

**ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE TABLEROS AGLOMERADOS A PARTIR DE
RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE FIBRA DE FRUTO DE PALMA DE ACEITE Y
CASCARA DE MAZORCA DE CACAO USANDO UNA RESINA TERMOESTABLE.**

DIANA STEFAN VILLAMIZAR FUENTES

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Química

Pamplona, Colombia

2017

**ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE TABLEROS AGLOMERADOS A PARTIR DE
RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE FIBRA DE FRUTO DE PALMA DE ACEITE Y
CASCARA DE MAZORCA DE CACAO USANDO UNA RESINA TERMOESTABLE.**

DIANA STEFAN VILLAMIZAR FUENTES

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de: Ingeniera

Química

Director

BLADIMIR RAMON VALENCIA

Ingeniería de Materiales Ph.D

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Química

Pamplona, Colombia

2017

Dedicatoria

...A Dios y a ella, en quien siempre he creído que es mi ángel de la guarda...

Por permitirme ser quien soy, por apoyarme en esta decisión hace 5 años y por creer siempre en mí; a Doña Flor y Don Miguel (los mejores padres que la vida me pudo dar).

A Lucia y a Sebastián, por ser mis hermanos y mis amigos, por aguantar cada momento de soberbia pero ante todo por estar en los más felices.

A la mejor nona y a los mejores tíos del mundo; a ellos solo gratitud infinita.

¡Ahora sí sé que todo se puede!

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Pamplona y al programa de Ingeniería Química por todo lo aprendido a lo largo de este tiempo, solo espero poder retribuir todo ese aprendizaje y ser un gran aporte para la sociedad.

A mi director de tesis. Ph.D Bladimir Ramón Valencia por creer en mí desde hace dos años, por permitirme investigar, por los viajes y por la paciencia que me ha sabido tener.

Al profesor William Mora por su disposición y ayuda, al Ingeniero Holger Cagua por el apoyo en las pruebas mecánicas y al Ingeniero Brayan Conde por la construcción de la máquina para elaborar los tableros aglomerados.

Al grupo de Biocalorimetría de la Universidad de Pamplona por la realización de las pruebas de termogravimetría de los materiales.

A la empresa COOPAR por el suministro de la fibra de palma para realizar este trabajo.

A Ana Arévalo y Andrés Díaz, estudiantes de postgrado y con quienes trabajo de la mano materializando nuestras ideas.

A Jhon Jairo Maldonado y Yolanda Carvajal; por el café, recursos físicos y humanos necesarios y el acompañamiento durante la realización de este trabajo en el laboratorio de operaciones unitarias.

RESUMEN

En el presente trabajo se elaboraron tableros aglomerados de partículas a partir de residuos agroindustriales de fibra de fruto de palma de aceite y cascara de mazorca de cacao, los cuales representan un problema en la cadena productiva del sector palmicultor y cacaotero. Se realizó una caracterización fisicoquímica a los residuos basada en normativa internacional, con el fin de relacionar los valores obtenidos con las propiedades finales de los tableros aglomerados. Igualmente, se establecieron variables dentro del proceso de elaboración de los tableros como la elección del tamaño de partícula de la cascara de mazorca de cacao, la presión de compresión y la cantidades de resina/fibra, posteriormente se realizaron pruebas mecánicas para determinar la calidad del producto final.

Los resultados obtenidos respecto al módulo de elasticidad demuestran que los tableros aglomerados a partir de fibra de fruto de palma de aceite son mejores respecto a los elaborados con cascara de mazorca de cacao. Los parámetros de calidad como absorción de agua y el hinchamiento en agua después de 24 horas, demuestran que a partir de la fibra de fruto de palma de aceite (12%) se pueden elaborar tableros aglomerados con especificaciones similares o mejores respecto a los elaborados con otros residuos lignocelulósicos (cascarilla de arroz; 16%). Como resultado final de la presente investigación se concluye que a partir de los residuos agroindustriales estudiados, es posible obtener un producto con propiedades mecánicas muy cercanas a los tableros aglomerados convencionales fabricados con residuos de este tipo, proponiendo este sistema (residuo/resina) como una alternativa ecológica y de bajo costo para la industria maderable.

ABSTRACT

In the present work, agglomerated particle boards were elaborated from agroindustrial residues of oil palm fruit fiber and cocoa shell husk, which represent a problem in the production chain of the palm and cocoa sector. A physicochemical characterization of the residues was carried out based on international regulations, in order to relate the values obtained with the final properties of the agglomerated boards. Likewise, variables were established within the process of elaboration of the boards such as the choice of particle size of the cocoa shell, compression pressure and resin / fiber quantities, after which mechanical tests were carried out to determine the quality of the Final product.

The results obtained with respect to the modulus of elasticity show that the agglomerated boards from oil palm fruit fiber are better than those made with cocoa shell. Quality parameters such as water absorption and swelling in water after 24 hours show that from the oil palm fruit fiber (12%), agglomerated boards with similar or better specifications can be produced with respect to those made with Other lignocellulosic residues (rice husks, 16%). As a final result of the present investigation it is concluded that from the agroindustrial residues studied, it is possible to obtain a product with mechanical properties very close to the conventional agglomerated boards made with residues, proposing this system (residue / resin) as an ecological alternative and of low cost for the timber industry.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	15
2. JUSTIFICACIÓN.....	17
3. MARCO TEORICO.....	20
3.1. Residuos agroindustriales en Colombia	20
3.1.1. Generalidades	20
3.1.2. Agroindustria en Colombia	20
3.2. Cacao (<i>Theobroma Cacao L.</i>).....	23
3.2.1. Generalidades	23
3.2.2. Producción mundial de cacao.....	24
3.2.3. Producción de cacao en Colombia	26
3.2.4. Desechos que genera el cultivo de cacao	28
3.3. Palma de aceite (<i>Elaeis Guineensis</i>).....	30
3.3.1. Generalidades	30
3.3.2. Producción mundial de aceite de palma.....	31
3.3.3. Producción de aceite de palma en Colombia	32
3.3.4. Desechos que genera el cultivo de palma de aceite	34
3.4. Características fisicoquímicas los residuos lignocelulósicos	36
3.4.1. Celulosa.....	38
3.4.2. Hemicelulosa.....	38

3.4.3.	Lignina	39
3.4.4.	Ceras, grasas, resinas y cenizas	40
3.5.	Tableros aglomerados	41
3.5.1.	Clasificación de los tableros aglomerados	41
3.5.2.	Proceso de producción de tableros aglomerados	45
3.5.3.	Resinas usadas en el proceso de aglomeración de tableros de partículas	46
4.	ANTECEDENTES REPORTADOS EN LA LITERATURA DEL USO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES	48
5.	OBJETIVOS.....	54
5.1.	Objetivo general	54
5.2.	Objetivos específicos	54
6.	PARTE EXPERIMENTAL.....	55
6.1.	Muestreo	55
6.2.	Equipos y materiales.....	57
6.3.	Preparación de la muestra.....	58
6.4.	Caracterización química de los residuos	59
6.5.	Caracterización física de los residuos.....	64
6.6.	Elaboración de tableros aglomerados	65
6.6.1.	Preparación del residuo particulado.	66
6.6.2.	Mezcla del residuo con resina de poliéster-insaturado.....	67
6.6.3.	Prensado	70
6.7.	Propiedades físico-mecánicas de los tableros aglomerados	71
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	76
7.1.	Caracterización físico-química de los residuos lignocelulósicos.	76
7.1.1.	Caracterización química.....	76

7.1.2.	Caracterización física	86
7.2.	Elaboración de tableros aglomerados	91
7.3.	Caracterización físico-mecánica.....	97
7.3.1.	Caracterización mecánica.....	98
7.3.2.	Caracterización física	113
7.4.	Diagramas de proceso de la elaboración de tableros aglomerados de CMC y FFPA. .	131
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	133
8.1.	Conclusiones.....	133
8.2.	Recomendaciones	134
9.	BIBLIOGRAFIA.....	135
10.	ANEXOS.....	143

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipo de residuo agrícola y su origen	22
Tabla 2. Taxonomía del Cacao (<i>Theobroma Cacao L.</i>)	23
Tabla 3. Producción mundial de cacao por países para el año 2012/2013	25
Tabla 4. Participación de los Departamentos más representativos del cultivo de cacao en Colombia	27
Tabla 5. Taxonomía de la palma de Aceite (<i>Elaeis Guineensis</i>)	30
Tabla 6. Producción mundial de aceite de palma cosecha 2015/2016	32
Tabla 7. Composición química de algunos residuos lignocelulósicos	37
Tabla 8. Preparación de mezclas para la elaboración de tableros aglomerados	69
Tabla 9. Análisis estadístico composición química FFPA	80
Tabla 10. Comparación de los datos de composición química para la FFPA	81
Tabla 11. Análisis estadístico composición química CMC	82
Tabla 12. Comparación de los datos de composición química para la CMC	84
Tabla 13. Análisis Estadístico Descriptivo solubilidad NaOH 1%	85
Tabla 14. Análisis estadístico descriptivo humedad FFPA	87
Tabla 15. Densidad aparente de los materiales	90
Tabla 16. Cantidad de residuos a utilizar ensayo 1	92
Tabla 17. Cantidad de residuos a utilizar ensayo 2	94
Tabla 18. Parámetros para la elaboración de tableros aglomerados	97
Tabla 19. Análisis estadístico de MOR para selección de tamaño de partícula de CMC	98
Tabla 20. Análisis estadístico MOR (MPa) para tableros aglomerados de CMC	101
Tabla 21. MOR de tableros aglomerados elaborados con residuos lignocelulósicos	103

Tabla 22. Análisis estadístico MOR (MPa) para tableros aglomerados de FFPA	104
Tabla 23. Análisis estadístico MOE (MPa) para tableros aglomerados de CMC	107
Tabla 24. Análisis estadístico MOE (MPa) para tableros aglomerados de FFPA	109
Tabla 25. MOE de tableros aglomerados elaborados con residuos lignocelulósicos.....	111
Tabla 26. Análisis estadístico de densidad para tableros aglomerados de CMC y FFPA.....	113
Tabla 27. Clasificación de tableros aglomerados según la densidad	114
Tabla 28. Análisis estadístico absorción de agua (%) tableros de CMC después de 2 horas.....	117
Tabla 29. Análisis estadístico absorción de agua (%) tableros de CMC después de 24 horas....	119
Tabla 30. Análisis estadístico absorción de agua tableros de FFPA después de 2 y 24 horas	120
Tabla 31. Absorción de agua después de 24 horas para algunos tableros aglomerados de residuos lignocelulósicos.....	123
Tabla 32. Análisis estadístico de hinchamiento (%) para tableros aglomerados de CMC.....	124
Tabla 33. Análisis estadístico de hinchamiento (%) para tableros aglomerados de FFPA	127
Tabla 34. Hinchamiento de tableros aglomerados	129

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Porcentajes de los cultivos representativos en Colombia	21
Gráfica 2. Árbol y fruto del cacao.....	24
Gráfica 3. Área cosechada y producción de cacao en Colombia	28
Gráfica 4. Cáscara de mazorca de cacao	29
Gráfica 5. Planta de palma de aceite	31
Gráfica 6. Área cosechada y producción de palme de aceite en Colombia	33
Gráfica 7. Subproductos de las plantas de beneficio de palma de aceite	35
Gráfica 8. Aprovechamiento de la fibra en el sector palmero colombiano en el 2008	36
Gráfica 9. Estructura de la celulosa.....	38
Gráfica 10. Estructura de la lignina.....	40
Gráfica 11. Tableros de partículas	42
Gráfica 12. Tableros contrachapados	43
Gráfica 13. Tableros de fibras	44
Gráfica 14. Proceso establecido de producción de tableros aglomerados	46
Gráfica 15. Planta de beneficio de palma de aceite	55
Gráfica 16. Estado de la cascara de mazorca de cacao en San Vicente de Chucurí	56
Gráfica 17. Ubicación zona de muestreo.	56
Gráfica 18. Metodología preparación de la muestra	58
Gráfica 19. Metodología propuesta para la elaboración de tableros aglomerados	65
Gráfica 20. Prensa hidráulica	70
Gráfica 21. Equipo para la caracterización mecánica	73

Gráfica 22. Ensayo de flexión estática.....	74
Gráfica 23. Estado inicial de los residuos de CMC y FFPA.....	77
Gráfica 24. Recuperadora de materiales	78
Gráfica 25. Partículas de FFPA y de CMC posterior reducción de tamaño	78
Gráfica 26. Tamaño de partícula caracterización físico química.....	79
Gráfica 27. Contenido porcentual (%p/p) de los componentes químicos en FFPA.....	80
Gráfica 28. Contenido porcentual (%p/p) de los componentes químicos en CMC	83
Gráfica 29. Determinación de humedad de los residuos de FFPA y CMC.....	86
Gráfica 30. TGA/DTA para la FFPA.....	88
Gráfica 31. TGA/DTA para la CMC.....	89
Gráfica 32. Tablero aglomerado de FFPA prueba 1	93
Gráfica 33. Tablero aglomerado de CMC prueba 1	93
Gráfica 34. Tablero de CMC malla 40 elaborado con 4% de resina.....	95
Gráfica 35. Tablero de CMC y FFPA con 10% resina	96
Gráfica 36. MOR para selección de tamaño de CMC.....	99
Gráfica 37. MOR para tableros aglomerados de CMC variando la cantidad de resina	102
Gráfica 38. MOR para tableros aglomerados de FFPA variando la cantidad de resina.....	105
Gráfica 39. Comparación de MOR para varios tableros aglomerados.....	106
Gráfica 40. MOE para tableros aglomerados de CMC variando la cantidad de resina.....	108
Gráfica 41. MOE para tableros aglomerados de FFPA variando la cantidad de resina.....	110
Gráfica 42. Comparación de MOE para varios tableros aglomerados.....	112
Gráfica 43. Densidad de tableros aglomerados de CMC	115
Gráfica 44. Densidad de tableros aglomerados de FFPA	116
Gráfica 45. Muestras de tableros de CMC después de 2 horas en agua.....	118

Gráfica 46. Muestras de tableros aglomerados de CMC después de 24 horas	119
Gráfica 47. Absorción de agua de tableros aglomerados de CMC 2 y 24 horas después.	120
Gráfica 48. Muestras de tableros aglomerados de FFPA después de 2 horas	121
Gráfica 49. Absorción de agua de tableros aglomerados de FFPA 2 y 24 horas después.	122
Gráfica 50. Hinchamiento después de 2 y 24 horas para tableros aglomerados de CMC	126
Gráfica 51. Hinchamiento después de 2 y 24 horas para tableros aglomerados de FFPA.....	128
Gráfica 52. Hinchamiento después de 24 horas de algunos tableros aglomerados.....	130
Gráfica 53. Diagrama de proceso de elaboración de tableros aglomerados de CMC	131
Gráfica 54. Diagrama de proceso de elaboración de tableros aglomerados de FFPA	132

1. INTRODUCCION

Este trabajo se realizó dentro del área de fabricación de nuevos materiales soportados en el desarrollo sostenible, aprovechando los residuos agroindustriales de las cadenas productivas del cacao y de la palma de aceite en nuestro país.

Actualmente en el proceso del fruto de palma de aceite se generan varios subproductos de interés técnico y económico. Entre estos se puede nombrar las tusas o racimos vacíos, fibra resultante del prensado del fruto, el cuesco obtenido del rompimiento de la nuez, las cenizas producida por la quema de fibra y los lodos de fondo. (Ramirez, Silva, Garzón, & Yañez, 2011). En Norte de Santander para el año 2015 había un área sembrada de palma de aceite correspondiente a 24.744 Hectáreas con una producción de 63.832 toneladas de racimos de fruta fresca (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015) de las cuales aproximadamente 8.311 toneladas correspondían a la fibra de palma de aceite.

Respecto al cultivo del cacao, la cascara es considerada como un desecho del proceso agrícola de producción del cacao ya que representa entre un 70 y 75% del peso total del fruto de cacao (Daud et al., 2013), una parte de estos desechos son usados como abono para el mismo cultivo que genera una gran desventaja como proliferación de patógenos que afectan la producción. (Martínez, 2015). Santander en el año 2015 produjo 20.099 Toneladas de grano seco de cacao (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015), quedando 66.997 toneladas de residuos de cascara.

Contando con la cantidad de residuos lignocelulósicos dentro de las cadenas productivas del cacao y la palma de aceite se busca dar solución a la problemática de disposición de estos residuos, por

lo tanto, en la presente investigación se elaboraron y evaluaron tableros aglomerados a partir de estos residuos usando resina de poliéster como adhesivo de las partículas.

A partir de la elaboración y evaluación de la calidad de los tableros aglomerados se generaran ingresos a los productores y solucionará la problemática del manejo de subproductos, los cuales se proyectarían como sustitutos de los tableros aglomerados comercializados actualmente que son producidos a partir de bosques maderables.

2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente encontramos una serie de sucesos tales como la variación en los precios del petróleo y el agotamiento de las reservas mundiales de este recurso, tala indiscriminada de bosques, la pérdida de la biodiversidad, el calentamiento global, conflictos sociales en el sector rural, entre otros; los cuales impactan negativamente al ser humano y su interacción en el medio; por lo tanto, se nos presentan unos retos y exigencias ambientales que nos obligan a innovar y generar nuevos desarrollos que permitan el aprovechamiento eficiente de los recursos naturales y presentar alternativas de desarrollo sostenible en los sistemas de producción actuales.

Respecto a la palma de aceite, Colombia es el primer productor de América latina con cerca de 476.000 Hectáreas sembradas y el sexto a nivel mundial, se estima que cerca de las 5 millones de toneladas son procesadas anualmente por las plantas extractoras de aceite y solo 1 millón de toneladas corresponde al aceite crudo de palma. Las anteriores cifras nos permiten dimensionar el volumen de residuos orgánicos que se genera en esta prospera agroindustria, considerando como biomasa residual principalmente: el cuesco, la tusa y la fibra, que representan el 5.35%, 20.94%, y el 13.02% RFF (racimos de fruto fresco); y si actualmente se procesan 5 millones de toneladas de fruto; se puede afirmar que hay una producción de biomasa cerca del 39% sobre RFF; equivalente a 2 millones de toneladas anuales de biomasa o residuos agroindustriales, distribuidos en 1 millón de toneladas de tusa, 650 mil toneladas de fibra y 250 mil toneladas de cuesco.

