor.

Esto representa un consumo per cápita para la zona rural de 1,5 t/año aproximadamente según los datos reportados para la investigación y establecidos en la tabla 3-12. Si extrapolamos la información establecida por Rudas, et al. (2014), significa que en las zonas rurales de estudio se está utilizando leña de la cual su origen se desconoce y por lo tanto no existen garantías de que su obtención se realice de manera racional y sostenible, esto establece que la población total estaría incurriendo en el consumo de 80 mil m<sup>3</sup> de leña combustible, lo que representa aproximadamente 1.478 hectáreas de bosque según las condiciones de bioclimáticas de esta zona del departamento del Cesar.

## 4. Conclusiones

Los principales renglones económicos de la zona norte del Cesar son el agropecuario del que deriva un 30% de sus ingresos, siendo Cesar es el primer productor nacional semilla de palma africana. La cantidad de residuos sólidos agroindustriales a disposición son de 963.096 toneladas en el año con producción en los 365 días del año, lo que equivale a una producción en la zona de estudio de 2.638 t/día; esta cantidad es representativa y en relación a la producción del producto principal que es el aceite de palma africana.

El análisis próximo y último en comparación con los de la leña como combustible tradicional de zonas rurales, son similares sobre todo en lo establecido en el contenido de carbono, tal como lo presentan los residuos de raquis, fibra y cuesco. De igual forma, con un porcentaje considerable de volátiles como presentan estos residuos se puede estimar que presentan características ventajosas sobre las fósiles convencionales y las hace ideal para procesos de combustión. Según estudios realizados los residuos de palma reportan la Celulosa entre 10-42%, Hemicelulosa 8-15% y lignina 22-49%, en este sentido podríamos afirmar que a medida que los materiales biomásicos presenten más cantidad de lignina y menos de celulosa, mayor va ser el poder de generación de energía, que es una de las características más importantes desde el punto de vista energético, debido a que a mayor cantidad de enlaces carbono-carbono mejor serán las propiedades energéticas.

El poder calorífico expresado en (MJ/kg) oscilando entre 15,87 y 18,5 de cada uno de los residuos, es igual o superior al de la leña combustible (16 MJ/kg), por tanto, es evidente que pueden convertirse en una alternativa ideal para el reemplazo de la leña en diferentes actividades convencionales.

---

El potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales es de 9.302 TJ/año, lo que representa el 2,06% de la demanda energética nacional, siendo el cuesco el residuo sólido que mejor características energéticas presenta por su alto PCI.

El diseño experimental de mezcla establece que según la disponibilidad de residuo sólido en la zona que es necesario utilizar el 78% de raquis, 14% de fibra y el 8% de cuesco en la mezcla combustible de modo que se pueda aprovechar mejor estos residuos, sin afectar las actividades convencionales de las plantas de beneficio, proporcionando en mezcla un PCI de 16,29 MJ/kg el cual no presenta diferencias significativas con la leña combustible (16,99 MJ/kg)).

La mezcla densificada puede proporcionar una mejor superficie de respuesta, así como una mejor eficiencia en procesos de combustión como lo establece Young & Khennas (2003), generando por cada kg consumido 2,4 kg de leña como combustible. Al proyectar el consumo de leña en la zona de estudio se establece que se utilizan 43.484,64 t/año leña combustible, lo que significa un consumo por hogar de zona rural de 8 t/año y representa un consumo per cápita para la zona de estudio de 1,5 t/año; esto representa 1.478 hectáreas de bosque según las condiciones de bioclimáticas establecidas en la zona de estudio.

Con los datos evaluados se puede ayudar a generar una transición energética dejando de utilizar 43 mil toneladas de leña y reemplazándolas por la mezcla de residuos sólidos de palma africana que proporcionan el mismo poder calorífico y además es amigable con el medio ambiente por su balance neutro de emisiones y por la disposición de esta biomasa residual del proceso de extracción de aceite de palma africana.

Desde el punto de vista industrial la producción de material densificado por medio de biorefinerías es una opción viable que genera por cada tonelada procesada de racimos de frutos frescos 125 kg de pellets o briquetas (Ramírez, et al., 2015), siendo la gasificación una buena alternativa según el aspecto ambiental y tecnológico, sin embargo, se deben considerar las relaciones costos – beneficios para la puesta en marcha por la complejidad de sus equipos.

## Bibliografía

Abdullah, M., Nazir, M., Wahjoedi, B., (2011). Desarrollo de biomateriales de valor agregado a partir de residuos agrícolas de palma de aceite. IPCBEE 7, 32–35

Agronet (2016). Base Agrícola de Evaluaciones Agropecuarias – EVA. Evaluaciones Agropecuarias Municipales. Recuperado de: [http://www.agronet.gov.co/Lists/Boletin/Attachments/145/Base%20Agr%C3%ADcola%20EVA%202007-2015%20\(P\)\\_01%20de%20Junio%20de%202016.xlsx](http://www.agronet.gov.co/Lists/Boletin/Attachments/145/Base%20Agr%C3%ADcola%20EVA%202007-2015%20(P)_01%20de%20Junio%20de%202016.xlsx)

Arévalo, W. (2015). La biomasa: una alternativa energética proveniente de la vida misma. Libros Editorial UNIMAR. Pasto – Colombia. Recuperado de: <http://www.umariana.edu.co/ojseditorial/index.php/libroseditorialunimar/article/view/709/634>

Aristizábal, J. (2010). Estufas mejoradas y bancos de leña: una alternativa de autoabastecimiento energético a nivel de finca para comunidades dependientes de los bosques de roble de la cordillera oriental. Revista Colombia Forestal Vol. 13 (2): 245-265.