A pesar de ser la agroindustria de palma de aceite en Colombia unos de los principales renglones del sector económico del país, no se cuenta con importantes avances sobre el aprovechamiento de los residuos que se generan durante el primer eslabón de la cadena, es decir, en el proceso de extracción de aceite crudo, sin embargo en la actualidad se vienen adelantando diversos usos para

estos residuos, siendo el principal la producción de compost, principal alternativa adoptada para el uso y aprovechamiento de los mismos; seguido por el reintegro de la tusa a las plantaciones, algunos usos para consumo animal, por su poder calorífico como carbón, otros como pulpa celulósica, productos químicos, aislantes térmicos es decir todo lo que se puede definir como refinerías; dependiendo de la ruta que se adopte para transformar ya sea térmica, biológica o físico-química; existiendo algunas tecnologías ya probadas, otras que se encuentran en fase de escalamiento industrial y otras que requieren más investigación según afirma CENIPALMA (Centro de Investigación en Palma). (García, Jesus Alberto; Garcia, Manuel; Das, 2009)

En el caso del cacao la situación no es diferente. La mayor producción de cacao está en África con cerca del 71,1% de producción y el último año en Colombia se produjo 54.120 toneladas de cacao. Los residuos orgánicos del cacao lo constituye básicamente la corteza del cacao o cáscara, que hace parte del 77% del fruto. Por lo tanto, se calcula que se cuenta con alrededor de 41672 toneladas de residuos para la producción del año anterior en Colombia. Principalmente, esta clase de desechos no son reutilizados ocasionando un impacto medioambiental de gran envergadura y un foco de enfermedades para los agricultores. Este desecho, además, causa desprendimiento de gas metano, que se produce de forma natural por la descomposición de sustancias orgánicas en ambientes pobres en oxígeno, convirtiéndose en un agente responsable del calentamiento global más potente que el mismo dióxido de carbono. De hecho, tiene un potencial 62 veces mayor que este último en generar dicho efecto. (Ruiz Bolaños, 2011)

Los residuos orgánicos significan para nuestro planeta y para el hombre mismo una pérdida enorme de recursos, tanto materiales como energéticos. Las grandes cantidades de residuos indican el grado de ineficiencia de los procesos de desarrollo y crecimiento del hombre y de sus hábitos de

consumo que son insostenibles. Los volúmenes de residuos generados por la industria y por la sociedad muestran el grado de eficiencia con que esta utiliza las materias primas y los productos.

La realización de éste proyecto espera impactar positivamente los sectores de la agroindustria, mejorar la economía de los cultivadores de cacao y de palma de aceite y reducir la contaminación ya que se consumiría menor cantidad de madera y se aprovecharán materiales orgánicos que se va a seguir produciendo en el país. De esta manera se propone desarrollar una investigación que proponga un óptimo y eficiente aprovechamiento de estos recursos disponibles, como una alternativa limpia que permita sustituir materiales como la madera, siendo esta una industrias que en su explotación impacta considerablemente el medio ambiente (Clotario, Cecilia, Alcides, & Galindo, n.d.); y desarrollar un nuevo material aglomerado sostenible ambientalmente y de alto valor agregado, representado en: la generación de un mayor ingreso económico para el sector, generación de empleo, disminución de uso de materias primas tradicionales como la madera y, generación de conocimiento en la comunidad científica y del sector.

3. MARCO TEORICO

3.1. Residuos agroindustriales en Colombia

3.1.1.Generalidades

Los residuos se pueden definir como los derivados de actividades de producción y consumo que no han alcanzado ningún valor económico. Aparte, se pueden definir como cualquier sustancia u objeto del cual se desprende su poseedor o que no tiene utilidad o valor alguno. (Serrato Monroy & Lesmes Cepeda, 2016)

Los residuos agroindustriales se encuentran en estado sólido o líquido, se generan a partir del consumo directo de productos agrícolas primarios o de su industrialización, y que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero que son susceptibles al aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social.(Saval, 2012)

La agroindustria actualmente abarca una gran cantidad de procesos de la agricultura, el desarrollo de esta industria conlleva a la generación de residuos. En los procesos productivos del sector de los alimentos, además del producto deseado hay subproductos, residuos y productos fuera de norma. (Yepes, Naranjo, & Sánchez, 2008)

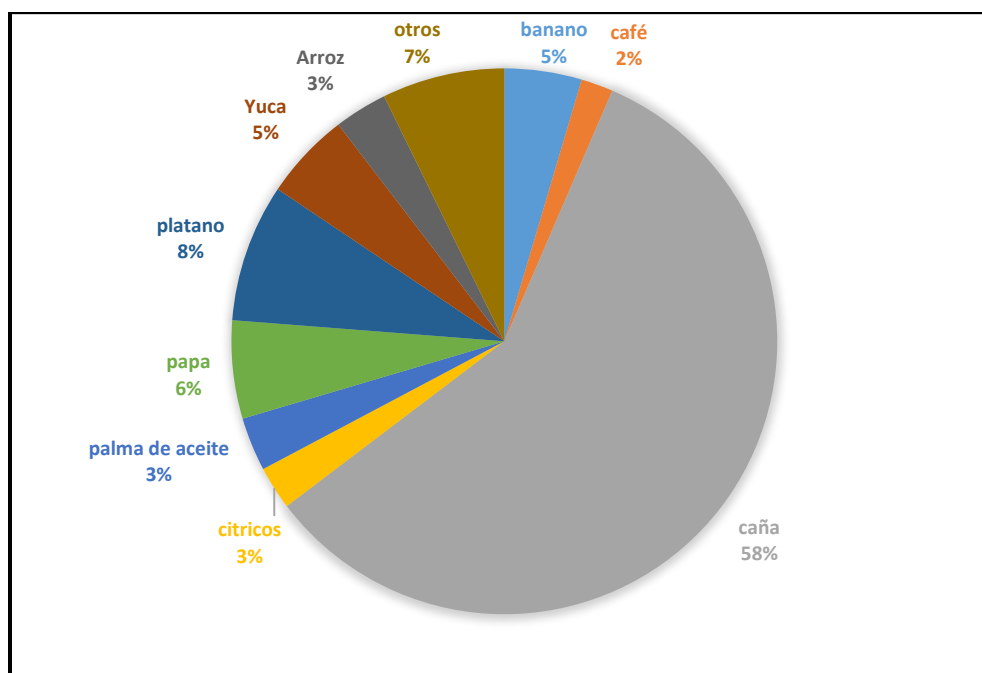
3.1.2.Agroindustria en Colombia

En Colombia, como en la mayoría de países Latinoamericanos, el sector agrícola ha sido la base y el impulso de su desarrollo económico, al facilitar la mano de obra para otros sectores,

la actividad agropecuaria representa en la actualidad alrededor del 7% del PIB total del país.(Romero Alvarez, 2012)

Los cultivos más representativos del país son: la caña de azúcar, el plátano, la papa, la yuca, el banano, la palma de aceite, el arroz, los cítricos y el café. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015)

Gráfica 1. Porcentajes de los cultivos representativos en Colombia



Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética.

Colombia por ser un país de gran vocación agrícola y debido a su situación geográfica cuenta con una gran cantidad de desechos orgánicos provenientes de diferentes etapas productivas agroindustriales que en muchos casos no pueden comercializarse por su baja calidad o la falta de un uso apropiado.

El tipo de residuos de cada cultivo, al mismo tiempo se relaciona con el origen dependiendo de; si son de cultivos de Residuos Agrícolas Industriales (RAI) o Residuos Agrícolas de

Cosecha (RAC), para algunos de los cultivos representativos del país se puede observar en la tabla 1, de forma más detallada el tipo de residuo de cada cultivo, relacionada con el origen:

Tabla 1. Tipo de residuo agrícola y su origen

Cultivo	Tipo de Residuo	Origen del Residuo
Palma de aceite	Cuesco	RAI
	Fibra	
	Raquis de palma	
Caña de azúcar	Hojas-cogollo	RAC
	Bagazo	RAI
Café	Pulpa	RAI
	Cisco	
	Tallos	RAC
Arroz	Tamo	RAC
	Cascarilla	RAI
Banano	Raquis de banano	RAC
	Vástago de banano	
	Banano de rechazo	RAI
Plátano	Raquis de plátano	RAC
	Vástago de plátano	
	Plátano de rechazo	RAI

Fuente:<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3687/1/Documento%20final%20Metodolog%C3%ADa%20Potencial%20Energ%C3%A9tico%20Biomasa.pdf>

3.2. Cacao (*Theobroma Cacao* L.)

3.2.1. Generalidades

Theobroma cacao L. es un árbol pequeño pero económicamente importante. Es de hoja perenne, 4-8 m de alto, nativo de la región tropical de las Américas. (Rusconi & Conti, 2010).

La taxonomía del cacao se muestra a continuación.

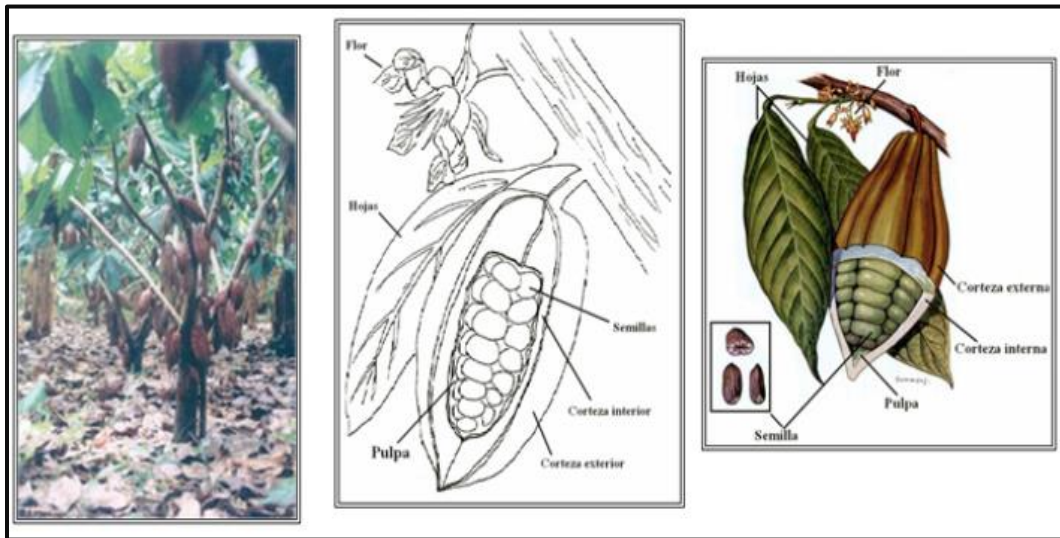
Tabla 2. Taxonomía del Cacao (*Theobroma Cacao* L.)

Reino	Plantae
Subreino	Tracheobionta
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Dilleniidae
Orden	Malvales
Familia	Malvaceae
Subfamilia	Byttnerioideae
Tribu	Theobromeae
Género	<i>Theobroma</i>
Especie	<i>T. cacao</i> L.

Fuente: <http://www.theplantlist.org/tpl1.1/record/kew-2519807>

El árbol de cacao es una planta originaria de la cuenca del Amazonas que se extendió hasta el sur del actual México por las rutas comerciales que mantenían las diferentes civilizaciones aborígenes, es un árbol que necesita de humedad y de calor, requiere sombra, protección del viento y un suelo rico y poroso. Esta planta crece a una altura de 1400 msnm. El terreno debe ser rico en nitrógeno, magnesio y en potasio, y el clima húmedo, con una temperatura entre los 20°C y los 30°C. (Dias, Luiz Antônio dos Santos, & Kageyama, 1997)

Gráfica 2. Árbol y fruto del cacao



Fuente:<http://www.fedecacao.com.co/portal/index.php/es/2015-04-23-20-00-33/nuevas-galerias?start=12>

Producción mundial de Cacao

3.2.2. Producción mundial de cacao

El cacao es uno de los frutos con mayor presencia en los mercados internacionales, a nivel mundial, no existen datos exactos sobre el área cacaotera sembrada, pero algunas estimaciones datan que hay cerca de 6,8 millones de hectáreas. África tendría cerca del 73% de las áreas sembradas, América el 18% y Asia el 9%. Por requerimientos geográficos el cacao se cultiva en países de la zona ecuatorial y a pesar de que es un cultivo de origen Americano la mayor producción de este cultivo se encuentra en África.(Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2013) Las cifras a nivel mundial para el año cacaotero 2012/2013 se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Producción mundial de cacao por países para el año 2012/2013

País	Producción (Miles de toneladas)
Camerún	225,0
Costa de marfil	1474,0
Ghana	820,0
Nigeria	220,0
Otros países de África	85,0
Brasil	195,0
Colombia	45,0
Rep. Dominicana	60,0
Ecuador	185,0
Perú	60,0
Otros países de América	61,4
Indonesia	450,0
Malasia	7,0
Nueva Guinea	45,0
India	15,0
Otros países de Asia y Oceanía	17,1

Fuente:http://www.fedecacao.com.co/site/images/recourses/pub_doctecnicos/fedecacao-pub-doc_05B.pdf

En el año cacaotero 2012/2013 África produjo el 71,25%, Asia y Oceanía el 13,5% y en América el 15,3% del cacao. Solo unos pocos países son los que abarcan la producción de cacao a nivel mundial y su destino es hacia los países industrializados.

3.2.3. Producción de cacao en Colombia

El sistema de producción del cacao en Colombia, tradicionalmente ha sido una explotación de economía campesina, su importancia radica en el gran consumo de la materia prima para la elaboración de productos de la industria de la confitería y algunos excedentes exportables, originando divisas para el País. En su explotación intervienen más de 25.000 familias en forma directa, donde el 90% de la población corresponde a pequeños agricultores (Aranzazu Hernandez, Martínez Guerrero, Palencia Calderon, Coronado, & Rincon Guarin, 2009)

El área sembrada en Colombia no se conoce con exactitud, pero las estimaciones reportadas por Fedecacao indican que estas han venido incrementando y se calcula que para los próximos años se logren tener aproximadamente 150.000 Hectáreas sembradas de cacao. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2013).

Los departamentos que tienen la mayor participación para el año 2013 en la producción nacional de cacao son: Santander, Arauca, Norte de Santander, Antioquia, Tolima y Nariño, las cifras se muestran en la tabla 4.

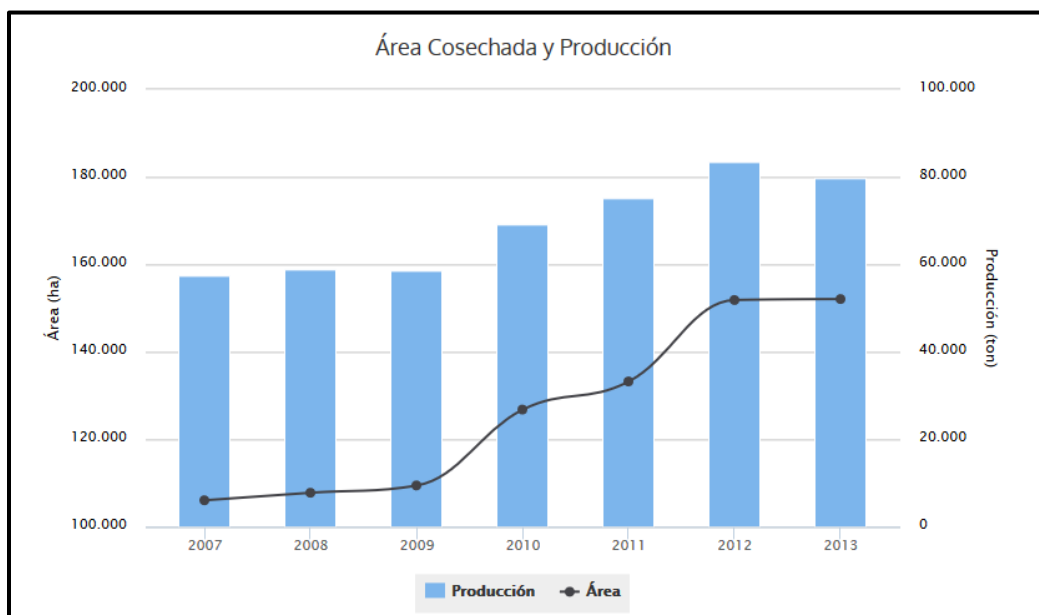
Tabla 4. Participación de los Departamentos más representativos del cultivo de cacao en Colombia

Departamento	Área Cosechada (Hectáreas)	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/ha)	Participación Producción Nacional (%)
Norte de Santander	17.001,00	8.315,20	0,49	10,42
Arauca	14.670,00	8.802,00	0,60	11,04
Santander	39.168,92	21.570,81	0,55	27,04
Antioquia	13.777,00	7.723,07	0,56	9,68
Tolima	9.135,00	4.848,83	0,53	6,08
Nariño	13.636,00	4.548,40	0,33	5,70

Fuente: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>

El área sembrada en los últimos ocho años ha ascendido 35%, pasando de 115.800 hectáreas en 2007 a 157.000 has en 2013. La producción de cacao ascendió 2,12% respecto al año anterior, pasando la producción de 46.739 toneladas en 2012 a 47.732 en 2014.

Gráfica 3. Área cosechada y producción de cacao en Colombia



Fuente: <http://www.agronet.gov.co>

En Colombia se ha presentado una variación en el área sembrada de cacao entre 2011 y 2013 del 11.8%, que evidencia una buena respuesta por parte de los Cacaoteros Colombianos frente al mercado nacional e internacional. Los estímulos del gobierno hacia los productores y el alza en los precios internacionales han contribuido a mantener la confianza en el sector, a pesar de la coyuntura interna y las protestas de los productores en 2013 (DINERO, 2015)

3.2.4. Desechos que genera el cultivo de cacao

Los desechos presentes en el cultivo del cacao son residuos de biomasa, resultantes de los cultivos agrícolas y de la industria de la transformación. Estos residuos son en la mayoría de composición orgánica y por provenir de seres vivos son renovables, además están constituidos mayoritariamente por agua, celulosa y lignina, se generan en grandes

cantidades y tiene una alta dispersión espacial. Su proceso de biodegradación es lento y al incrementarse la producción agrícola, se ha desequilibrado su ciclo natural dando lugar a problemas sanitarios y paisajísticos, además de ser un despilfarro de recursos potenciales. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2013).

El fruto del cacao está conformado por un 30% de fruto carnoso, al cual se le hace un respectivo secado para su posterior comercialización como materia prima y el otro 70% del fruto está formado por la mazorca o corteza exterior. (Ruiz Bolaños, 2011). Por lo tanto se puede calcular que aproximadamente para el año 2013 con 46.739 Toneladas producidas de grano, 109.057,66 toneladas corresponden a cascara de mazorca de cacao.

Gráfica 4. Cáscara de mazorca de cacao



Fuente: <http://www.stuartxchange.org/Kakaw>

3.3. Palma de aceite (*Elaeis Guineensis*)

3.3.1. Generalidades

La palma de aceite africana es una monocotiledónea diploide perteneciente a la familia Arecaceae, sub-familia Coryphoideae, género *Elaeis* y especie *E. Guineensis*. Es una especie perenne, monoica, alógama (Corley & Tinker, 2003). Ver tabla 5.

Tabla 5. Taxonomía de la palma de Aceite (*Elaeis Guineensis*)

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Subclase	Commelinidae
Orden	Arecales
Familia	Arecaceae
Subfamilia	Coryphoideae
Género	<i>Elaeis</i>
Especie	<i>Elaeis Guineensis</i>

Fuente: www.theplantlist.or

El origen de la palma de aceite se ubica en las costas del Golfo de Guinea en el África occidental. Se introdujo a la América Tropical por los colonizadores y comerciantes de esclavos portugueses, en los viajes transatlánticos del siglo XVI. Se estableció en San Salvador Brasil (Nereida & Galvis, 2011)

La distribución geográfica de la palma de aceite se encuentra en la franja ecuatorial y es ampliamente cultivada por su fruto como fuente de aceite. Se cree que su origen está en las tierras bajas tropicales de África occidental y central, extendiéndose desde Senegal hasta Angola. (Corley & Tinker, 2003). Posteriormente, el desarrollo de la palma se dio junto con

el establecimiento de organizaciones de investigación y el establecimiento de colecciones de germoplasma con materiales de las regiones vecinas, el cual se convierte en la base genética para los programas de mejoramiento del mundo. En el 2006, la palma de aceite se convierte en el primer cultivo de oleaginosas en producción superando a la soya. (Cochard, Adon, Rekima, & Billotte, 2009). De la planta de la palma de aceite se obtiene el aceite de palma, este es el aceite vegetal más popular en el mundo, convirtiéndose recientemente en el aceite vegetal más producido y consumido.

Gráfica 5. Planta de palma de aceite



Fuente: <http://www.thinoil.net/cpo-es.html>

3.3.2. Producción mundial de aceite de palma

La producción mundial de aceite de palma y de aceite de palmiste se ha incrementado rápidamente en las últimas décadas, desde unos 2 millones de toneladas métricas (“tonnes”) en 1961 a más de 56 millones de toneladas en 2012. Los principales impulsores de este crecimiento han sido la alta productividad de las palmas oleaginosas, el desarrollo de

aplicaciones que trascienden su tradicional uso comestible y la producción de biodiesel. El Banco Mundial estima que el consumo internacional se duplicará en 2020.(Conferencia Mundial del Sector palma, 2015)

Asia es el principal productor de aceite de palma, debido a que Indonesia y Malasia responden por aproximadamente el 83% de la producción total mundial. África y las Américas registran un crecimiento absoluto en la última década (2000- 2011): las Américas, con un cambio porcentual de 94,63 en dicho periodo, en tanto que África aumentó casi a la mitad en el mismo lapso (42,69%).(Fedepalma, 2013). El valor cosechado en el año 2015/2016 y cuyo valor está en toneladas métricas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6. Producción mundial de aceite de palma cosecha 2015/2016

País	Producción de aceite de palma (Toneladas métricas)	Participación mundial (%)
Indonesia	32.000.000	54,38
Malasia	17.700.000	30,08
Otros	4.799.000	8,16
Tailandia	2.100.000	3,57
Colombia	1.273.000	2,16
Nigeria	970.000	1,65

Fuente: Autor. Datos obtenidos de <https://www.produccionmundialaceitedepalma.com/previous-year.asp>

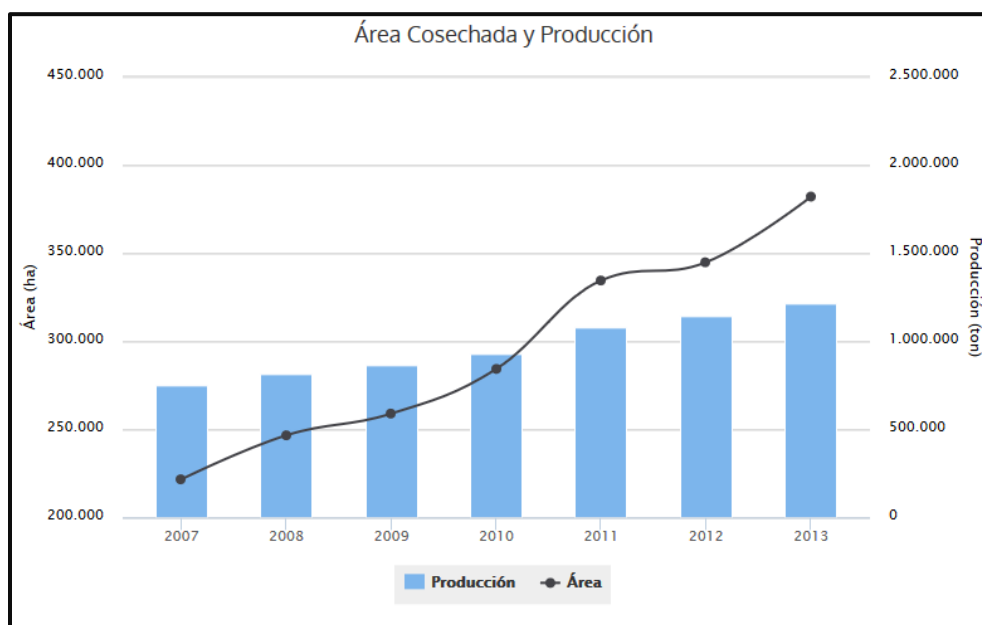
3.3.3. Producción de aceite de palma en Colombia

El cultivo comercial de palma de aceite inicia en Colombia hacia el año 1945, estando a la fecha en constante expansión. Para la década de 1960 existen unas 18.000 Hectáreas en

producción, y décadas después, en el año 2012, el área sembrada es de 452.435 Hectáreas con un crecimiento de 5.9% respecto al año anterior. Colombia se ubica en el año 2010 como el primer productor de América Latina y el quinto del mundo con un 1.6% de la producción mundial. (Patricia, Mart, & Santamar, 2014) Durante el año 2015 la producción de aceite de palma creció un 15% comparado con el año 2014.

De acuerdo con el Ministerio de Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial y Fedepalma, del cultivo de palma existen unas 365.000 hectáreas distribuidas en 16 departamentos y 106 municipios, los cuales conforman cuatro zonas palmeras: zona Norte (Norte del Cesar, Atlántico, Guajira, Norte de Bolívar, Córdoba, Urabá Antioqueño y Sucre), Zona Central (Santander, Norte de Santander, Sur del César, Sur de Bolívar), Zona Oriental (Meta, Cundinamarca, Casanare, Caquetá), Zona Occidental (Nariño, Cauca).

Gráfica 6. Área cosechada y producción de palme de aceite en Colombia



Fuente: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>

Al cierre de 2015 la producción de aceite de palma crudo fue de 1.272.522 toneladas, mostrando una variación del 14,7 % con respecto a las 1.109.707 toneladas obtenidas en 2014, lo que indica un aumento interanual en 162.814 toneladas. Esta tasa de crecimiento supera el promedio anual de variación de los últimos cinco años, el cual se ubicó en 11,3 %, reflejando el crecimiento constante y la consolidación del sector. Por su parte, la dinámica productiva durante el cuarto trimestre de 2015 fue de 285.269 toneladas, que comparadas con las 333.509 toneladas obtenidas entre julio y septiembre del mismo año, muestra una contracción del 14,5%. (Perez Rincon, 2014)

3.3.4. Desechos que genera el cultivo de palma de aceite

En el proceso de beneficio del fruto de palma de aceite se generan varios subproductos de interés técnico y económico tanto para la planta de beneficio como para el manejo agronómico del cultivo de palma de aceite. Entre ellos se pueden citar: (a) las tusas o racimos vacíos, (b) la fibra, (c) cuesco, (d) cenizas y (e) lodos de fondo. De la biomasa generada se destaca el uso de un alto porcentaje de fibra y cuesco como combustible en la caldera para producción de vapor y electricidad. Buena parte de la tusa se envía a campo como acondicionador del suelo en plantaciones de palma de aceite. (Ramirez et al., 2011)

Al buscar una oportunidad de aprovechamiento de los residuos, se hace necesaria la caracterización de estos para conocer su composición, calidad de componentes y cantidad que se genera, con esto se pueden definir las tecnologías más apropiadas para su aprovechamiento y posterior tratamiento. La industria del aceite de palma utiliza en 9% y el 91% restante es residuo. (Saval, 2012)

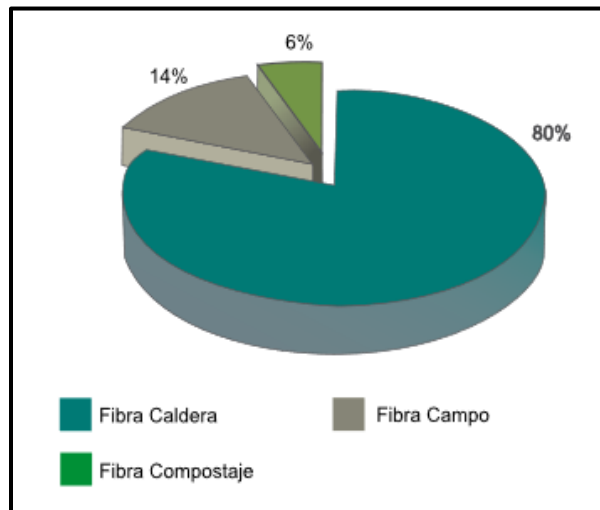
Gráfica 7. Subproductos de las plantas de beneficio de palma de aceite



Fuente: <http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/viewFile/1477/1477>

En las plantas de beneficio de las diferentes zonas palmera de Colombia, del total de la fibra producida solo el 80% se aprovecha como combustible para calderas, y el restante en otros usos, como la elaboración de compostaje (14%) y abono en las plantaciones (6%) (García, Cárdenas, & Yáñez, 2010). La fibra es el subproducto que más se aprovecha en las plantas de beneficio, especialmente, como combustible en calderas quedando un residuo de 1,57% de racimo de fruto fresco (RFF)

Gráfica 8. Aprovechamiento de la fibra en el sector palmero colombiano en el 2008



Fuente: (García et al., 2010)

3.4. Características fisicoquímicas los residuos lignocelulósicos

Los residuos lignocelulósicos están formados principalmente por:

- Celulosa
- Hemicelulosa
- Lignina

Aparte de estar formados por los tres componentes anteriormente nombrados, presentan otros compuestos de bajo peso molecular como:

- Solubles en agua o solventes orgánicos
- Proteínas
- Sales minerales (cenizas)

La composición química de los materiales varía según el tipo y el origen de la planta. Generalmente están compuestos entre un 60% y un 80% de celulosa y hemicelulosa respectivamente, y entre 5% y 20% de lignina, lo restante entre los demás componentes. (Vázquez & Vázquez, 2002)

En relación a la microestructura, las fibras naturales están formadas por microfibrillas de celulosa incrustadas en una matriz de lignina (amorfa) y hemicelulosa (semicristalina). A su vez, las microfibrillas de celulosa se encuentran fuertemente unidas entre sí por puentes de hidrógeno, por lignina y la presencia de hemicelulosas (pectina). Estas microfibrillas de celulosa están formadas por regiones de celulosa amorfa y cristalina. Ellas son las principales responsables de las propiedades mecánicas de las fibras naturales. (Morán, 2008)

Tabla 7. Composición química de algunos residuos lignocelulósicos

Fibra	Celulosa (%)	Lignina (%)	Pentosanos (%)	Cenizas (%)
Yute	57,0-58,0	21,0-26,0	18,0-21,0	0,5-1,0
Sisal	55,0-73,0	8,0-9,0	21,0-24,0	0,6-1,0
Bagazo De Caña	49,0-62,0	19,0-24,0	27,0-32,0	1,5-5,0
Bamboo	57,0-66,0	21,0-31,0	15,0-26,0	1,7-5,0
Maderas Duras	54,0-61,0	23,0-30,0	19,0-26,0	1,0
Maderas Suaves	53,0-62,0	26,0-34,0	7,0-14,0	1,0

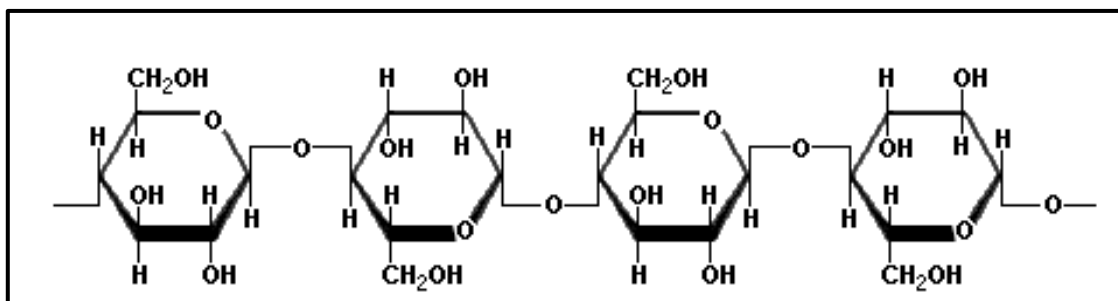
Fuente: (Morán, 2008)

3.4.1. Celulosa

La celulosa es el biopolímero más abundante en la tierra compuesto exclusivamente de moléculas de β -glucosa (desde cientos hasta varios miles de unidades), pues es un homopolisacárido. Como resultado de la geometría del enlace β , la molécula de celulosa forma una cadena lineal no ramificada. En la pared celular de la planta, estas moléculas forman microfibrillas compuestas de aproximadamente 30-36 cadenas de celulosa con hasta 14.000 moléculas de glucosa unidas por enlaces de hidrógeno. (Bauer & Iba, 2014)

Debido a la falta de ramificación y a la conformación única de grupos hidroxilo, las microfibrillas están dispuestas de una manera muy ordenada y ajustada, formando regiones "cristalinas" que son insolubles en agua. Esta configuración rígida es de gran importancia para la estructura celular y la resistencia de la pared celular de la planta. La celulosa cristalina resiste la rotura en condiciones moderadas. (Haghighi, Hossein, & Tabatabaei, 2013)

Gráfica 9. Estructura de la celulosa



Fuente: <http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohidratos2.html>

3.4.2. Hemicelulosa

Las hemicelulosas son polisacáridos más complejos que la celulosa, químicamente heterogéneos, constituidos por combinaciones de monosacáridos ramificados, amorfos y de

menor grado de polimerización; entre ellos se destacan las pentosas (D-xilosa, L-arabinosa), las hexosas (D-glucosa, D-manosa y D-galactosa), los ácidos urónicos (ácido D-glucourónico, ácido 4-O-metil-D-Glucourónico y ácido D-galactourónico) y las 6-deoxihexosas (L-ramnosa y L-fucosa). (Salazar & Pérez, 1998)

Las hemicelulosas actúan como matriz de soporte para las microfibrillas de celulosa, y constituyen el 25-35 % de ella, este porcentaje varía entre las especies vegetales. Las hemicelulosas, con estructura amorfa y ramificada, ejercen de almacén de sustancias de reserva en la pared celular, teniendo una función reguladora, estructural y, por tanto, de control de la expansión celular. Además, facilitan las uniones químicas entre la celulosa y la lignina, al unirse formando puentes de hidrógeno con los grupos $-CH_2OH$ de las cadenas de celulosa y los oxígenos glucosídicos de las hemicelulosas. (Ferrer Carrera, 2013)

3.4.3. Lignina

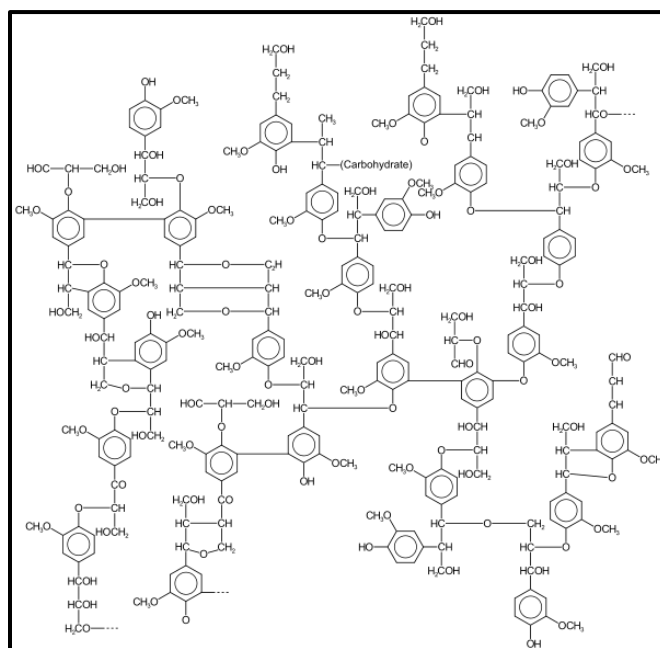
La lignina se define como un heteropolímero aromático tridimensional con estructura irregular formado por unidades de fenilpropano, unidas por diferentes tipos de enlaces, que varían entre las especies vegetales, situación en la planta, naturaleza, edad y condiciones de crecimiento de las células. (Haghighi et al., 2013)

La lignina también posee gran variedad de grupos funcionales que ofrecen centros activos para las interacciones químicas y biológicas. Los principales grupos funcionales de la lignina son: hidroxilos fenólicos, hidróxidos alifáticos, etilénicos, metoxilos, carbonilos, carboxilos y sulfonatos. Además, la lignina presenta propiedades termoplásticas las cuales son importantes en la unión fibra-fibra de los tableros de partículas, estas propiedades

explican en parte, porque la madera puede ser doblada y formada en presencia de vapor.

(Mejia Almeida, 2012)

Gráfica 10. Estructura de la lignina



Fuente: <https://quimicaambientalcoltec.wikispaces.com>

3.4.4. Ceras, grasas, resinas y cenizas

Los extraíbles comprenden una amplia variedad de compuestos no volátiles como grasas, ácidos grasos, alcoholes, resinas acidas, fitoesteroides y otros compuestos neutros. (Barroso Casillas, 2010) Su función principal es la protección de las plantas al evitar la pérdida de agua, el daño por insectos y los daños mecánicos en las células de la epidermis de las hojas y tallos, gracias a su baja degradabilidad. (Mejia Almeida, 2012)

Las cenizas son principalmente carbonatos y oxalatos; son aquellas que contribuyen a la regulación de la carga hidrostática. Las cenizas son los compuestos remanentes después de

una destrucción de la materia orgánica de las fibras a temperaturas de entre 575 a 850 °C.
(Mejia Almeida, 2012)

3.5. Tableros aglomerados

Un tablero aglomerado es un material del tipo *composite* que generalmente está conformado a partir de madera y adhesivos sintéticos, en el cual las propiedades físicas y mecánicas pueden ser más bajas que las de la madera. La demanda de estos productos aumenta cada año como una alternativa más económica en construcciones y muebles. (Capanema & Rojas, 2009) El tablero aglomerado es un material en forma plana el cual puede ser elaborado de pequeñas astillas de madera o algún otro material lignocelulósico fibroso, aglutinado por medio de un adhesivo bajo la acción de presión y calor durante un determinado tiempo.(Novoa Carrillo, 2005).