Arteaga, J., Arenas, E., López D., Sánchez C., Zapata, Z. (2012). Obtención De Biocombustibles Producto de la Pirolisis Rápida de Residuos de Palma Africana (*Elaeis Guineensis* Jacq.). Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. Vol 10 No. 2 (144 - 151).



---

Banco Mundial (2015). Consumo de energía procedente de combustibles fósiles y combustibles renovables. Consultado el 10 octubre de 2017. Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS>

Boerrigter, H., Nijst, C., Paasen, S., Venderbosch, R. (2011). Process to convert biomass. US 20110297885 A1. Recuperado de: <https://patents.google.com/patent/US20110297885A1/en>

BUN-CA – Fundación red energía (2002). Manuales sobre energía renovable: Biomasa/Biomass. Primera Edición - San José, Costa Rica. Recuperado de: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257C1005B2354/\\$FILE/Manuales\\_sobre\\_energ%C3%ADa\\_renovableBIOMASA.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257C1005B2354/$FILE/Manuales_sobre_energ%C3%ADa_renovableBIOMASA.pdf)

Cabrales, H. (2016). Caracterización del proceso de densificación de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana (Tusa) (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/56625/7/HuberCabralesContreras.2016.pdf>

Carrasco, J. (2008). Combustión directa de la Biomasa. Master en Energías Renovables y Mercado Energético 2007/2008. Recuperado de: [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45279/componente45278.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45279/componente45278.pdf)

Cenipalma. (2011). Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. Boletín Técnico No. 30, Bogotá – Colombia.

Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. Cuadernos Económicos de ICE, Información Comercial Española, 83, 117-140.

Chaves, M., y Domine, M. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. Avances en Ciencias e Ingeniería - ISSN: 0718-8706 Av. cien. ing.: 4(4), 15-46.

Chiew, Y., y Shimada, S. (2013). Current state and environmental impact assessment for utilizing oil palm empty fruit bunches for fuel, fiber and fertilizer – A case study of Malaysia. *Biomass and Bioenergy*, 51, 109-124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.012>

Corpoema (2010). Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE). Bogotá – Colombia. Recuperado de: [http://www.upme.gov.co/sigic/documentosf/vol\\_1\\_plan\\_desarrollo.pdf](http://www.upme.gov.co/sigic/documentosf/vol_1_plan_desarrollo.pdf)

Correa, S. (2016). Análisis teórico de la combustión de biomasa residual proveniente de cultivos tradicionales en Colombia (Tesis de pregrado) Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Risaralda, Colombia. Recuperado de: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/7146/620004C824.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cuiping, L., Chuangzhi, W., Yanyongjie, Haitao, H. (2004) Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. *Biomass and Energy* 27, pp.119 – 130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.01.002>

Del Hierro, E; (1993). Aprovechamiento de los sub-productos de palma de aceite. *Revista Palmas*. Vol. 14(especial), 149 – 153.

Demirbas A. (2008). *Biodiesel: Una Alternativa de Combustible Realista para Motores Diesel*, 1ª. Edición, Springer–Verlag London Limited, pag. 1-2. Recuperado de: <http://www.springer.com/gp/book/9781846289941>

DANE (2016). Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA). Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/censo/files/libroCenso2005nacional.pdf>

DANE (s.f). Encuesta nacional de Hogares. Estimación y proyección de Hogares y viviendas 1985 - 2020. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/mercado-laboral/encuesta-nacional-de-hogares>

---

Energiza (s.f). Procesos de conversión de Biomasa en energía. Editorial Renovetec. Consultado 6 de octubre de 2017. Recuperado de: <http://www.energiza.org/index.php/biomasa-2/56-procesos-de-conversion-de-biomasa-en-energia>

FAO- Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. (2014). Bioenergía y seguridad alimentaria evaluación rápida (BEFS) – Briquetas. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-bp845s.pdf>

FAO-Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. (2016). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015 ¿Cómo están cambiando los bosques del mundo? ISBN 978-92-5-309283-3. Roma – Italia.

Fedepalma. (2014). Minianuario Estadístico. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. Recuperado de: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/article/view/11200/11201>

Fedepalma. (2015a). Anuario Estadístico. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo. Bogotá: Fedepalma. Recuperado de: <http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Minianuario%20Estad%C3%ADstico%202015.pdf>

Fedepalma. (2015b). Palma de Aceite en el Departamento del Cesar. Consultado en: <http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Infografi%CC%81a%20CESAR.pdf>

Fedepalma. (2016). Minianuario Estadístico. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. Recuperado de: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/article/view/11834/11830>

Fedepalma. (2017). Balance económico del sector palmero colombiano en el primer trimestre de 2017. Recuperado de:

<http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/BTE%20-junio-2017-baja-calidad.pdf>

Flores, R., Muñoz, R., Flores, B., y Cano, K. (2008). Estimación de la generación de energía a partir de biomasa para proyectos del programa de mecanismo de desarrollo limpio. *Revista mexicana de ingeniería química*, 7(1), 35-39.