3.5.1. Clasificación de los tableros aglomerados

La organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) distingue tres tipos de tableros:

- **Tableros de partículas**

Los tableros de partículas se fabrican sometiendo a presión y calor las partículas de madera previamente rociadas con una resina sintética. Las partículas que pueden usarse son residuos de otros procesos productivos como viruta de cepillos, recortes de chapa,

astillas de aserraderos, así como productos preparados con maquinaria especial como filamentos, hojuelas o tiras de madera. (Contreras, Owen, Garay, & Contreras, 1999)

Los tableros pueden tener de 3 a 5 capas con partículas de distinto grueso dispuestas de modo que las capas con las partículas de mayor grueso queden al centro y las que tienen las partículas más finas queden en las caras. De esta manera se mejora la resistencia mecánica y la apariencia de los tableros. También es posible controlar en cierta medida la orientación de las partículas en las diferentes capas, obteniendo de esta forma tableros de gran resistencia mecánica que pueden ser usados para fines estructurales. (Novoa Carrillo, 2005)

Gráfica 11. Tableros de partículas



Fuente: <http://www.construyecuador.com/pisos-y-alfombras/madera-tratada-y-tableros.html>

- **Tableros contrachapados.**

Son tableros formados a partir de varias láminas o chapas de madera prensadas entre sí, generalmente quedando la dirección de la fibra de cada capa en forma alternada con la siguiente, para que el tablero logre condiciones mecánicas en ambos sentidos.

En comparación con los tableros de fibra y partículas, las condiciones que deben reunir las materias primas para la fabricación de chapa y tableros son mucho más rigurosas, presentado considerables variaciones según uso y calidad del panel. (Novoa Carrillo, 2005)

Gráfica 12. Tableros contrachapados



Fuente: <http://www.gabarro.com/es/tableros/tableros-contrachapados/garnica-plywood/tablero-contrachapado-calabo/>

- **Tableros de fibras**

Se fabrican a partir de fibras lignocelulósicas, a las que se puede añadir un adhesivo, mediante la aplicación de calor y/o presión. (Infomadera, 2010) Los tableros de fibras son hechos a partir de fibras de madera, se fabrican en base a una amplia gama de materias primas por infiltrado de las fibras para después ser compactados mediante unos rodillos o una prensa de platos. (Novoa Carrillo, 2005) En el proceso de fabricación puede agregarse aglutinantes u otros materiales que mejoren características como resistencia mecánica, resistencia al fuego, ataque de insectos, pudrición y comportamiento hidrófugo.

Gráfica 13. Tableros de fibras



Fuente: <https://www.maderea.es/diferencias-entre-tableros-de-particulas-y-tableros-de-fibras/>

La FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) propone la siguiente definición: Es una lámina de material manufacturado a partir de fibras de

madera u otros elementos lignocelulósicos fibrosos, cuyo principal ligamento deriva del ordenamiento de las fibras y sus inherentes propiedades adhesivas. Agentes aglomerados u otros materiales pueden ser agregados durante su fabricación. La clasificación de la FAO es la siguiente:

- Tableros no prensados: De baja densidad ($0,02 - 0,40 \text{ g/cm}^3$)
- Tableros prensados: De media densidad o MDF ($0,40 - 0,80 \text{ g/cm}^3$)
- De alta densidad o hardboard: ($0,8 - 1,2 \text{ g/cm}^3$)

La norma ASTM D1554-10 se refiere a toda la terminología para tableros de madera, fibras y partículas (ASTM, 2011). Según su clasificación respecto al valor de la densidad de los tableros de partículas establece los siguientes valores:

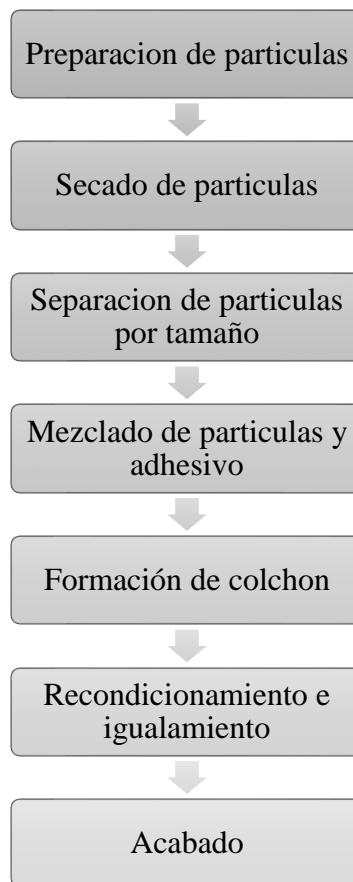
- Tableros de partículas de baja densidad: menores que 640 Kg/m^3
- Tableros de partículas de densidad media: entre $640-800 \text{ Kg/m}^3$
- Tableros de partículas de alta densidad: mayor que 800 Kg/m^3

3.5.2. Proceso de producción de tableros aglomerados.

Los tableros que se fabrican con partículas de madera son productos que se usan en aplicaciones estructurales de la madera. Estos tableros se fabrican con partículas como son las hojuelas, astillas y viruta, las cuales se combinan con resinas sintéticas u otro tipo de adhesivo; la mezcla formada se coloca entre planchas (moldes) a temperaturas altas para prensarla y aumentar la densidad del producto. Las temperaturas altas en el prensado sirven para acelerar el endurecimiento (curado) de los adhesivos. Las partículas se pueden colocar de cierta manera con el fin de darle alguna orientación a las propiedades de resistencia de

los tableros. Luego entonces, el objetivo de la fabricación de este tipo de tableros es lograr un producto a base de pequeñas partículas unidas con un adhesivo, que tenga características físicas semejantes o superiores a las de piezas de madera maciza. (Alferez Rivas, 2013)

Gráfica 14. Proceso establecido de producción de tableros aglomerados



Fuente: Autor

3.5.3. Resinas usadas en el proceso de aglomeración de tableros de partículas

Las resinas son sustancias líquidas que pueden pasar al estado sólido mediante una reacción química provocada por un agente externo. Por si solas no tienen la resistencia suficiente, es por eso que necesitan de refuerzos de otros materiales, que son los que aportan la

flexibilidad y dureza. Estas se presentan en forma de polímeros termoestables que son los empleados en materiales compuestos. (Caicedo & Salamanca, 2011)

En el desarrollo de tableros aglomerados son usadas generalmente resinas sintéticas que permiten la conformación del material (Parra & López, 2011). El agente inorgánico que se usa como aglutinante depende de la utilización final del tablero; por ejemplo, si es para interiores se utiliza urea-formaldehído, mientras que resinas fenol-formaldehído son usadas cuando la humedad es un factor determinante. (Tapia Bastidas, 2007)

4. ANTECEDENTES REPORTADOS EN LA LITERATURA DEL USO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

En la literatura a nivel mundial y nacional se puede encontrar una serie de estudios realizados buscando el uso sustentable de los residuos del proceso de extracción de aceite de palma y del cultivo del cacao, así mismo se hallaron avances importantes sobre diferentes alternativas de materias primas en la fabricación de tableros aglomerados.

Se reseña el trabajo realizado por Wendy Pei Qin Ng, Hon Loong Lam, Foo Yuen Ng, Mustafa Kamal, Joseph Heng Ee Lim, “Waste-to-wealth: green potential from palm biomass in Malaysia”. Publicado en septiembre de 2011. En esta publicación los autores hacen una descripción detallada de la importancia que tiene en Malaysia el sector de palma de aceite; este país está enfocando sus esfuerzos en la reducción de la dependencia que tiene la economía en los combustibles fósiles, a través del biodiesel y producción de energía. Actualmente Malaysia produce 68 Megawatts a partir de biomasa de palma y proyecto para el 2020 800 Megawatts, sin embargo el mayor uso que se la ha dado a la biomasa es para fertilización de las mismas plantaciones, desarrollo de briquetas por su alto poder calorífico y la generación de tableros contra enchapados. El impacto de estos desarrollos es tan alto que se ha conformado la industria de la Biomasa de Palma de Aceite como tal.

Yuri Alexandra Gonzales Castillo y colaboradores de la Universidad libre de Colombia desarrollaron la caracterización de materiales lignocelulósicos residuales de palma de aceite y palma de coco para la fabricación de pellets. Los investigadores tomaron los residuos de palma de aceite y de palma de coco para obtener briquetas. Como resultado se concluyó que los pellets de palma de coco no presentaron una buena compactación, presentado problemas en su

almacenamiento y transporte; los pellets de palma de aceite presentaron mayor poder calorífico cerca de 17,186.81 kJ/kg.

Abani, S., Hafsi, F., Kriker, A., & Bali, A. en el 2015. En la publicación: “Valorisation of Date Palm Fibres in Sahara Constructions”, señalan, como debido a las condiciones climáticas de esta región del sur de Argelia, donde los veranos son muy cálidos y los inviernos son muy fríos, la importancia que tiene desarrollar materiales que permitan darle al concreto unas condiciones especiales de aislamiento térmico a costos factibles. La adición de fibras de palma al yeso mejora las características térmicas y reológicas del material, concluyendo que el empleo de estos materiales de aislamiento térmicos en la pared, es la solución al alto consumo de energía en proceso de enfriamiento y calefacción para las casas según la estación en que se encuentren.

Ramakrishna Malkapuram, Vivek Kumar And Yuvraj Singh Negi en el 2009 publicaron “Recent Development in Natural Fiber Reinforced Polypropylene Composites”. En esta publicación se hace un revisión sobre los desarrollos de compuestos de polipropileno reforzado con fibras naturales, tales como coco, yute y lino; teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de los compuestos están influenciados principalmente por la adhesión entre la matriz y las fibras. Encontrado que se han desarrollado nuevas técnicas de procesamiento y métodos de modificación química y física para mejorar la adhesión de la fibra-matriz para mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos.

Alexander Gaitán, Gerardo Fonthal y Hernando Ariza. Realizaron la fabricación y propiedades físicas de aglomerados de *Pennisetum purpureum schum*, *Philodendron longirrhizum* y *Musa acuminata*, en la Universidad del Quindío (Colombia) en el año 2016. El objetivo de la investigación fue obtener aglomerados fabricados con partículas lignocelulósicas provenientes de plantas encontradas en la región del Quindío - Colombia conocidas con su nombre común como: la “guasca de plátano”, el “tripeperro” y el “pasto elefante” para compararlas con aglomerados

presentes en el mercado. Según las pruebas mecánicas de flexión, compresión y tracción aplicadas a los tableros con los materiales mencionados presentan respuestas similares a los tableros comerciales.

La revista “Industrial Crops and Products” en el año 2009 publicó en artículo “Binderless fireboard from steam exploded banana bunch” de los autores German Quintana, Jorge Velasquez, Santiago Betancourt y Piedad Gañan de la Universidad Pontificia Bolivariana en Medellín. En este artículo, los autores trataron el material lignocelulósico con una explosión de vapor para elaborar los tableros aglomerados. Los tableros de fibras obtenidas eran de buena calidad y cumplían con los requisitos de las especificaciones pertinentes estándar.

Jesús Alberto García, Mónica Cárdenas y Edgar Eduardo Yáñez en junio de 2010, publicaron en la revista PALMAS perteneciente a FEDEPALMA el artículo “Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia”. En esta publicación el Centro de Investigaciones de Palmas de Colombia presenta un diagnóstico de generación y uso de biomasa de palma de aceite en Colombia, tomando como población a 29 plantas extractoras que procesan el 76,7% (2.858.868t) del fruto producido en el ámbito nacional en el 2008. Obteniendo como resultado que hay más de 600.000 toneladas de biomasa disponible anualmente para formular nuevas alternativas de aprovechamiento.

El trabajo presentado por Nubia Garzón y colaboradores de la Universidad de Sao Paulo en el 2012 presentan la evaluación de los tableros de partículas obtenidos a partir de residuos agroindustriales; desarrollando un tablero de partículas con una composición de 85% de bagazo de caña de azúcar y 15% de resina de poliuretano a base de aceite de ricino; Termoconformado y sometido a prueba de envejecimiento acelerado bajo la norma ASTM evaluando los principales factores que causan la degradación del material.

Lorena Rocío Naranjo Vásquez en la Universidad de Pamplona en el año 2012 realizó la tesis: “Evaluación de los residuos vegetales con alto porcentaje de lignina de los cultivos de arroz, caña de azúcar y palma de aceite, ubicados en el Departamento Norte de Santander para la generación de un material sustituto del aglomerado M.D.F”. Se llevó a cabo un proceso de investigación el cual buscaba desarrollar un tablero aglomerado a partir de residuos lignocelulósicos, empleando un aditivo natural como lo es el almidón de yuca con el fin de lograr que el aglomerado fuera en su totalidad biodegradable en contacto con el suelo, y de esta manera no generar gases en su descomposición que repercutan en el medio ambiente. El material aglomerado obtenido fue empleado en la fabricación de un prototipo final diseñado para comprobar sus características físicas respecto a operaciones de producción, de esta manera se demostró la versatilidad del material elaborado y su aporte social, ambiental y económico.

A. Donkoh, C.C. Atuahene, B.N. Wilson y D. Adomako en la revista científica “Animal Feed Science and Technology” en 1991 analizaron la composición química de la cáscara de mazorca de cacao en la publicación “Chemical composition of cocoa pod husk and its effect on growth and food efficiency in broiler chicks”. Analizaron los valores obtenidos de la composición química para una formulación en el alimento de los pollos de engorde.

La cascara de mazorca de cacao también se ha estudiado como un posible biosorbente para remover metales en aguas, V.O Njoku en su publicación “Biosorption potential of cocoa pod husk for the removal of Zn(II) from aqueous phase” identificó que este residuo puede ser usado como un potencial biosorbente para remover Zinc de soluciones acuosas.

Oscar Ortiz y Raquel Villamizar de la Universidad de Pamplona junto a Juan Daniel Martínez de la Universidad Pontificia Bolivariana en abril de 2016 realizaron un trabajo denominado “caracterización y evaluación de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma Cacao L.*) Como

fuentes de energía renovable” Realizando la caracterización desde un punto de vista termoquímico, evaluando el residuo como una fuente de energía renovable para procesos como pirolisis, gasificación y combustión.

En la revista “Materials & Design” los autores Y.A. El-Shekeil y colaboradores en el año 2014 en el artículo “Effect of fiber loading on mechanical and morphological properties of cocoa pod husk fibers reinforced thermoplastic polyurethane composites” prepararon poliuretano termoplástico reforzado con fibra de coco y cascara de mazorca de cacao mediante el método de composición en fusión. Se estudió el efecto de la carga de la fibra sobre las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, propiedades de flexión y resistencia al impacto) y morfológicas. Los compuestos mostraron un aumento en la resistencia a la flexión con aumento en el contenido de fibra. La resistencia al impacto se deterioró con el aumento de la fibra.

En la tesis “Elaboración de tableros aglomerados auto-adheridos a partir de fibra de raquis de palma africana (*Elaeis Guineensis Jacq*)” elaborada por Mariuxi Mejia Almeida en Quito en el año 2012, elaboró tableros aglomerados por el proceso de termo-compresión, ya que se activan los principales componentes de las fibras, por eso primero realizaron una caracterización química y mecánica de las fibras, al final se definieron las condiciones del proceso que permitieron fabricar un tablero aglomerado sin resinas adhesivas.

Otra de las alternativas en la elaboración de tableros aglomerados es presentada por Martha Angélica Novoa Carrillo en la tesis denominada “Elaboración y evaluación de tableros aglomerados a base de fibra de coco y cemento” en Colima año 2005. La investigación se llevó a cabo buscando una solución al déficit habitacional debido al crecimiento demográfico del país, tratando de sustituir materiales convencionales por materiales a partir de residuos del coco en

combinación con cemento. Respecto al material obtenido, la mejor resistencia a la flexión de los tableros, fibra de coco-cemento fue entre 5 y 6 N/mm².

En el trabajo “Desarrollo de tableros aglomerados auto-enlazados a partir de fibra de la vena central de la hoja de plátano” realizado en la ciudad de Medellín en el año 2009 por catalina Álvarez, Evelyn Capanema, Orlando Rojas y Piedad Gañan fueron elaborados tableros aglomerados a partir de la vena central de la hoja de plátano, teniendo en cuenta variables como la presión, el tiempo y la temperatura del proceso. Los resultados obtenidos mostraron que a mayores temperaturas se obtiene los tableros con las mejores propiedades mecánicas.

En la Universidad industrial de Santander en el año 2011 se realizó la tesis denominada “Elaboración de composites a base de resina poliéster, poliestireno postconsumo y aserrín” por las estudiantes Francy Juliana Caicedo Moreno y Carol Sofía Salamanca Vianchá. Los compuestos elaborados se enfocaron en la reutilización de un polímero como el poliestireno cristal ya que alargando su vida útil en un compuesto reforzado con fibras de madera, se da un valor agregado, del mismo modo es amigable con el medio ambiente.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Elaborar y evaluar tableros aglomerados a partir de residuos agroindustriales de cascara de mazorca de cacao y fibra de fruto de palma de aceite usando una resina termoestable.

5.2. Objetivos específicos

- Caracterizar química y físicamente los residuos de fibra de fruto de palma de aceite y cáscara de mazorca de cacao
- Establecer las variables en el proceso de elaboración de los tableros aglomerados.
- Determinar las propiedades mecánicas y físicas según normas ASTM.
- Definir a las condiciones óptimas del proceso para la producción de los tableros aglomerado.

6. PARTE EXPERIMENTAL

6.1. Muestreo

Los residuos a partir de los cuales se desarrolló la investigación fueron obtenidos en los departamentos de Santander y Norte de Santander. La fibra de fruto de palma de aceite fue proporcionada por la planta extractora de aceite COOPAR ubicada en la vía a Tibú en el departamento Norte de Santander.

Gráfica 15. Planta de beneficio de palma de aceite



Fuente: Autor

La cascara de cacao fue proporcionada por varias fincas de la vereda La Esmeralda del municipio de San Vicente de Chucurí de la variedad CCN51.