Gamarra, R. (2010). Fabricación y evaluación de eficiencia y emisiones de briquetas a base de residuos agrícolas como alternativa energética al uso de leña (Tesis de Pregrado). Universidad Zamorano-Escuela Agrícola Panamericana, Honduras. Recuperado de: <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/537>

García, J. (2014a). Desarrollo de un modelo teórico experimental del proceso de corte del bagazo de caña de azúcar orientado al diseño óptimo de un sistema cortador (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia–Sede Bogotá, Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/46375/1/2300233.2015.pdf>

García, J (2014b). Estudio comparativo entre las diferentes fuentes de energía eléctrica en Colombia y la generación de electricidad a partir de biomasa. Fundación Universitaria Agraria de Colombia. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1706/1706.08441.pdf>

García, J., Gracia, M., y Das, K. (2008). Determinación de los parámetros cinéticos de degradación térmica de los subproductos de las plantas de beneficio mediante análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial. *Revista PALMAS* Vol. 29 No. 4, 31-46.

García, J., Cárdenas, M., Yáñez, E. (2010). Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. Programa de procesos y usos, Cenipalma. *Revista Palmas* Vol. 31 No. 2 p. 41-48.

García, J., Ramírez, N., Rodríguez, T., García, M. (2016). Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Literature review on current and potential uses of residual biomass and

effluents. Resources, Conservation and Recycling. 110, 99-114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.022>

Gobernación del Cesar. (2016). Un camino para la Paz. Consultado en: <http://cesar.gov.co/c/index.php/es/opinformacdepto>

Gómez, A., Klose, W., Rincón, S., y Wiest, W. (2004). Transformación termoquímica de la biomasa residual del proceso de extracción del aceite de palma: tecnologías y perspectivas. Revista Palmas, 25(especial,), 388-397.

Gómez, A., Klose W., Rincon, S. (2008). Pirolisis de Biomasa. Cuesco de palma de aceite. Universidad de Kassel, Kassel – Alemania. Recuperado de: <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-457-8.volltext.frei.pdf>

Junfeng, L., Runqing, H., Yanquin, S., Jingli., S., Battacharya S., Abdul., P. (2005). Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in China. Biomass and Bioenergy 29, pp. 167 – 177. DOI: [10.1016/j.biombioe.2005.03.006](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.03.006).

Hernández, F. (2011). Recursos energéticos alrededor del mundo. Guangzhou, China. Editorial Benchmark education. ISBN: 978-1-4509-0898-6. Pág. 22. Recuperado de: <https://books.google.com.co/books?id=RGKlxqCB7RkC&pg=PP1&lpg=PP1&dq=Recursos+Energ%C3%A9ticos+alrededor+del+mundo+hernandez&source=bl&ots=rHnx3gM0p&sig=QLj7c0lfNRYzSc1nbNfupHsDfpc&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjwZ6i8evWAhVKySYKHSVODnEQ6AEIMjAF#v=onepage&q=Recursos%20Energ%C3%A9ticos%20alrededor%20del%20mundo%20hernandez&f=false>

Hernández, R., Fernández, C., Baptista, M. (2014). Metodología de la Investigación. México D.F., México: Editorial McGraw Hill - Sexta Edición. ISBN: 978-1-4562-2396-0.

IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011). Plan de Energías Renovables 2011 – 2020. Consultado En: <http://www.idae.es/index.php/id.670/re/menu.303/mod.pags/mem.detalle>

IDEAM (2015). Aumenta deforestación en Colombia. Consultado en: [http://www.ideam.gov.co/web/saladeprensa/noticias//asset\\_publisher/96oXgZAhHrhJ/content/aumenta-deforestacion-en-colombia-para-2014](http://www.ideam.gov.co/web/saladeprensa/noticias//asset_publisher/96oXgZAhHrhJ/content/aumenta-deforestacion-en-colombia-para-2014)

IEA – International Energy Agency (2012). Perspectiva Mundial de la Energía 2012. Recuperado en: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Spanish.pdf>

INCOMBUSTION - Unión temporal. (2016). Consultoría técnica para el fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emisión de los combustibles Colombianos-FECOC. Medellín, Antioquia, Colombia. Recuperado de: [http://www.mvccolombia.co/images/Informe\\_Final\\_FECOC.pdf](http://www.mvccolombia.co/images/Informe_Final_FECOC.pdf)

Laboratorio de Carbones (2016). Instructivo para toma y manejo de muestras. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Recuperado de: [https://minas.medellin.unal.edu.co/laboratorios/images/lab\\_minasunal/docs/INSTRUCTIVO PARA TOMA Y MANEJO DE MUESTRAS.pdf](https://minas.medellin.unal.edu.co/laboratorios/images/lab_minasunal/docs/INSTRUCTIVO_PARA_TOMA_Y_MANEJO_DE_MUESTRAS.pdf)

Lezcano, D. (2011). Estudio exergético para identificar y evaluar potencialidades en energías renovables en el territorio colombiano, para planeamiento energético en periodos futuros. (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/5876/1/8161669.2012.pdf>

LEY 697 DE 2001. Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. Bogotá – Colombia.

Ley 1665 de 2013. Por medio de la cual se aprueba el "ESTATUTO DE LA AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES (IRENA)", hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009. Bogotá – Colombia.

LEY 1715 DE 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético. Bogotá – Colombia.

---

Martínez, S. (2009). Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña (Tesis Doctoral), Universitat de Girona, Cataluña, España. ISBN: 978-84-692-5161-4. Recuperado de: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7920/tsml1de1.pdf>

Maestre, H. (2010). La desertificación. Un problema grave en el Cesar. El Periodico El Pilon. Recuperado de: <http://elpilon.com.co/la-desertificacion-un-problema-grave-en-el-cesar/>

Mejía, F. (2011). Implicaciones ambientales del uso de leña como combustible doméstico en la zona rural de Usme. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C., Colombia. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4125/1/905057.2011.pdf>

Miranda, I. y Amaris, O. (2009). Aprovechamiento del potencial energético de la biomasa residual obtenida de la extracción del aceite de palma en Colombia. Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander – UIS., Bucaramanga, Colombia. Recuperado de: <http://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/994/64/09-BIOMASA-UIS-1.PDF>

Mosquera, M., Valderrama, M., Fontanilla, C., Ruíz, E., Uñate, M., Rincón, F., y Arias, N. (2016). Costos de producción de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia en 2014. *Palmas*, 37(2), 37-53.

Murillo, J. (2014). Estudio del potencial biomásico forestal arbóreo en la generación de bioenergía para zonas no interconectadas del valle del cauca y caldas utilizando sensores remotos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Administración. Escuela de Posgrado. Palmira – Colombia.

Ortega, D., Bustamante, M., Gutiérrez, D., Correa, A. (2015). Diseño de mezclas en formulaciones industriales. *Revista DYNA*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Volumen 82 (189), pp. 149-156.

Osorio, C. (2013). Uso integral de la biomasa de palma de aceite. *PALMAS* Vol. 34 No. Especial, Tomo II, pp. 315 – 323.

Parodi, V. (2013). Propuesta metodológica para la evaluación Integral de proyectos en el sector energético. (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia – España. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30063/TESISDOCTORAL.VPARODI.VERSI ON3.pdf?sequence=1>

Pasache, M. y Sánchez, E. (2013). De la leña de algarrobo a las briquetas de aserrín: alternativa para negocios artesanales del Norte del Perú. 13th LACCEI Conferencia Internacional Anual: "La educación en ingeniería frente a los grandes retos, ¿Qué estamos haciendo? ". Julio 29-31, 2015, Santo Domingo, República Dominicana.

Patiño, P. (2014). Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. Universidad de Santander. Revista Innovaciencia 2014; 2 (1): 45 – 52.

Pérez, M. y Núñez, J. (2013). Nuevos conceptos para biorrefinerías de aceite de palma. Revista Palmas, 34, 66-84.

Quintero, J. y Quintero, L. (2015). Perspectivas del potencial energético de la biomasa en el marco global y latinoamericano. Gestión y Ambiente, 18(1), 179.

Ramírez, N., Arévalo, A. y García, J. (2015). Inventario de la biomasa disponible en plantas de beneficio para su aprovechamiento y caracterización fisicoquímica de la tusa en Colombia. Palmas, 36(4), 41-54.

Ramírez, J. y Taborda, A. (2014). Consumo de leña en fogones tradicionales en familias campesinas del oriente antioqueño. Producción+Limpia, 9(1), 99-114.

REN21 (2014). Informe de estado global 2014 de las energías renovables. Energías Renovables 2014. Informe de estado global. Disponible en: [http://www.ren21.net/ren21activities/global\\_statusreport.aspx](http://www.ren21.net/ren21activities/global_statusreport.aspx)



---

Rudas, A., Padilla, D., Arias, A. (2014). Evaluación del rendimiento energético y consumo de madera como combustible utilizado en el proceso de cocción de ladrillos, en las ladrilleras artesanales de la vereda las casitas del municipio de Valledupar. Revista Colombia Forestal, Vol. 17. Slup 1.

Sánchez, Y. y Mazanett, D. (2016). Las enfermedades del desarrollo: la explotación carbonífera a gran escala en Colombia. Revista Universidad de La Salle, (70), 173-202.