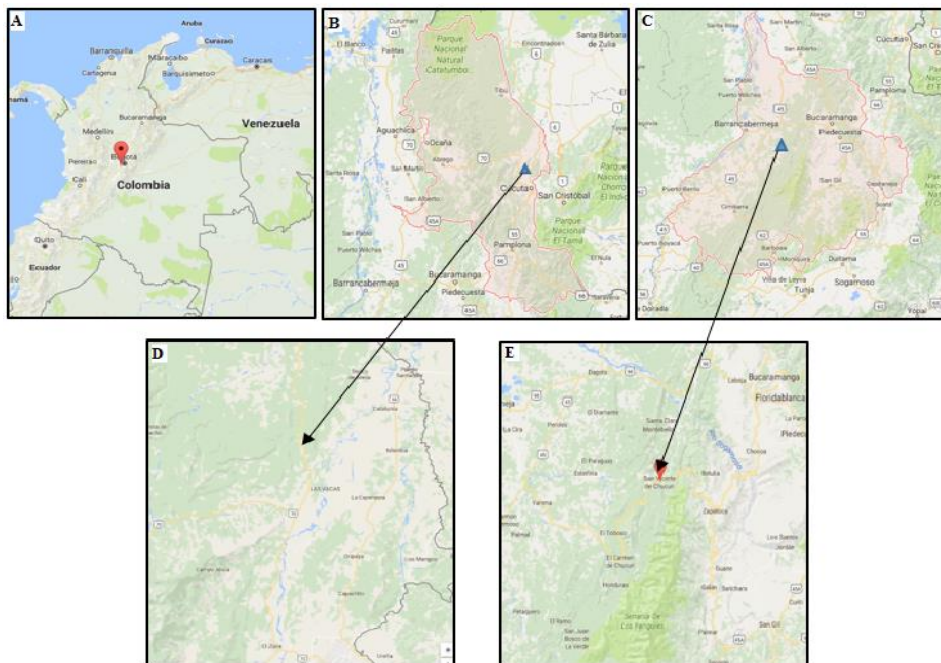
Gráfica 16. Estado de la cascara de mazorca de cacao en San Vicente de Chucurí



Gráfica 17. Ubicación zona de muestreo.

(A) Colombia (B) Norte de Santander (C) Santander (D) localización planta COOPAR (E)

Localización vereda La Esmeralda-San Vicente de Chucurí



Fuente: Google Maps, 2016

6.2. Equipos y materiales

El desarrollo de este objetivo se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad de Pamplona, donde facilitaron el uso de los equipos para los análisis físico-químicos de las muestras de los residuos.

Dentro de la etapa de caracterización química se realizó una preparación de las materias primas haciendo uso de los siguientes equipos:

- Horno con el cual se secó la FFPA y la CMC
- Recuperadora de materia prima del laboratorio de plásticos y mecanizado de la Universidad de Pamplona, con el objetivo de reducir el tamaño de las FFPA y de la CMC
- Tamizador eléctrico UTOMATIC SIEVE SHAKER D403 con mallas normalizadas DIRIMPEX para la selección del tamaño adecuado de materia prima las pruebas químicas

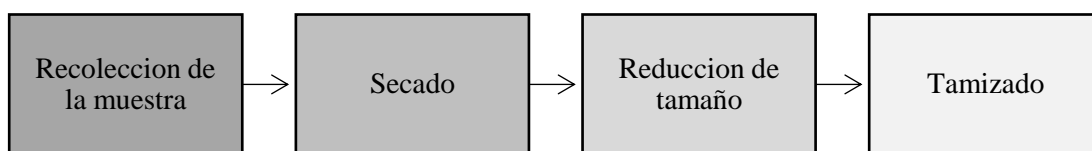
Los equipos utilizados para la caracterización química fueron los siguientes:

- Equipo de extracción soxhlet, para la determinación de extraíbles
- Equipo de filtración al vacío para la determinación de lignina, celulosa, hemicelulosa y solubilidad en hidróxido de sodio.
- Equipo de destilación sencilla para la determinación de hemicelulosa
- Termobalanza marca PRECISA referencia XM-60 para la determinación de humedad inicial de las materias primas.
- Balanza analítica marca OHAUS con precisión de 0,1 mg para pesar todas las muestras
- Mufla (Vulcan 3-550, Estados Unidos), para secar las muestras después de las pruebas de lignina, celulosa, hemicelulosa y solubilidad en hidróxido de sodio.

Los reactivos utilizados en la caracterización química fueron: tolueno, ácido sulfúrico (95%-98%), alcohol etílico absoluto (99,5%), ácido acético glacial marca PANREAC, Hidróxido de sodio, hipoclorito de sodio y ácido clorhídrico (37%), metabisulfito de sodio, sulfito de sodio marca MERCK tiosulfato de sodio, yoduro de potasio marca J.T Baker y agua destilada

6.3. Preparación de la muestra

Gráfica 18. Metodología preparación de la muestra



La metodología utilizada inicia con la recolección de la materia prima:

➤ **Fibra de fruto de palma de aceite:**

Se hizo la recolección en la planta de beneficio, seguido el proceso de transporte a Pamplona y un posterior secado durante 48 horas a 50°C con el fin de eliminar la humedad presente debido al cambio de temperatura de la zona de origen. Inicialmente se realizó el proceso de reducción del tamaño de partícula y así lograr una mayor superficie de contacto, para tal fin, se utilizó una la recuperadora de materia prima obteniendo diversos tamaños de partículas, para posteriormente obtener por tamizado durante 15 minutos el tamaño de partículas óptimo para realizar las pruebas

(ANEXO I). El tamaño de partícula seleccionado fue el retenido en tamiz #20 debido a que representa la mayor fracción másica presente en el análisis por tamizado.

➤ **Cascara de Cacao**

La recolección se hizo por parte de un técnico de FEDECACAO en varias fincas de la zona de San Vicente de Chucuri, para después ser enviadas a Pamplona. Las muestras se secaron en un horno a 50 °C por 72 horas, la cascara de cacao requirió más tiempo en el horno debido a la alta humedad que presenta. Después se llevó a la recuperadora de materia prima para hacer la reducción de tamaño de partícula y posterior tamizado por un tiempo de 15 minutos, seleccionando las partículas retenidas en tamiz #20. Los resultados del análisis por tamizado se muestran en el ANEXO I

6.4. Caracterización química de los residuos

La caracterización química, con relación al contenido de cenizas y extraíbles, se realizaron bajo la norma ASTM (American Society for Testing and Materials). Las determinaciones de solubilidad en hidróxido de sodio, lignina, celulosa y hemicelulosa se llevaron a cabo con base en lo establecido por las normas TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry). Los resultados obtenidos se analizaron mediante el software estadístico *SPSS de IBM v.22* (Licencia de prueba)

6.4.1. Determinación de cenizas

Se llevó a cabo bajo la norma ANSI/ASTM D1102-56. Inicialmente se calcinó un crisol a 550°C en una mufla durante una hora, luego se retiró e introdujo inmediatamente a una desecadora durante 30 minutos para después pesarlo (se registró el peso). Se pesaron 4

gramos de muestra (fibra de fruto de palma de aceite/cascara de cacao) previamente seca y tamizada. Se realizó un proceso de pre-cenizas; el cual consistió en calentar controladamente la muestra en el crisol mediante un mechero para evitar la ignición de la muestra. Después se introdujo el crisol a la mufla a 550°C durante 4 horas, pasado este tiempo, se llevó el crisol al desecador por 30 minutos y se pesó hasta obtener una masa constante.

6.4.2. Determinación de extraíbles (grasas, ceras y resinas)

Esta prueba se realizó bajo la norma ANSI/ASTM D1105-56. Se pesaron 4 gramos de muestra (fibra de fruto de palma de aceite/cascara de cacao). Se armó un dedal con papel filtro y se introdujo en el condensador a reflujo del equipo de extracción soxhlet. El balón del equipo soxhlet con capacidad de 250 ml, se llenó con una mezcla en una proporción 3:2 de tolueno-Alcohol etílico (99,5%) hasta completar 150 ml. Se realizó cada extracción durante 6 horas, se dejó enfriar el sistema y se separó el solvente de la muestra residual. El solvente se sometió a ebullición hasta reducir el volumen a 10 ml, seguido se transfirió a un crisol previamente tarado y se introdujo en horno a 105°C por 4 horas, luego se enfrió y se pesó en crisol para calcular el contenido de extraíbles, mediante la siguiente ecuación:

$$\%Extraibles = \frac{\text{masa final de la muestra}}{\text{masa inicial de la muestra}} * 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

6.4.3. Determinación de lignina

Según lo establecido por bajo la norma TAPPI 13-os-54, se pesó 1 gramo de muestra libre de extraíbles, se le colocó en un Erlenmeyer de 125 ml y se le añadió 15 ml de H₂SO₄ al 72%,

se mantuvo la mezcla en agitación constante y sin calentamiento por 3 horas. Posteriormente, se colocó la muestra en un balón de 1000 ml con perlas de ebullición y se le añadió 560 ml de agua, se dejó en reflujo por 4 horas, se enfrió a temperatura ambiente y se filtró al vacío con papel filtro previamente pesado. El residuo depositado en el papel filtro se lavó con 500 ml de agua caliente y se secó en horno a 105°C por 3 horas, luego se enfrió en el desecador y se pesó. Para calcular el porcentaje de lignina se utilizó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Lignina} = \frac{\text{masa inicial de la muestra} - \text{masa final de la muestra}}{\text{masa inicial de la muestra}} * 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

6.4.4. Determinación de celulosa

Esta prueba se realizó bajo la norma TAPPI 17 m-55. Se pesaron 2 gramos de muestra libre de extraíbles y se colocaron en un Erlenmeyer de 125 ml para posteriormente añadirles 50 ml de solución de hipoclorito de sodio al 10% y se dejó reposar sin agitación a temperatura ambiente durante 8 horas, luego se filtró el material con ayuda de una bomba de vacío sobre un papel filtro y se lavó con 50 ml de agua destilada, 50 ml de bióxido de azufre al 3%, 50 ml de agua destilada y finalmente con una solución de sulfito de sodio al 2% hasta que la muestra tomó una coloración rosada tenue, en este punto se transfirió el material a un vaso de precipitado, se retiraron los residuos con solución de sulfito de sodio al 2% en porciones de 15 ml hasta completar 105 ml y se dejó reposar el material en esta solución durante 30 minutos, se filtró y se lavó el contenido con 250 ml de agua destilada, luego se llevó a secar en el horno a 105°C

por 3 horas, se dejó enfriar en el desecador y se pesó. Para calcular el porcentaje de celulosa se utilizó la siguiente ecuación

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{\text{masa inicial de la muestra} - \text{masa final de la muestra}}{\text{masa inicial de la muestra}} * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

6.4.5. Determinación de hemicelulosa

Para esta prueba se llevó a cabo el procedimiento para la determinación de pentosanos bajo la norma TAPPI 19 wd-71. Se armó el equipo de destilación y se acopló al balón un embudo de separación, luego se agregó en el: 1 gramo de muestra libre de extraíbles, magneto y 100 ml de HCl 3,5 N, posteriormente en un embudo de separación 300 ml de HCl 3,5 N. Se llevó a ebullición la mezcla hasta recoger 300 ml de destilado, se trasladó el destilado a un Erlenmeyer de 1 Litro y se agregaron aproximadamente 250 g de hielo picado y 50 ml de agua destilada. Cuando la temperatura fue menor de 0°C, se añadió 20 ml de solución de bromuro bromato 0,2 N, se tapó el Erlenmeyer y se agitó fuertemente durante 5 minutos, finalmente se adicionaron 10 ml de solución de yoduro de potasio al 10% y unas gotas de almidón como indicador, se tituló la muestra con una solución de tiosulfato de sodio al 0,1 N.

Para poder obtener un valor referencial, se realizó un blanco en el cual se utilizaron 270 ml de HCl 3,5 N, 80 ml de agua destilada, 250 g de hielo y 20 ml de solución bromuro bromato, se tituló y se midió el gasto de solución de tiosulfato de sodio.

$$\% \text{ pentosanos} = \frac{7,5 * N * (V - v)}{w} - 1\% \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde N: Normalidad de la solución de tiosulfato utilizada

V: Volumen en el blanco gastado de tiosulfato (ml)

V: Volumen en el destilado gastado de tiosulfato (ml)

W: peso inicial de muestra (gr)

Como parte de la caracterización química se realizó la determinación de solubilidad de los materiales en hidróxido de sodio.

6.4.6. Determinación de solubilidad en Hidróxido de sodio

Se pesaron 2 gramos de muestra tamizada y se colocaron en un Erlenmeyer de 125 ml, luego se añadieron 100 ml de solución de NaOH al 1%, junto a un magneto para mejorar la agitación dentro del Erlenmeyer y se colocó en un baño de agua en ebullición por 30 minutos. Se agito vigorosamente la mezcla a los 10, 15 y 30 minutos después se dejó enfriar a temperatura ambiente, con ayuda de una bomba de vacío, se hizo una filtración en papel filtro previamente pesado, luego se lavó el residuo con 50 ml de agua caliente seguidos de 50 ml de ácido acético al 10% y 50 ml de agua caliente. Finalmente se secó la muestra a 105°C por 4 horas, se llevó a un desecador hasta obtener un peso constante. Esta prueba se realizó bajo la norma TAPPI T212 om-12. Para calcular el porcentaje de solubilidad el hidróxido de sodio se utilizó la siguiente ecuación.

$$\%Solubilidad\ en\ NaOH = \frac{masa\ inicial\ de\ la\ muestra - masa\ final\ de\ la\ muestra}{masa\ inicial\ de\ la\ muestra} * 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

6.5. Caracterización física de los residuos

6.5.1. Determinación de humedad

La determinación de humedad se llevó a cabo en la balanza de humedad PRECISA XM60, la cual determina automáticamente la humedad de los sólidos. El método es termogravimétrico (basado en la pérdida de masa de la muestra). Las muestras analizadas se trataron en su estado natural (residuo). (Naranjo Vasquez, 2012). Para esta prueba se pesó 1 gramo de cada material lignocelulósico, se sometió a calentamiento controlado a 105°C hasta obtener un peso constante y registrando los valores inicialmente cada 20 segundos durante 1 minuto, después cada 30 segundos durante 15 minutos y para finalizar cada 3 minutos hasta que el peso se mantuvo constante por más de diez minutos. El contenido de humedad se muestra en la pantalla digital de la termobalanza en términos de porcentaje.

6.5.2. Caracterización térmica

La caracterización térmica de los residuos se llevó a cabo mediante el equipo SDT-Q600 de TA Instruments. Aproximadamente 10 mg de cada residuo se analizó en un intervalo de: temperatura ambiente hasta 620°C con una rampa de calentamiento de 10°C/min, en atmosfera de argón con flujo de 100 ml/min. (Parra & López, 2011)

6.5.3. Determinación de densidad de partícula.

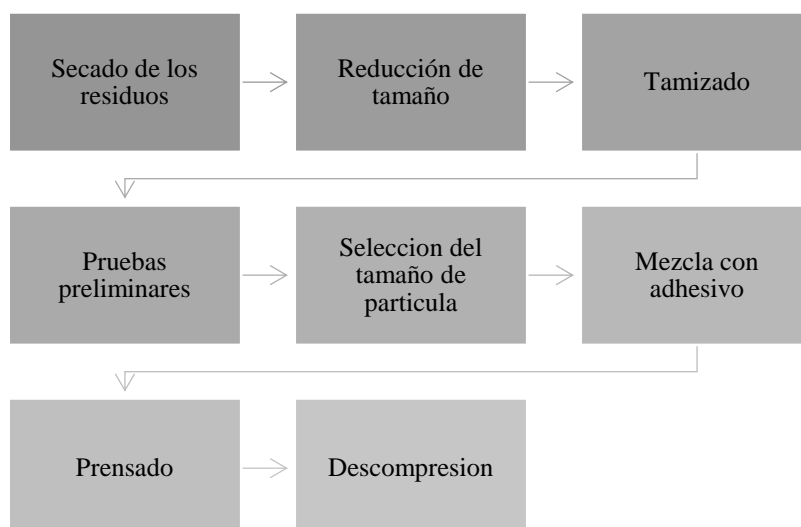
Se llevó a cabo la determinación de la densidad aparente de cada sólido, para este procedimiento se contó con una jeringa con embolo previamente pesada, con un volumen de 5 cc en la cual se introdujo cada material hasta completar el volumen de la jeringa, después se pesó el sistema completo en la balanza. El cálculo de la densidad se llevó a cabo mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad de partícula} = \frac{(\text{peso jeringa +material})-\text{peso jeringa vacia}}{5\text{cm}^3} \quad \text{Ecuación 6}$$

6.6. Elaboración de tableros aglomerados

La metodología propuesta para la elaboración de los tableros aglomerados se indica en el siguiente diagrama:

Gráfica 19. Metodología propuesta para la elaboración de tableros aglomerados



La importancia de la metodología para la elaboración de los tableros aglomerados radica en que en esta fase se establecen las variables del proceso.(Mejia Almeida, 2012) Se realizaron pruebas preliminares con el fin de fijar las siguientes variables:

- Humedad de los materiales lignocelulósicos
- Cantidad de material lignocelulósico
- Tamaño de partícula
- Presión de operación
- Tiempo de prensado
- Cantidad de resina

De esta forma se obtienen puntos de referencia, teniendo en cuenta los parámetros establecidos por las normas internacionales. (ASTM, 2006, 2011)

6.6.1. Preparación del residuo particulado.

Inicialmente los residuos fueron sometidos a un proceso de secado a 50°C durante 4 días en un horno, con el propósito de ajustar la humedad según la norma para tableros de partículas de madera ASTM-D-1554-10 (ASTM, 2011), el cual se debe mantener hasta un máximo del 13%.

Posteriormente se realizó para los residuos de cascara de cacao CMC un proceso de reducción de tamaño en una recuperadora de materia prima, ubicada en el laboratorio de plásticos y mecanizado de la Universidad de Pamplona, debido al gran tamaño de este material. De igual manera para los residuos de fibra de palma se le practicó el mismo procedimiento con el objetivo de reducir el tamaño del cuesco presente en el material.

Para establecer el tamaño de partícula se hizo necesario hacer una prueba granulométrica y se escogieron los tamaños de partícula que representan una mayor proporción respecto a la cantidad tamizada. Se realizó un análisis diferencial de los resultados obtenidos pesando cada fracción obtenida en los tamices normalizados desde el de malla #20 hasta el de malla #200. Se calculó la fracción de masa retenida (x_i) en cada tamiz mediante la ecuación 7.

$$x_i = \frac{\text{Masa retenida en el tamiz}}{\text{Masa inicial de la muestra}} \quad \text{Ecuación 7}$$

El tamaño de partícula influye en gran medida en el proceso de conformado del tablero aglomerado; se requieren tamaños con un rango aproximado de 2 a 5 mm de longitud para que la unión con los elementos sea homogénea. (Caicedo & Salamanca, 2011; Lias et al., 2014)

6.6.2. Mezcla del residuo con resina de poliéster-insaturado

El mezclado del material con el adhesivo o resina debe ser lo más homogéneo posible, logrando la humectación de cada partícula de material para que al momento del prensado haya una distribución uniforme del adhesivo. Un mezclado adecuado permite una excelente distribución en las cargas. (Caicedo & Salamanca, 2011). Por tanto mediante una espátula de laboratorio en un recipiente de polietileno se procedió a agregar una pequeña cantidad de material junto a una porción de resina y se fue mezclando hasta que las partículas del material se vieran totalmente impregnadas, este paso se realizó hasta completar la cantidad de material y resina. Una vez realizado el mezclado se debe tener en cuenta el tiempo de gel, en el cual se cura la resina de poliéster insaturado, este valor es necesario para determinar, de que tiempo disponemos para el montaje en la máquina moldeadora. La cantidad de resina es un factor

determinante en el momento de formar aglomerado y no debe sobrepasar el 20% del peso total del material. (ASTM, 2011). La resina de poliéster POLIESCOL es una resina pre-acelerada, se hizo necesario mezclarla con catalizador MECK-peróxido.