Serrato, C. y Lesmes, V. (2016). Metodología para el Cálculo de Energía Extraída a Partir de Biomasa en el Departamento de Cundinamarca. (Tesis de Pregrado) Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3687/1/Documento%20final%20Metodolog%C3%ADa%20Potencial%20Energ%C3%A9tico%20Biomasa.pdf>

Sheng CH., y Azevedo J. (2005). Estimating the higher value of biomass fuels from basic analysis data. Biomass and Bioenergy 28, pp. 499 – 507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.008>

Sierra, F. (2011). Implicaciones ambientales del uso de leña como combustible doméstico en la zona rural de USME. Trabajo de grado para optar al título de magister en medio ambiente y desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá – Colombia. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4125/1/905057.2011.pdf>

SISPA – Fedepalma (2016). Producción de Palma de aceite por zonas y departamentos. Recuperado de: <http://web.fedepalma.org/sispa>

UPME (2010). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. [Bogotá]: Unidad de Planeación Minero Energética: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación Colciencias: Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

UPME (2014). Avance en la construcción de línea base de cifras de consumo de leña. Subdirección de demanda. Consultado en: <http://www.si3ea.gov.co/Home/Le%C3%B1a/tabid/136/language/en-US/Default.aspx>

UPME, (2015a). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. CONVENIO ATN/FM-12825-CO. Editores S.A. Bogotá. Recuperado de: [http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion\\_Energias\\_Renovables/INTEGRACION\\_ENERGIAS\\_RENOVANLES\\_WEB.pdf](http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf)

UPME, (2015b). Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050. Bogotá – Colombia. Recuperado de: [http://www.upme.gov.co/docs/pen/pen\\_idearioenergetico2050.pdf](http://www.upme.gov.co/docs/pen/pen_idearioenergetico2050.pdf)

Vassilev, S., Baxter, D., Andersen, L., Vassileva, C. (2010). Una visión general de la composición química de la biomasa. Revista Fuel. Volumen 89, pp 913–933.

Vargas, D., Yáñez, E., García, J. Meneses, A. Cuellar, M. (2011). Cogeneración con biomasa de palma de aceite en el sistema eléctrico colombiano: barreras, perspectivas y oportunidades. Revista PALMAS Vol. 32 No. 3, pp. 49-62.

Vargas, F., Mejía, F., y Guerrero, C. (2011). Leña como combustible doméstico en zonas rurales de Usme, Bogotá. Informador Técnico, (75), p 30 – 39.

Vilches, L. (s.f.). Muestreo de Biocombustibles Sólidos. Aplicación de normas CEN/TS 14778-1:2007 EX Biocombustibles sólidos. Muestreo. Métodos de muestreo. Recuperado de: [http://p29596.typo3server.info/fileadmin/Files/Documents/05\\_Workshops\\_Training\\_Events/Taining\\_materials/spanish/03\\_Sampling.pdf](http://p29596.typo3server.info/fileadmin/Files/Documents/05_Workshops_Training_Events/Taining_materials/spanish/03_Sampling.pdf)

Young, P., y Khennas, S. (2003). Feasibility and Impact Assessment of a Proposed Project to Briquette Municipal Solid Waste for Use as a Cooking Fuel in Rwanda Consultancy Report to the Business Linkages Challenge Fund (BLCF). Recuperado de: [http://cleancookstoves.org/resources\\_files/feasibility-and-impact.pdf](http://cleancookstoves.org/resources_files/feasibility-and-impact.pdf)

Zapata, A., Talero, G., Rincón, S., y González, A. (2017). Peletización de tusa y fibra de palma africana torrefacta: evaluación del efecto de la temperatura de peletización y de torrefacción en la peletización y la calidad de los pélets. *Palmas*, 38(2), 64 - 82.

## Anexos

### Anexo 1:

#### Entrevista Residuos Sólidos Agroindustriales de Palma Africana en el Departamento del Cesar

##### Preguntas:

1. Cantidad de racimos de fruto fresco (RFF) procesados durante los años 2015 y 2016 en la plata de Beneficio.

2015: \_\_\_\_\_

2016: \_\_\_\_\_

2. Capacidad promedio de procesamiento diaria de RFF

\_\_\_\_\_

3. Cantidad o porcentaje de Residuo Solido Agroindustrial generado en el proceso:

En cultivo: Hojarasca \_\_\_\_\_

En proceso: Raquis \_\_\_\_\_ Fibra \_\_\_\_\_ Cuesco \_\_\_\_\_

4. Estimación por Tonelada de la cantidad de RFF que puede generar de:

Raquis: \_\_\_\_\_ Fibra: \_\_\_\_\_ Cuesco: \_\_\_\_\_

5. A Cuáles actividades son destinados los Residuos Sólidos Agroindustriales del proceso:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. Estimación de Costo por Kilogramo o Costo por Tonelada de:

Raquis: \_\_\_\_\_ Fibra: \_\_\_\_\_ Cuesco: \_\_\_\_\_

7. La empresa aparte de los procesos de aprovechamiento convencionales, ha desarrollado procesos tecnológicos enfocados a la utilización FNCER.

8. Que retos tienen pensados a futuro para el aprovechamiento eficaz de los Residuos Sólidos Agroindustriales

---

## Anexo 2:

### Entrevista con las Corporación Autónoma Regional

#### Preguntas:

1. Estimado de número de personas que utilizan leña en zona rural.

2016: \_\_\_\_\_

2. Capacidad de utilización diaria de leña kg/día

\_\_\_\_\_

3. Estimado de personas por hogar en zona rural y que utilicen leña como combustible:

\_\_\_\_\_

4. Actividades en las que se utiliza Leña como combustible:

\_\_\_\_\_

5. Que otros combustibles utilizan para el desarrollo de las actividades convencionales y en qué cantidades se promedian:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. Qué medidas de mitigación se proponen para la disminución de uso de leña y otros combustibles fósiles en zonas rurales:







\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Anexo 3

### Reporte de análisis de laboratorio

 <b>SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD</b>		Código: PS-P04-F07		
		Versión: 04		
USUARIO (persona o entidad)		LUIS QUINTERO LOPEZ		
FECHA DE RECEPCIÓN 27/06/2016		FECHA DE MUESTREO 21/06/2016		FECHA DE ENTREGA 27/06/2016
TIPO DE ANALISIS BROMATOLÓGICO COMPLETO		VEREDA ---	MUNICIPIO Valledupar	DEPARTAMENTO Cesar
N° CONSECUTIVO	377	378	379	---
IDENTIFICACION	Rapaz	Fico	Guaco	---
PUNTO DE MUESTREO		---		
PARAMETROS	UNIDADES	377	378	379
Humedad	%	7,7	8,3	6,2
Materia seca	%	92,3	91,7	93,8
Proteína Cruda	%	8,1	12,1	4,3
Extracto etéreo	%	11,4	11	4,5
Fibra bruta	%	34,7	38,3	66,5
Ceniza	%	6,5	9,9	7,78
C.I.C	meq 100g <sup>-1</sup>	---	---	---
Hemicelulosa	%	15,3	7,48	4,51
Celulosa	%	42,34	27,99	9,6
Lignina	%	22,49	35,81	49,6
Potasio	%	0,52	0,54	0,56
Sodio	mg/Kg	780,7	799,8	858,9
Calcio	%	0,92	0,89	0,95
Magnesio	%	0,32	0,33	0,13
Cobre	mg/Kg	37,7	44,1	15,5
Zinc	mg/Kg	49,1	37,1	40,8
Hierro	mg/Kg	199,4	201,9	174,7
Manganeso	mg/Kg	7,93	8,39	9,46
Boro	mg/Kg	49,9	66,1	67,9
Fósforo	%	0,16	0,22	0,17
Azufre	%	0,056	0,5	0,067
MÉTODO ANALÍTICO				
		Gravimétrico		
		Gravimétrico		
		Kjeldahl		
		Gravimétrico		
		Gravimétrico		
		Gravimétrico		
		NH <sub>4</sub> OAc-pH7		
		Gravimétrico		
		Gravimétrico		
		Gravimétrico		
		Espectrofotométrico/AA		
		Espectrofotométrico/AA		
		Espectrofotométrico/AA		
		Espectrofotométrico/AA		
		Espectrofotométrico/AA		
		Espectrofotométrico/AA		
		Espectrofotométrico/Uv-Vis		
		Espectrofotométrico/Uv-Vis		
		Espectrofotométrico/Uv-Vis		
Observaciones:				
1. Los resultados son reportados en base seca				
2. Los resultados encontrados son válidos únicamente para la muestra analizada. La misma fue tomada por personal ajeno al laboratorio.				
3. LASEREX no es responsable de la interpretación de los resultados ni de la forma como se presenten con ellos.				
Certificados bajo las normas: ISO 9001:2008 SO 6996 - 2 Y GP1000: 2009 GP 168 - 2				
   		FIRMA:  DIRECTOR LASEREX NOMBRE: LUIS OVEIMAR BARBOSA JAMES MAT. PROF: PQ-2316 TELEFAX: 2771212 EXT 9359		
Fecha: viernes 24 01 28 2014				


**Dr. Calderón LABS**  
 SINCE de mejor información...

INSTITUCIÓN TÉCNICA AGRICOLA  
 CONTROL DE CALIDAD  
 FOLIV  
 SUREC  
 AGRIAR

Bogotá D.C, 11 de Julio de 2016

## ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

**Muestra No. 20019**  
 Empresa: Luis Alberto Quintero López  
 Descripción: Biomasa  
 Identificación: Muestra de Biomasa de Palma (Raquis)  
 Características: Producto color amarillo  
 Procedencia: Codazzi - Cesar  
 Muestreo: 2016-06-21

Orden de T# 56335

## RESULTADOS ANALÍTICOS

Humedad, %	Resultados	
	Base Húmeda	Base Seca
6,74		
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>		
Carbono, C, %	43,34	46,47
Hidrógeno, H, %	5,80	6,22
Oxígeno, O, %	39,40	42,25
Nitrógeno, N, %	1,04	1,12
Azufre, S, %	0,072	0,077
Poder Calorífico Inferior, kJ/g	14,80	15,87
Poder Calorífico Superior, kJ/g	15,96	17,14

Prohibida la copia total o parcial del presente informe. Toda copia autorizada deberá llevar este sello en original en cada una de sus páginas. Los presentes resultados analíticos corresponden exclusivamente a la muestra recibida en el laboratorio y no a otros materiales de la misma procedencia.



  
**Felipe Calderón Sáenz**  
 Director General T.P.3196



SINCE de mejor información...

## ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

**Muestra No. 20017**  
 Empresa: Luis Alberto Quintero López  
 Descripción: Biomasa  
 Identificación: Muestra de Biomasa de Palma (Cuesco)  
 Características: Producto particulado color amarillo y café  
 Procedencia: Codazzi - Cesar  
 Muestreo: 2016-06-21

Orden de T# 56335

## ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

**Muestra No. 20017**  
 Empresa: Luis Alberto Quintero López  
 Descripción: Biomasa  
 Identificación: Muestra de Biomasa de Palma (Cuesco)  
 Características: Producto particulado color amarillo y café  
 Procedencia: Codazzi - Cesar  
 Muestreo: 2016-06-21

Orden de T# 56335

## RESULTADOS ANALÍTICOS

Humedad, %	Resultados	
	Base Húmeda	Base Seca
5,84		
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>		
Carbono, C, %	47,82	50,79
Hidrógeno, H, %	5,56	5,91
Oxígeno, O, %	34,49	36,62
Nitrógeno, N, %	0,75	0,80
Azufre, S, %	0,052	0,055
Poder Calorífico Inferior, kJ/g	17,42	18,50
Poder Calorífico Superior, kJ/g	18,56	19,71

Prohibida la copia total o parcial del presente informe. Toda copia autorizada deberá llevar este sello en original en cada una de sus páginas. Los presentes resultados analíticos corresponden exclusivamente a la muestra recibida en el laboratorio y no a otros materiales de la misma procedencia.



  
**Felipe Calderón Sáenz**  
 Director General T.P.3196

INSTITUCIÓN TÉCNICA AGRICOLA  
 CONTROL DE CALIDAD  
 FOLIV  
 SUREC  
 AGRIAR

Bogotá D.C, 11 de Julio de 2016

## ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

**Muestra No. 20018**  
 Empresa: Luis Alberto Quintero López  
 Descripción: Biomasa  
 Identificación: Muestra de Biomasa de Palma (Fibra)  
 Características: Producto color café claro  
 Procedencia: Codazzi - Cesar  
 Muestreo: 2016-06-21

Orden de T# 56335


## RESULTADOS ANALÍTICOS

Humedad, %	Resultados	
	Base Húmeda	Base Seca
8,00		
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>		
Carbono, C, %	45,85	49,62
Hidrógeno, H, %	5,69	6,18
Oxígeno, O, %	34,10	37,07
Nitrógeno, N, %	1,55	1,68
Azufre, S, %	0,107	0,116
Poder Calorífico Inferior, kJ/g	16,03	17,42
Poder Calorífico Superior, kJ/g	17,19	18,68

Prohibida la copia total o parcial del presente informe. Toda copia autorizada deberá llevar este sello en original en cada una de sus páginas. Los presentes resultados analíticos corresponden exclusivamente a la muestra recibida en el laboratorio y no a otros materiales de la misma procedencia.



  
**Felipe Calderón Sáenz**  
 Director General T.P.3196

		<b>INFORME DE RESULTADOS</b> Código: FAR-001 Versión: 04				
<b>LABORATORIO DE CARBONES</b>		Solicitud: 281				
Ciudad: Medellín	Fecha: 2016 06 30	Informe No.: 16-189 C				
<b>INFORMACIÓN DEL CLIENTE</b>						
Nombre: LUIS ALBERTO QUINTERO LÓPEZ	NIT. o CC.: 77.093.567					
Dirección: Calle 6D # 19E-30 Barrio: LA ESPERANZA	Teléfono: 3168239450					
Persona de contacto: Luis Alberto Quintero López	Cargo: Ingeniero					
Correo electrónico: lquintero34@areandina.edu.co	Ciudad: Valledupar-Cesar					
<b>INFORMACIÓN DE LA MUESTRA</b>						
Fecha de recepción: 2016 06 27	Tipo de muestra: Residuo Sólido Agroindustrial (Biomasa)	Solicitud No.: 183	Código asignado por el laboratorio: 160432			
Identificación asignada por el cliente: Biomasa de Palma Africana (Cuesco)						
<b>RESULTADOS</b>						
FECHA DE ANÁLISIS			ENSAYO	DOCUMENTO NORMATIVO	RESULTADO	UNIDADES
año	mes	día				
2016	06	30	Humedad Residual	ASTM D3173-11	6,26	%
2016	06	30	Cenizas	ASTM D3174-12	2,47	%
2016	06	30	Materia Volátil	ISO 562-10 3ª edición 2010-06-15	70,80	%
2016	06	30	Carbono Fijo	ASTM D3172-13	20,47	%