Para el tiempo de compresión se tuvo en cuenta la ficha técnica del adhesivo utilizado, en esta investigación se trabajó con resina de poliéster pre-acelerada POLIESCOL (ficha técnica ANEXO III), esta resina cuenta con un tiempo de gel entre los 14 y 18 minutos, teniendo en cuenta la temperatura promedio del sitio de trabajo (17°C) y la cantidad de resina utilizada se optó por dejar durante 12 horas cada tablero aglomerado en el proceso de prensado para lograr un curado uniforme mientras se ejercía presión.

Las mezclas para la elaboración de los tableros aglomerados, se tomaron desde el 4% hasta el 20% en resina de poliéster, según lo establecido por la norma ASTM D-1554-10 (ASTM, 2011) en porcentaje peso-peso (% p/p).

Las resinas de poliéster son líquidas a temperatura ambiente y pueden ser llevadas a estado sólido, mediante un proceso de curado para obtener un material de gran resistencia térmica, química y mecánica, y debido a su maleabilidad se utiliza en diferentes ámbitos como el automotriz, ferroviario, en maquinarias industriales, parques temáticos o en la decoración. La resina de poliéster es termoestable, es decir, mientras está en estado líquido dispone de maleabilidad hasta sufrir el proceso de endurecimiento permanente donde se calienta, consiguiendo que el material se amolde a cualquier forma o superficie. (Gil, 2012)

La composición de resina de poliéster insaturado comprende (i) un polímero que contiene insaturaciones reactivas como una resina; y (ii) un componente 1, 3-dioxo; y (iii)

opcionalmente un diluyente reactivo y/o un inhibidor y/o un estabilizante; composición de resina la cual es curable con un componente de peróxido.

Las mezclas realizadas (residuo-resina) para la elaboración de los tableros aglomerados se muestran la tabla 8.

Tabla 8. Preparación de mezclas para la elaboración de tableros aglomerados

CMC			FFPA		
Sistema	Cantidad de residuo (gramos)	Cantidad de resina (gramos)	Sistema	Cantidad de residuo (gramos)	Cantidad de resina (gramos)
CMC Sin tamizar- 10% de resina	240	56,4432	FFPA-4% de resina	200	39,0768
CMC-Tamiz 20- 10% de resina	240	66,2592	FFPA-10% de resina	200	97,6920
CMC-Tamiz 30-10% de resina	240	76,2000	FFPA-16% de resina	200	156,3072
CMC-tamiz 40-10% de resina	240	75,4104	FFPA-20% de resina	200	195,3480

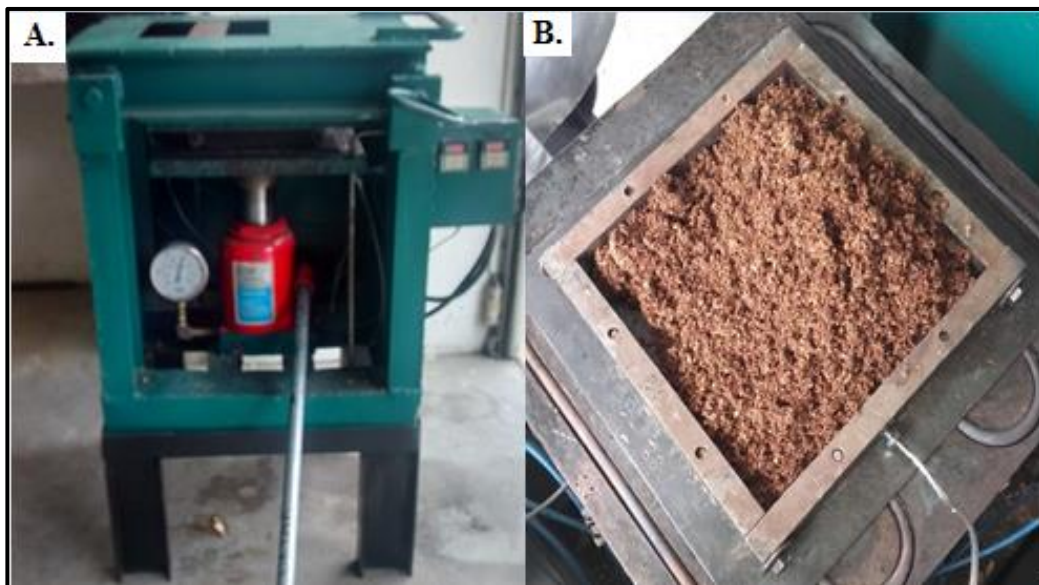
La tabla anterior muestra algunas de las cantidades de residuo-resina a utilizar en la elaboración de los tableros aglomerados, la cantidad de catalizador usada corresponde al 2% del peso de la resina.

6.6.3. Prensado

El proceso de prensado se realizó con una máquina termoconformadora, dispuesta con un gato hidráulico tipo botella con capacidad de carga de 50 toneladas, con moldes dispuestos horizontalmente para la elaboración específica de tableros aglomerados con dimensiones de 20 cm * 20 cm y 1 cm de espesor. Esta máquina se realizó como proyecto de grado en el programa de ingeniería mecánica titulado “Diseño y construcción de un prototipo de termoconformado para materiales aglomerados” (Conde, 2015)

Gráfica 20. Prensa hidráulica

(A) Vista general de prensa hidráulica (B) Molde para la elaboración de tableros aglomerados



La presión del proceso debe asegurar que el material se va a compactar junto al adhesivo, logrando obtener un tablero aglomerado de apariencia uniforme y estable. El prensado influye en algunas propiedades de producto, como lo son la densidad del tablero y la resistencia a la flexión. (Novoa Carrillo, 2005). Por esta razón y según protocolos ya establecidos por otros

autores, se optó por aplicar una carga de aproximadamente 25 Toneladas (550 kg/cm²) (Infomadera, 2010; Martín, Molina, García, & Rodríguez, 2004; Tapia Bastidas, 2007).

En el proceso de descompresión se libera la presión ejercida por el gato hidráulico que se encarga de conformar, se procede a soltar los acoples del molde de la maquina aglomeradora y sacar el tablero producido para dejarlo a temperatura ambiente y que la resina de poliéster continúe su proceso de curado aproximadamente por 1 semana.

6.7. Propiedades físico-mecánicas de los tableros aglomerados

Estas pruebas se realizaron para determinar los parámetros de calidad de los tableros aglomerados y compararlos con los resultados reportados en la literatura.

6.7.1. Absorción e hinchamiento

Según la Norma ASTM D 1037-06 se realizó la prueba de absorción de agua e hinchamiento. Se determinó el espesor y el peso antes y después de una inmersión en agua por 2 y 24 horas a 20 °C, en estos respectivos tiempos se volvió a pesar y medir cada probeta. Se cortaron probetas de 50 mm * 50 mm, se sumergieron en agua a una temperatura de 20°C, tratando de sumergirlos 25 mm por debajo del agua (ASTM, 2006). La prueba se realizó por triplicado.

6.7.2. Densidad de tableros aglomerados

Para determinar la densidad de los tableros aglomerados se cortaron probetas de 50 mm de ancho * 50 mm de largo aproximadamente. Se midieron las tres dimensiones (largo, ancho,

espesor) para rectificar las medidas de cada probeta, se determinó el volumen de cada probeta, después se procedió a pesar cada una y se calculó la densidad mediante la ecuación 8. La prueba se realizó por triplicado y posteriormente la clasificación por densidades según la norma ASTM D1555-10.

$$Densidad = \frac{masa}{volumen} \quad \text{Ecuación 8}$$

En donde:

Masa: g

Volumen: cm³

6.7.3. Resistencia a la flexión estática.

Se determinaron las propiedades mecánicas mediante ensayos de flexión con el propósito de obtener los valores correspondientes de los módulos de ruptura (MOR) y de elasticidad (MOE).

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de materiales de la Universidad de Pamplona en la máquina universal de ensayos SHIMADZU Serie UH – I Modelo 600 KN.

Gráfica 21. Equipo para la caracterización mecánica



Fuente:http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_1/recursos/facultades/ingenierias/ingmecanica/26082010/laboratorios_ingmecanica.jsp

La prueba de flexión se realizó acorde a la norma española para tableros de partículas UNE 56711:1971 (UNE, 1971) y la Norma de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales ASTM D 1037-06. Las pruebas se realizaron por triplicado para cada tablero, de acuerdo como lo estipula la norma.

La velocidad del ensayo fue de 1 mm/min a cada probeta se le midieron tres dimensiones; largo, ancho y alto. La carga puntual se apoyó en el centro de la probeta, la distancia entre los puntos de apoyo fue de 14 cm. Se dio inicio al ensayo para cada probeta hasta que la probeta de material aglomerado produjo la primera falla o ruptura del material.

Gráfica 22. Ensayo de flexión estática



A partir de la prueba de flexión estática se obtiene los datos para el cálculo del módulo de ruptura y módulo de elasticidad.

El módulo de ruptura es una variable importante en la caracterización de los materiales, se define como la tensión máxima que un espécimen de prueba puede soportar en una prueba de flexión en tres puntos hasta que se rompe, expresado en N/mm^2 o MPa. El módulo de ruptura se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$MOR = \frac{3 * F * l}{2 * b * d^2} \quad \text{Ecuación 9}$$

En donde:

F: Fuerza máxima (N)

l: distancia entre los apoyos (mm)

b: Ancho del espécimen (mm)

d: espesor nominal del espécimen (mm)

El módulo elástico es la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria. Mientras mayor el valor (módulo), más rígido es el material. A la inversa, los materiales con valores bajos son más fáciles de doblar bajo carga. El módulo de elasticidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$MOE = \frac{l^3}{4*b*d^3} * \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \quad \text{Ecuación 10}$$

En donde:

l: distancia entre los apoyos (mm)

b: Ancho del espécimen (mm)

d: espesor nominal del espécimen (mm)

$\Delta F/\Delta \delta$: pendiente de la curva esfuerzo vs deflexión (N/mm)

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se discutirán los resultados obtenidos a partir del muestreo de los materiales, la caracterización físico-química de los residuos, las variables definidas a partir de la elaboración de los tableros aglomerados y la caracterización físico-mecánica del material prensado realizada como método de evaluación de la calidad del producto obtenido, y la validación de las variables del proceso de prensado a escala industrial.

7.1. Caracterización físico-química de los residuos lignocelulósicos.

Después de realizado el muestreo y la preparación de los residuos de CMC y FFPA se llevó a cabo la caracterización físico-química con el objetivo de determinar los contenidos de los componentes estructurales de estos, también se llevó a cabo la caracterización física para conocer parámetros como la temperatura de degradación de los residuos.

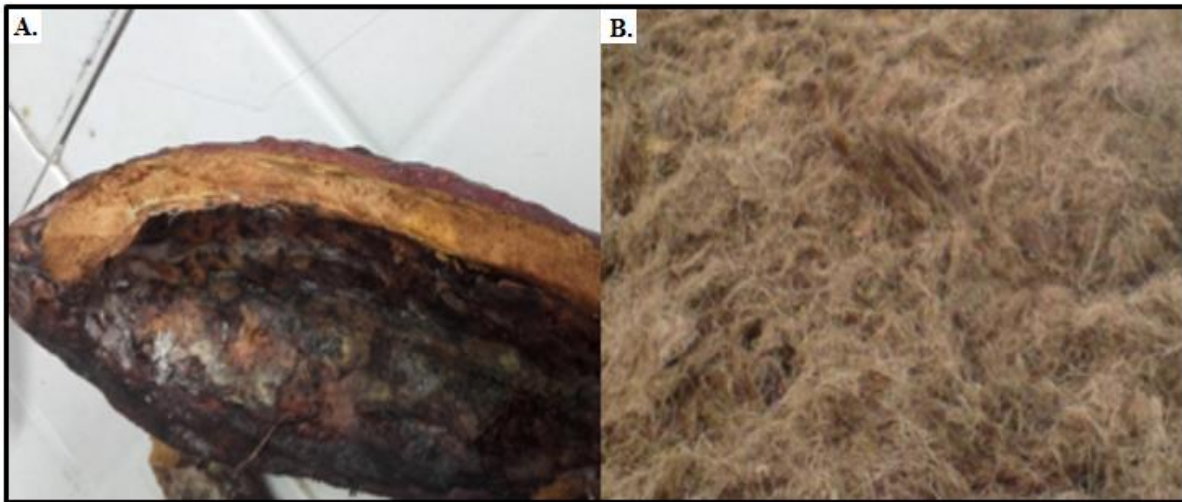
7.1.1. Caracterización química

Después de realizar la recolección y el transporte de las muestras a la Universidad de Pamplona, se procede a iniciar con el secado de los residuos lignocelulósicos. En el caso de la CMC (residuos de cascara de cacao) se hizo inmediatamente después del traslado, debido a que bajo las condiciones de humedad en las que se encontraba, este tipo de residuos son vulnerables a la formación de hongos y una rápida descomposición, generando malos olores y focos de infecciones. Por otra parte, los residuos de FFPA (residuos de palma) presentaban humedad

debido al aceite impregnado de la planta de beneficio durante el proceso de obtención del aceite.

Gráfica 23. Estado inicial de los residuos de CMC y FFPA

(A) Cascara de mazorca de cacao (B) Fibra de fruto de palma de aceite



El secado se realizó por 72 horas cambiando la posición cada 12 horas para garantizar un secado homogéneo de los materiales.

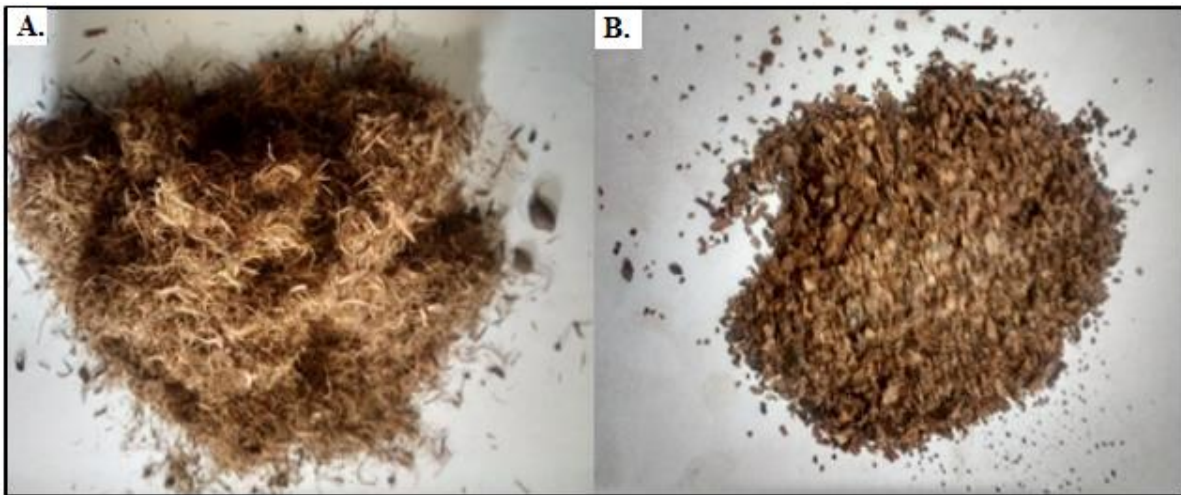
Después del secado se realizó la reducción del tamaño por medio de la recuperadora de materia prima, logrando reducir el tamaño de los residuos hasta 5 mm para un mejor manejo.

Gráfica 24. Recuperadora de materiales



Gráfica 25. Partículas de FFPA y de CMC posterior reducción de tamaño

(A) Fibra de fruto de palma de aceite (B) Cáscara de mazorca de cacao

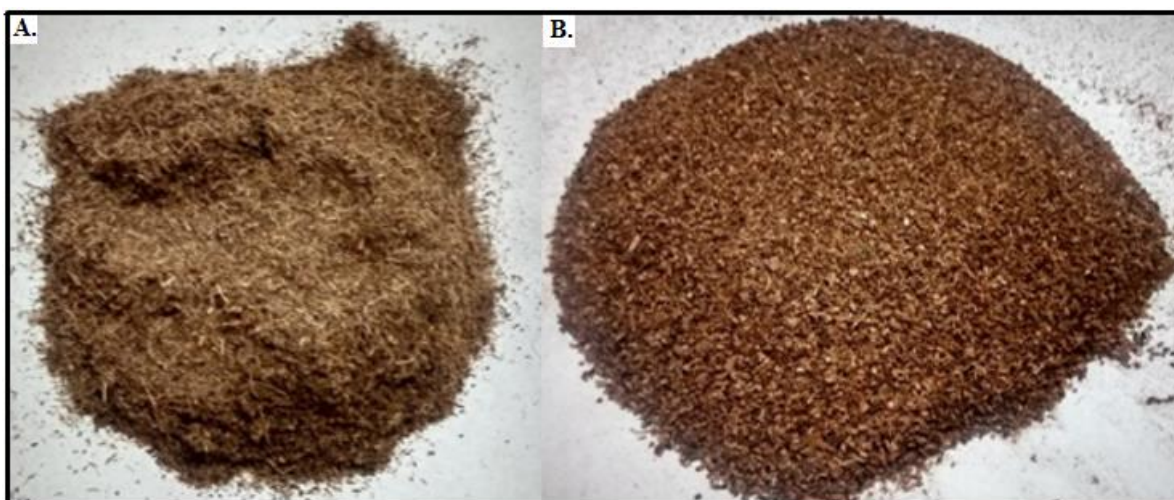


Se realizó un análisis por tamizado para seleccionar los tamaños de partícula necesarios para la caracterización química. En este análisis se colocó desde el tamiz de malla 20 al tamiz de malla 200 y se sometió a vibración durante 20 minutos. Los resultados obtenidos de este análisis para la FFPA y la CMC se presentan en el ANEXO I. El tamaño de partícula que se

escogió para la caracterización química fue el 30/40 que se muestra en la siguiente imagen, del lado izquierdo la FFPA y de lado derecho la CMC:

Gráfica 26. Tamaño de partícula caracterización físico química

(A) Fibra de futo de palma de aceite (B) Cáscara de mazorca de cacao



La importancia de la caracterización química, radica en la posibilidad de estudiar la factibilidad de los residuos a nivel de los constituyentes (celulosa, hemicelulosa y lignina) para la elaboración de los tableros aglomerados.