		<b>INFORME DE RESULTADOS</b> Código: FAR-001 Versión: 04				
<b>LABORATORIO DE CARBONES</b>		Solicitud: 281				
Ciudad: Medellín	Fecha: 2016 06 30	Informe No.: 16-189 B				
<b>INFORMACIÓN DEL CLIENTE</b>						
Nombre: LUIS ALBERTO QUINTERO LÓPEZ	NIT. o CC.: 77.093.567					
Dirección: Calle 6D # 19E-30 Barrio: LA ESPERANZA	Teléfono: 3168239450					
Persona de contacto: Luis Alberto Quintero López	Cargo: Ingeniero					
Correo electrónico: lquintero34@areandina.edu.co	Ciudad: Valledupar-Cesar					
<b>INFORMACIÓN DE LA MUESTRA</b>						
Fecha de recepción: 2016 06 27	Tipo de muestra: Residuo Sólido Agroindustrial (Biomasa)	Solicitud No.: 183	Código asignado por el laboratorio: 160431			
Identificación asignada por el cliente: Biomasa de Palma Africana (Fibra)						
<b>RESULTADOS</b>						
FECHA DE ANÁLISIS			ENSAYO	DOCUMENTO NORMATIVO	RESULTADO	UNIDADES
año	mes	día				
2016	06	30	Humedad Residual	ASTM D3173-11	7,84	%
2016	06	30	Cenizas	ASTM D3174-12	9,36	%
2016	06	30	Materia Volátil	ISO 562-10 3ª edición 2010-06-15	66,51	%
2016	06	30	Carbono Fijo	ASTM D3172-13	16,29	%

		<b>INFORME DE RESULTADOS</b> Código: FAR-001 Versión: 04				
<b>LABORATORIO DE CARBONES</b>		Solicitud: 281				
Ciudad: Medellín	Fecha: 2016 06 30	Informe No.: 16-189 B				
<b>INFORMACIÓN DEL CLIENTE</b>						
Nombre: LUIS ALBERTO QUINTERO LÓPEZ	NIT. o CC.: 77.093.567					
Dirección: Calle 6D # 19E-30 Barrio: LA ESPERANZA	Teléfono: 3168239450					
Persona de contacto: Luis Alberto Quintero López	Cargo: Ingeniero					
Correo electrónico: lquintero34@areandina.edu.co	Ciudad: Valledupar-Cesar					
<b>INFORMACIÓN DE LA MUESTRA</b>						
Fecha de recepción: 2016 06 27	Tipo de muestra: Residuo Sólido Agroindustrial (Biomasa)	Solicitud No.: 183	Código asignado por el laboratorio: 160431			
Identificación asignada por el cliente: Biomasa de Palma Africana (Fibra)						
<b>RESULTADOS</b>						
FECHA DE ANÁLISIS			ENSAYO	DOCUMENTO NORMATIVO	RESULTADO	UNIDADES
año	mes	día				
2016	06	30	Humedad Residual	ASTM D3173-11	7,84	%
2016	06	30	Cenizas	ASTM D3174-12	9,36	%
2016	06	30	Materia Volátil	ISO 562-10 3ª edición 2010-06-15	66,51	%
2016	06	30	Carbono Fijo	ASTM D3172-13	16,29	%



## Anexo 4

### Diseño experimental en STATGRAPHIC: datos relacionados

	<i>Observados</i>	<i>Ajustados</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
<i>Fila</i>	<i>Valores</i>	<i>Valores</i>	<i>para Media</i>	<i>para Media</i>
1	16,2479	16,2478	16,2477	16,2478
2	16,149	16,149	16,149	16,149
3	16,2047	16,2046	16,2045	16,2046
4	16,1922	16,1922	16,1922	16,1922
5	16,2974	16,2974	16,2974	16,2974
6	16,087	16,087	16,087	16,087
7	16,2542	16,2542	16,2542	16,2542
8	16,1985	16,1985	16,1985	16,1986
9	16,1427	16,1426	16,1425	16,1426
10	16,211	16,211	16,211	16,211
11	16,087	16,087	16,087	16,087
12	16,211	16,211	16,211	16,211
13	16,2974	16,2974	16,2974	16,2974
14	16,149	16,149	16,149	16,149
15	16,1922	16,1922	16,1922	16,1922
16	16,2542	16,2542	16,2542	16,2542
17	16,1985	16,1985	16,1985	16,1986
18	16,087	16,087	16,087	16,087
19	16,211	16,211	16,211	16,211
20	16,2974	16,2974	16,2974	16,2974
21	16,149	16,149	16,149	16,149
22	16,1922	16,1922	16,1922	16,1922
23	16,2542	16,2542	16,2542	16,2542
24	16,1985	16,1985	16,1985	16,1986
25	16,087	16,087	16,087	16,087
26	16,211	16,211	16,211	16,211
27	16,2974	16,2974	16,2974	16,2974
28	16,149	16,149	16,149	16,149
29	16,1922	16,1922	16,1922	16,1922
30	16,2542	16,2542	16,2542	16,2542
31	16,1985	16,1985	16,1985	16,1986
32	16,087	16,087	16,087	16,087
33	16,211	16,211	16,211	16,211
34	16,2974	16,2974	16,2974	16,2974
35	16,149	16,149	16,149	16,149
36	16,1922	16,1922	16,1922	16,1922
37	16,2542	16,2542	16,2542	16,2542
38	16,1985	16,1985	16,1985	16,1986
39	16,087	16,087	16,087	16,087
40	16,211	16,211	16,211	16,211

#### Reporte del software

Esta tabla contiene información acerca de los valores de Poder Calorífico generados usando el modelo ajustado. La tabla incluye:

- (1) los valores observados de Poder Calorífico (si alguno)
- (2) el valor predicho de Poder Calorífico usando el modelo ajustado
- (3) intervalos de confianza del 95,0% para la respuesta media