Los componentes químicos determinados fueron: lignina, celulosa, hemicelulosa, extraíbles y cenizas; todos calculados en porcentaje de peso por métodos gravimétricos estandarizados.

Los resultados de cada uno de los análisis por separado se encuentran en el ANEXO II

La tabla 9, muestra el análisis estadístico descriptivo realizado a los resultados de la caracterización química de la FFPA mediante el *software SPSS v.22* (versión de prueba). Los resultados se encuentran en porcentaje peso-peso. (%p/p)

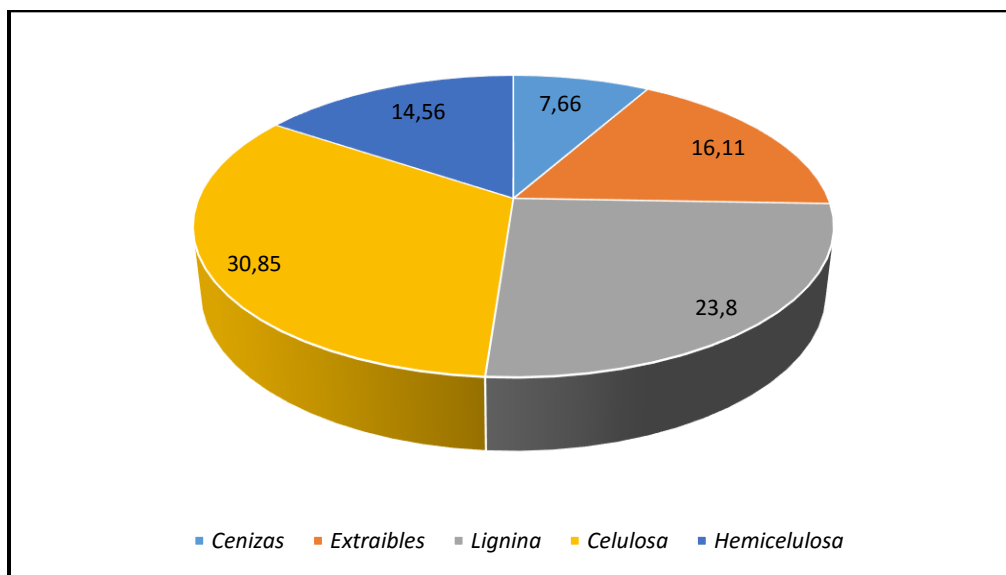
Tabla 9. Análisis estadístico composición química FFPA

Componente	N	Mínimo (%p/p)	Máximo (%p/p)	Media (%p/p)	Desviación estándar (%p/p)	Varianza (%p/p)
Cenizas	3	7.4248	7.9075	7.6635	0.2414	0,0580
Extraíbles	3	15.3302	16.9048	16.1068	0.7875	0,6200
Lignina	3	23.1300	24.3100	23.8000	0.6060	0,3670
Celulosa	3	30.6684	30.9887	30.8531	0.1657	0,0270
Hemicelulosa	3	14.1303	14.8215	14.5639	0.3778	0,1430

N: Número de ensayos

La grafica 27, representa la proporción promedio para cada componente en la FFPA obtenido a partir del análisis estadístico.

Gráfica 27. Contenido porcentual (%p/p) de los componentes químicos en FFPA



Se puede evidenciar que la celulosa es el constituyente que se encuentra en mayor proporción en las fibras con un 30,85%, seguido por la lignina con un 23,8%. La importancia de estos resultados radica en el alto contenido de la celulosa, que como se mencionó en el apartado 3.4.1. La celulosa forma microfibrillas que están dispuestas de una manera ordenada y ajustada, formando regiones "cristalinas" que son insolubles en agua. Esta configuración rígida es de gran importancia para la estructura celular y la resistencia de la pared celular de la planta. De acuerdo con esta definición existe una gran posibilidad de obtener tableros aglomerados de buena resistencia, comparables con los convencionales. La cantidad de extraíbles (grasas, ceras y resinas) se debe a que la FFPA aún está impregnada por aceite del proceso de extracción de las plantas de beneficio, pero este componente refleja que el material puede ser resistente a agentes externos, como la humedad. Los resultados obtenidos de celulosa, extraíbles, lignina, celulosa y hemicelulosa se compararon con los reportados en la literatura mediante la tabla 10:

Tabla 10. Comparación de los datos de composición química para la FFPA

Componente	Datos obtenidos (%p/p)	Datos reportados en la literatura (%p/p)*
Cenizas	7.66±0,24	8,44 ±0,22
Extraíbles (Tolueno-Etanol)	16.11±0,79	14,9
Lignina	23.80±0,61	24,0 ±0,01
Celulosa	30.85±0,17	36,6 ±0,02
Hemicelulosa	14.56±0,38	18,2 ±0,06

Fuente: (García, Jesus Alberto; Garcia, Manuel; Das, 2009)*

Se puede apreciar que los valores de la desviación están cercanos al promedio obtenido experimentalmente, por lo tanto podemos afirmar que las pruebas realizadas fueron satisfactorias. Al comparar los datos obtenidos con los reportados en la literatura se observa que la mayor diferencia está en la celulosa con aproximadamente un 15,71% de margen de error. Las posibles causas del margen de error son las condiciones de la fibra; factores como: la edad de la planta, sitio de plantación y el proceso de extracción del aceite en la plata de beneficio, influyen en la composición química de la planta y por ende en la de los residuos que se generan en el proceso

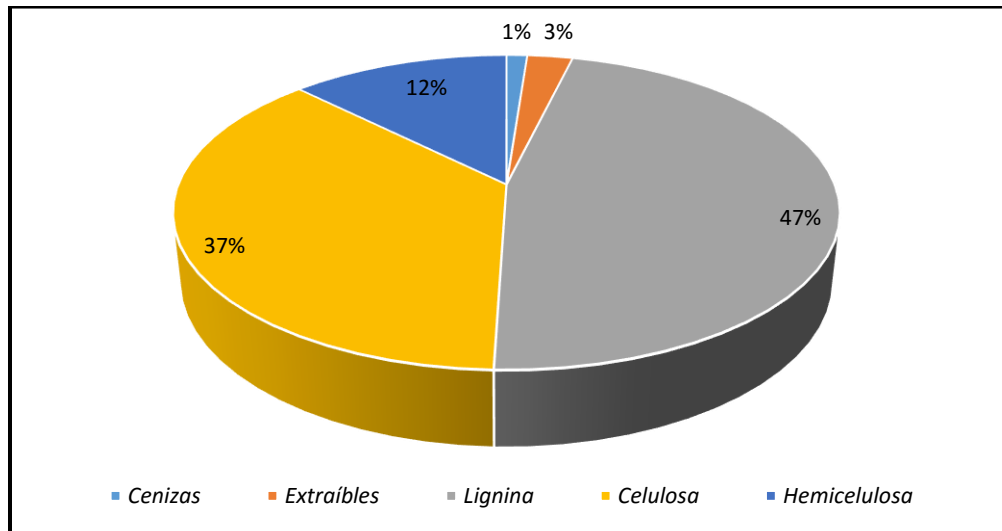
La tabla 11 muestra los resultados obtenidos para la caracterización química de la CMC, también analizados mediante el *software SPSS v.22* (versión de prueba). Los resultados de encuentran en porcentaje peso-peso. (%p/p)

Tabla 11. Análisis estadístico composición química CMC

Componente	N	Mínimo (%p/p)	Máximo (%p/p)	Media (%p/p)	Desviación estándar (%p/p)	Varianza (%p/p)
Cenizas	3	1.0381	1.2377	1.1104	0.1106	0,0120
Extraíbles	3	2.2997	2.5475	2.4316	0.1247	0,0160
Lignina	3	42.4100	44.3000	43.6000	1.0359	1,0730
Celulosa	3	33.8900	34.9900	34.4433	0.5501	0,3030
Hemicelulos	3	11.4500	12.0050	11.7483	0.2798	0,0780
a						

N: Número de ensayos

Gráfica 28. Contenido porcentual (%p/p) de los componentes químicos en CMC



La composición de La CMC representada en la gráfica 28, muestra que el principal constituyente de este material es la lignina con un 47%, mientras que el menor son las cenizas con un 1%. Este valor comparado con el obtenido de la FFPA refleja una baja contribución a la regulación de la carga hidrostática del material, además la cantidad de extraíbles (3%) también es muy baja, esto indica que el material se puede degradar fácilmente por agentes externos, como la humedad del ambiente, lo cual afectaría el uso en un material aglomerado. La cantidad de hemicelulosa es menor por lo tanto disminuye la resistencia de las partículas debido a la matriz semicristalina de la celulosa. La cantidad de celulosa es menor respecto a otros residuos agroindustriales utilizados en la elaboración de tableros aglomerados; por ejemplo el yute con un 57% de celulosa o el bagazo de caña de azúcar con un contenido que varía desde el 49% hasta el 62%. (Mejia Almeida, 2012).

Se realizó una comparación de los componentes químicos determinados con los reportados en diversas publicaciones. La comparación se encuentra en la tabla 12.

Tabla 12. Comparación de los datos de composición química para la CMC

Componente	Datos obtenidos (%p/p)	Datos reportados en la literatura (%p/p)*
Cenizas	1.1104±0.1106	12.3±0.23
Extraíbles (Tolueno-Etanol)	2.4316±0.1247	No reporta
Lignina	43.6000±1.0359	14.7±0.35
Celulosa	34.4433±0.5501	35.4±0.33
Hemicelulosa	11.7483±0.2798	37.0±0.50

Fuente: (Daud et al., 2013)*

Las composiciones químicas en los materiales son diferentes dependiendo de su ubicación geográfica, clima, edades y estado del suelo. La cantidad de celulosa es muy semejante, además el cacao de variedad CCN51 es una especie no maderable y por tanto su contenido de celulosa se encuentra entre 35,4%-37,9% (Shakhes, Marandi, & Zeinaly, 2011). El contenido de lignina hallado difiere mucho del reportado, pero de igual forma los factores externos influyen en este. Teniendo en cuenta que la lignina es uno de los componentes estructurales de las plantas que une a las fibras de celulosa entre sí, el alto contenido de lignina (43% en peso) nos permite afirmar que el material aglomerado nos brindara una buena resistencia mecánica.

Como un aparte de la caracterización química se realizó la determinación de solubilidad de los materiales en hidróxido de sodio al 1%. Esta prueba nos permite conocer que tan vulnerable es el material al ataque por hongos, ya que el NaOH disuelve los carbohidratos presentes en las fibras, los cuales en un medio adecuado sirven de sustrato a microorganismos y degradan el material. Por lo tanto a mayor solubilidad en hidróxido de sodio va a ser mayor

la tendencia al ataque por hongos y por lo tanto degradación del material. También se realizó un análisis estadístico descriptivo usando el *software SPSS v.22* (versión de prueba). Los resultados se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Análisis Estadístico Descriptivo solubilidad NaOH 1%

Residuo	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
FFPA	3	32.9110	32.9110	33.1330	0.2011	0,0400
CMC	3	47.1300	48.0300	47.5067	0.4676	0,2190

N: Número de ensayos

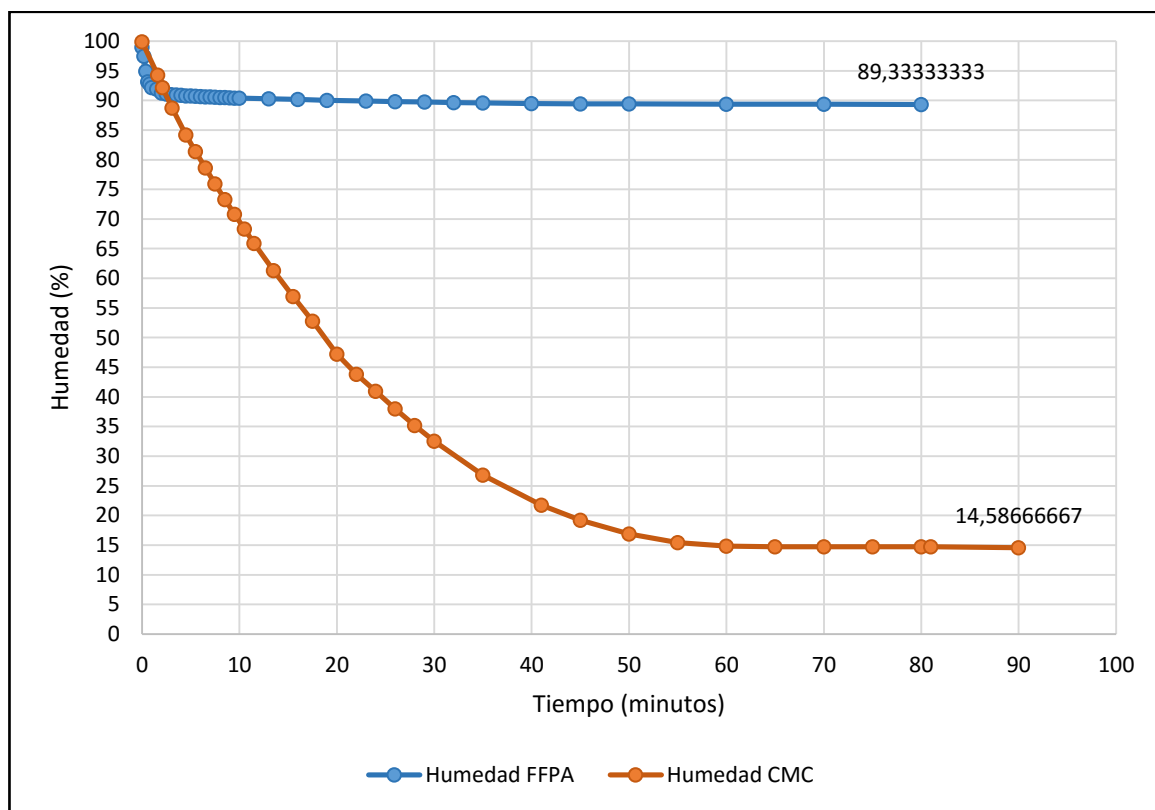
Los datos reportados indican que la solubilidad en NaOH al 1% para la CMC es de 27,5 % (Daud et al., 2013) mientras que para la FFPA no se encontraron datos para fibra, pero si para la fibra de raquis y aunque difiere un poco de la composición química de esta, la composición es semejante y pertenecen a la misma planta. La solubilidad de la fibra de raquis de palma es de 34,10% (Mejia Almeida, 2012). Lo que indica que también es un residuo vulnerable al ataque de microorganismos bajo condiciones inadecuadas de humedad y temperatura, por lo que se debe tener precaución en su transporte e inmediato procesamiento.

7.1.2. Caracterización física

- **Determinación de humedad**

Los resultados de la determinación de humedad para la FFPA y CMC se muestran en la siguiente gráfica:

Gráfica 29. Determinación de humedad de los residuos de FFPA y CMC



Los datos de humedad están calculados con base húmeda (masa del material seco + masa de agua dentro del material). El análisis estadístico se muestra en la tabla 14.

Tabla 14. Análisis estadístico descriptivo humedad FFPA

Material	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
FFPA	3	89.3100	89.3600	89.3333	0.0252	0,0010
CMC	3	12.9600	16.2600	14.5867	1.8151	3,2950

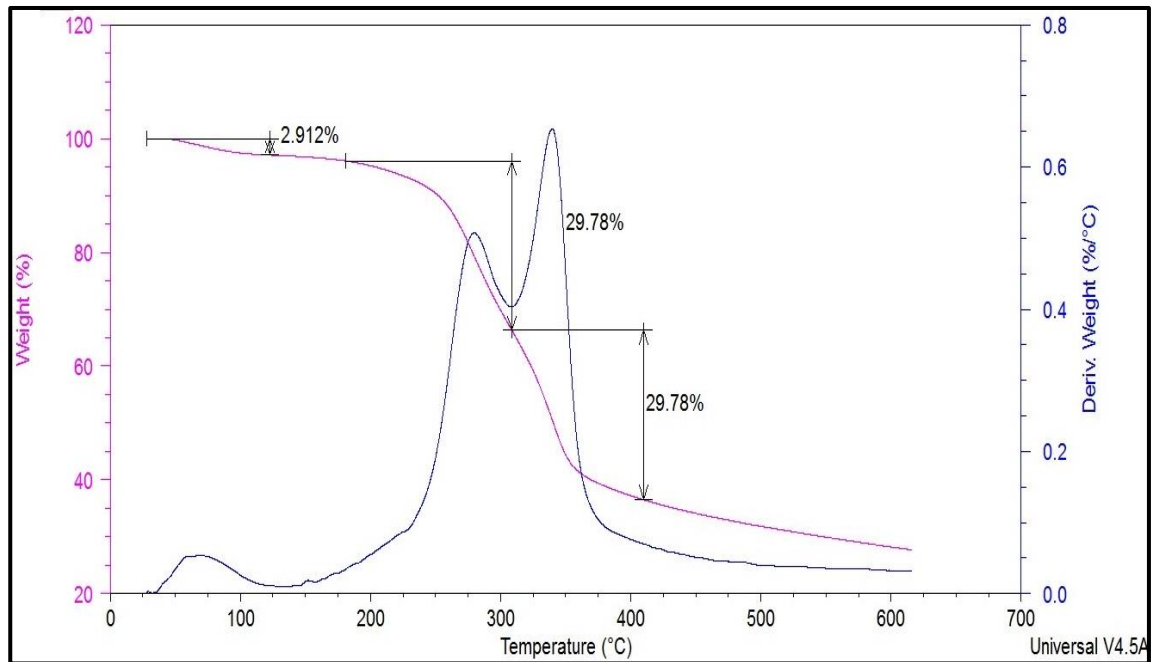
El análisis de determinación de humedad realizado a ambos materiales muestra que la FFPA contiene un 10,677% de humedad y la CMC un 84,953%. Esta humedad es atribuida a la cantidad de agua presentes en las muestras, la CMC presenta una mayor cantidad debido al proceso acelerado de descomposición, por tal razón la importancia de realizar un secado inmediato al material. La humedad presente en la FFPA es debido a la cantidad de aceites impregnados después del proceso de extracción en las plantas de beneficio. De igual forma se sugiere que para la elaboración de los tableros aglomerados las partículas el contenido de las partículas no debe ser mayor al 13%. Una humedad alta está asociada con una menos adhesión entre las partículas debido a la acumulación de agua dentro del material.

- **Caracterización térmica**

La termogravimetría nos permite obtener información de la pérdida de masa de los constituyentes de los residuos orgánicos en la medida que realizamos un barrido de temperatura. Para nuestro caso, los residuos se ven afectados inicialmente por la eliminación del agua y posteriormente se degradan los componentes de hemicelulosa, celulosa y lignina.

Las gráficas 30 y 31 muestran los termogramas de TGA/DTA para la FFPA y la CMC respectivamente.

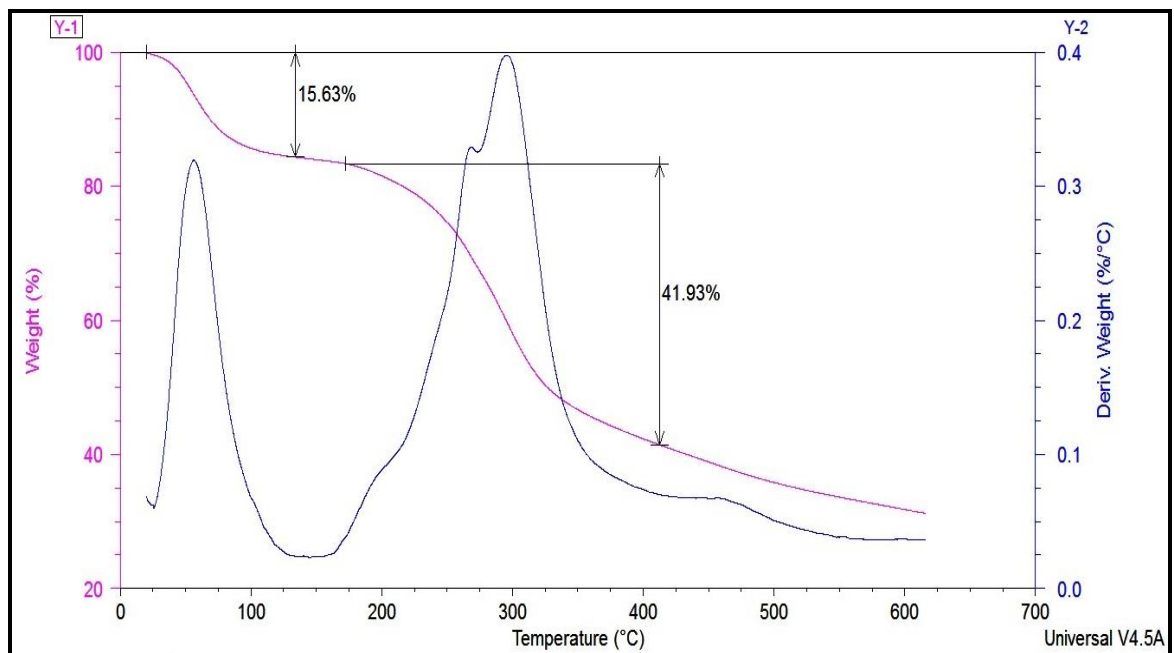
Gráfica 30. TGA/DTA para la FFPA



Para la FFPA el primer pico corresponde a una pérdida de masa de 2,912% que se refiere al contenido de humedad de la muestra, esta se evapora a los 110°C, después el material se mostró térmicamente estable hasta una temperatura de 150°C, a partir de esta temperatura y hasta los 310°C la pérdida de masa corresponde a la hemicelulosa con un 29,78%. Posteriormente se presenta un pico máximo que oscila entre aproximadamente los 340°C y 360°C y que es producto de la degradación de la celulosa con una pérdida de masa de 29,78%. Por último, se da la degradación de la lignina y otras reacciones secundarias de pirolisis en la muestra. Los resultados

obtenidos en este análisis coinciden con los reportados (García, Jesus Alberto; Garcia, Manuel; Das, 2009) en la que la temperatura máxima de degradación de la hemicelulosa corresponde a un pico de 315°C, la de la celulosa de 350°C y para la lignina de 419°C.

Gráfica 31. TGA/DTA para la CMC



Para la CMC se pueden observar tres etapas de degradación de masa, éstas se definen claramente en los picos que arroja la primera derivada de la curva de pérdida de porcentaje en peso versus la temperatura (curva en azul del termograma). El primer pico, corresponde a la evaporación de la humedad en la muestra; esta va desde una temperatura de 35°C hasta los 110°C con una pérdida de masa de 15,63%. Una segunda etapa corresponde a la degradación de las hemicelulosa entre los 200°C y los 275°C

con una pérdida de masa de 41,93%. La degradación de la celulosa y lignina se da sobre los 450°C. Los valores obtenidos son similares con los reportados en la literatura (Seong, Husseinsyah, & Osman, 2013) en la que la evaporación de la humedad se da entre los 30 y 100°C, la descomposición de la hemicelulosa de 200 a 350°C y la descomposición de la celulosa y lignina sobre los 350°C.

- **Determinación de la densidad aparente de las partículas**

Se determinó la densidad aparente para la FFPA sin tamizar, solo fue necesario hacer la reducción de tamaño para romper algunos cuescos que quedaban aun mezclados con el material, para la CMC se determinó la densidad aparente de tres tamaños obtenidos a partir del tamizado; malla 20, 30 y 40 respectivamente, ya que estos representan la mayor fracción másica dentro del tamizado. Se utilizó la ecuación 6 para la determinación de las densidades de las diferentes muestras.

Tabla 15. Densidad aparente de los materiales

Material	Peso jeringa+ muestra (g)	Peso jeringa vacía (g)	Volumen jeringa (cm³)	Densidad aparente (g/cm³)
FFPA	5,30	4,00	5,00	0,26
CMC- Sin tamizar	6,70	4,00	5,00	0,54
CMC- Malla 20	6,30	4,00	5,00	0,46
CMC-Malla 30	6,00	4,00	5,00	0,40
CMC-Malla 40	5,90	4,00	5,00	0,38

La densidad de un material es la relación entre el volumen y el peso seco de este, incluyendo huecos y poros que contiene. Existen factores que afectan la densidad de los sólidos y estos son la composición y la estructura. La densidad es un parámetro importante, debido a que indica características como la porosidad, el grado de aireación y la capacidad de drenaje. (FEUM, 2016)

7.2.Elaboración de tableros aglomerados

Para la elaboración de los tableros aglomerados de partículas se realizó un secado de los materiales, la FFPA presenta una humedad del 10,67% por lo cual fue necesario someterla por 48 horas a un secado controlado a 50°C, mientras que la CMC es de 84,95% y por lo tanto, se hizo necesario un proceso de secado por 72 horas a 50°C. Se verifico que la humedad residual de los materiales fuera aproximadamente 10%, debido a que los residuos absorben humedad del ambiente.

Se realizaron varias pruebas preliminares con el fin de fijar las variables del proceso de elaboración de tableros aglomerados de partículas. El primer parámetro evaluado fue la humedad de los materiales, por lo que se decidió elaborar varios tableros de FFPA y CMC con diferentes contenidos de humedad y evaluar propiedades cualitativas como la consistencia del tablero elaborado al ejercer una mínima presión de forma manual.

Respecto a la cantidad de material y después de hallar el volumen del molde de la prensa hidráulica (968,66 cm³), se realizó una comparación con la densidad de cada material para calcular la cantidad de material en cada caso, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 16. Cantidad de residuos a utilizar ensayo 1

Material	Volumen del molde del molde (cm³)	Densidad de la muestra (g/ cm³)	Cantidad de material (g)
FFPA	968,66	0,26	251,85
CMC	968,66	0,54	523,08

Los resultados obtenidos anteriormente en la tabla 16, corresponden al molde totalmente lleno. Por tanto, se realizó un ensayo para cada material bajo las condiciones de humedad al 10% (calculada mediante termo-balanza PRECISA XM60) y con un contenido de 10% de resina de poliéster pre-acelerada POLIESCOL añadiéndole una cantidad del 2% v/v de catalizador MEK PEROXIDO (Gil, 2012). Estos valores son establecidos según la norma ASTM D-1554-10, la cual indica que para la elaboración de tableros aglomerados la cantidad de resina debe estar entre un 4% y un 20% (ASTM, 2006), con una presión de trabajo aproximadamente 44,12 MPa. El tiempo de prensado en gran medida se ve influenciado por el tiempo de curado de la resina, esta tiene un tiempo de gel de 14-18 minutos, sin embargo para asegurar un buen acabado de los tableros se dejó curar por 12 horas con la presión de trabajo a una temperatura ambiente (17°C). Los tableros obtenidos se muestran en las gráficas 32 y 33.

Gráfica 32. Tablero aglomerado de FFPA prueba 1



Gráfica 33. Tablero aglomerado de CMC prueba 1



Los tableros obtenidos bajo los parámetros establecidos anteriormente se desintegraron de una forma sencilla al ejercer una presión manual, principalmente el de CMC, debido a la ausencia de una buena adherencia entre las partículas y la resina, la razón se debe a los diversos tamaños que

están impidiendo la cohesión entre el adhesivos y las partículas. Para el sistema de FFPA con adhesivo se evidenció que la mezcla no fue homogénea, se presentaron zonas en las que la resina usada no impregno la fibra, lo cual indica que la presión utilizada y el tiempo de curado no son los óptimos para el proceso.

Se realizó un segundo ensayo disminuyendo la masa de los materiales, para esto se realizaron los cálculos para un volumen de 700 cm³ para CMC y FFPA. Basados en el anterior ensayo se realizó un secado de las partículas hasta un 8% de humedad durante 60 y 80 horas para cada residuo a 50°C. Para los residuos de CMC se llevó a cabo un tamizado, relacionando la mayor fracción másica retenida en las mallas 20-30-40 (ANEXO I). Para la FFPA no se realizó tamizado, debido a que se quiso comprobar la interacción cuesco-fibra junto a la resina en el momento del prensado, logrando ofrecer una mayor rigidez a los tableros aglomerados y también por la razón de reducir costos de separación ante un proceso a gran escala, siendo la fibra-cuesco el residuo solido del prensado en las plantas de beneficio de palma de aceite.

Tabla 17. Cantidad de residuos a utilizar ensayo 2

Material	Volumen del molde del molde (cm³)	Densidad de la muestra (g/ cm³)	Cantidad de material (g)
FFPA	700,00	0,26	182,00
CMC- Malla 20	700,00	0,46	322,00
CMC-Malla 30	700,00	0,40	280,00
CMC-Malla 40	700,00	0,38	266,00

Se realizaron ensayos para cada material, variando la composición entre el 4% y el 10% de resina para tableros aglomerados de CMC y FFPA. Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica 34.

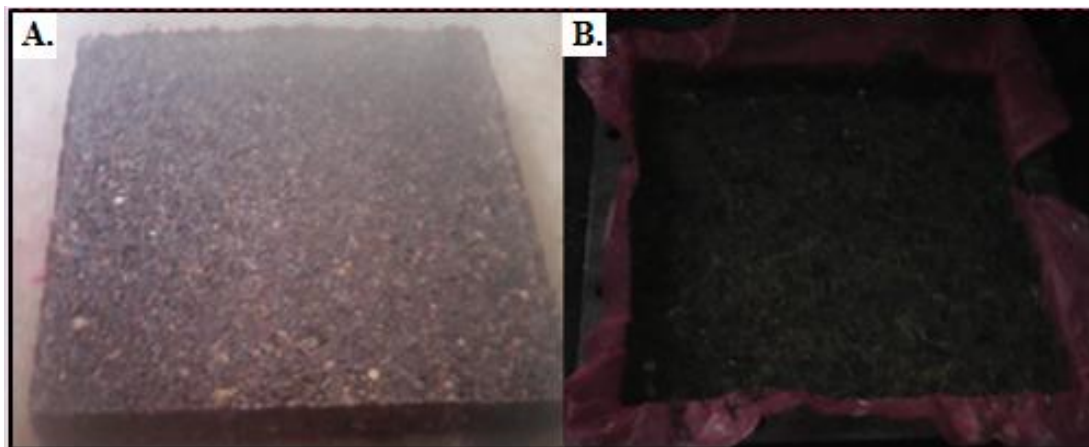
Gráfica 34. Tablero de CMC malla 40 elaborado con 4% de resina



Los tableros aglomerados obtenidos a partir de la CMC y la FFPA se desintegraron posterior al proceso de prensado, el único tablero que no se desintegró en su totalidad fue el elaborado con partículas de CMC-malla 20 con un 4% de resina. Esto demuestra la importancia de la selección del tamaño de partícula en el residuo de CMC, debido a que influye directamente en la adhesión junto con la resina. Para los tableros de FFPA, la estructura fibrosa del residuo presenta problemas para ser mojado por la resina; por tanto se procedió a elaborar los tableros aglomerados a partir de un 10% de resina para cada material, este valor se toma como base para la elaboración de tableros, por ser un intermedio según lo establecido la norma ASTM D-1554 respecto a la cantidad de adhesivo. Los tableros aglomerados obtenidos con 10% de resina se muestran en la siguiente figura:

Gráfica 35. Tablero de CMC y FFPA con 10% resina

(A) Tablero de CMC (B) Tablero de FFPA



Se puede observar que para los tableros de FFPA con 10% de resina el material es más consistente debido a la homogeneidad entre residuo y resina. Por otro lado, el residuo de la CMC muestra en algunas zonas desunión de las partículas del tamaño de malla-30, mientras que las de tamaño de malla-20 muestran un material más denso; y por tanto se procede a elaborar tableros aglomerados a partir de partículas de malla 20 y con cantidades de resina entre el 4% y 20% de resina.

A partir de las pruebas anteriores se fijaron algunos parámetros para la elaboración de los tableros aglomerados; la humedad de los residuos debe ser igual o inferior al 8%, la presión de operación establecida es de 550 Kg/cm² correspondiente a una carga de 25 toneladas, la temperatura de curado se realiza a temperatura ambiente, de acuerdo a las especificaciones de la resina de poliéster insaturado durante 12 horas a presión constante.

Los parámetros que se fijaron a partir de las pruebas preliminares se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 18. Parámetros para la elaboración de tableros aglomerados

Humedad (%)		8%			Presión de operación (Kg/cm ²)		550		
Temperatura (°C)		Ambiente			Tiempo (Horas)		12		
Tamaño de partícula		CMC: Malla 20				FFPA: Sin tamizar			
tablero aglomerado	Residuo	Resina		catalizador	tablero aglomerado	Residuo	Resina		catalizador
	gramos	gr	ml	ml		gramos	gr	ml	ml
CMC-resina 4%	322	29,28	23,055	0,5	FFPA-resina 10%	182	55,51	43,708	0,9
CMC-resina 6%		43,92	34,582	0,7	FFPA-resina 12%		66,612	52,450	1
CMC-resina 8%		58,56	46,110	0,9	FFPA-resina 14%		77,714	61,192	1,2
CMC-resina 10%		73,2	57,637	1,1	FFPA-resina 16%		88,817	69,934	1,4
CMC-resina 15%		109,8	86,456	1,7	FFPA-resina 18%		99,918	78,675	1,6
CMC-resina 20%		146,4	115,27	2,3	FFPA-resina 20%		111,02	87,417	1,7

7.3. Caracterización físico-mecánica

La caracterización físico-mecánica se realizó con el objetivo de conocer algunos de los parámetros que se usan actualmente en la industria para la evaluación de la calidad de los tableros aglomerados elaborados. Esta caracterización está contemplada en la norma ASTM D 1037.

7.3.1. Caracterización mecánica

Después de elaborados los tableros aglomerados, estos se cortaron para realizar la prueba de flexión estática, con la cual se determinan el módulo de rotura y el módulo elástico MOR y MOE respectivamente. Las dimensiones a las que se cortaron los tableros aglomerados fueron de 20 cm de largo, 5 cm de ancho y un espesor entre 0,8 cm y 1 cm de acuerdo como lo exigen las normas técnicas para tableros aglomerados. Se cortaron 3 configuraciones por sistema fibra/resina.

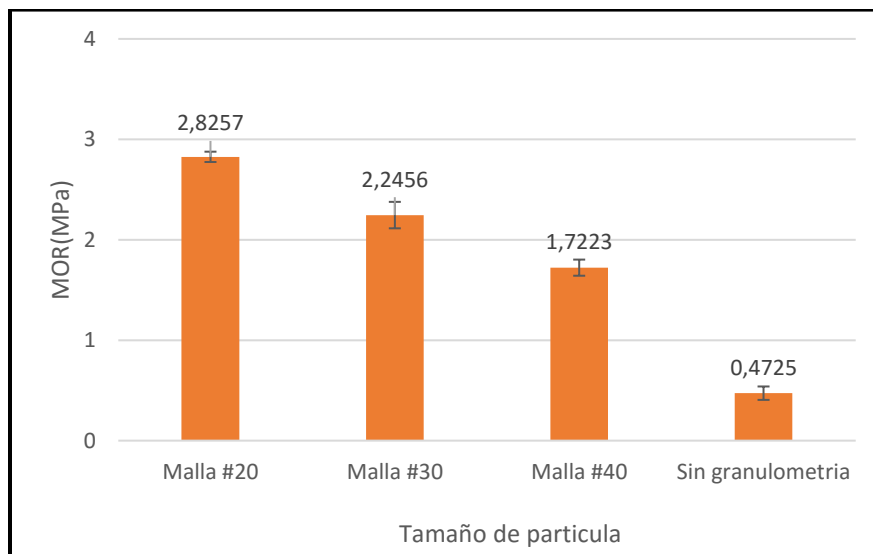
Se comprobó mediante pruebas de resistencia mecánica a la flexión, cuál de los tableros aglomerados fabricados con diferentes tamaños de malla arrojaba las mejores propiedades mecánicas. En el caso de la CMC, los resultados se presentan en la tabla 19 con relación al módulo de ruptura (MOR) para cada tablero elaborado con un 10% de resina y diferentes tamaños de mallas (20, 30 y 40). Los datos obtenidos para el cálculo del MOR se encuentran en el ANEXO V.

Tabla 19. Análisis estadístico de MOR para selección de tamaño de partícula de CMC

Muestra	MOR promedio (MPa)	Desviación estándar
Sin granulometría	0,4725	0,0668
Malla 20	2,8257	0,0514
Malla 30	2,2456	0,1317
Malla 40	1,7223	0,0802

Mediante la gráfica 36, se muestran los promedios del módulo de rotura (MOR) con su respectiva desviación estándar para cada sistema fibra/10%resina, variando el tamaño de la partícula de los aglomerados para diferentes mallados.

Gráfica 36. MOR para selección de tamaño de CMC



De acuerdo con los resultados de la gráfica anterior, tenemos que los valores del MOR para los tableros aglomerados en estudio, presentan una tendencia descendente en la medida que incrementamos la granulometría del tamaño de partícula y por tanto la configuración que presenta un mejor comportamiento a la rotura en flexión es el sistema fibra/10%resina con malla # 20 con un valor promedio de 2,8257 MPa. La relación que presentó el valor más bajo fue el sistema fibra/10%resina y sin tamizar.

Esto es debido a la cohesión entre partículas grandes y pequeñas del material y la cantidad de resina usada es débil. Trabajos previos de elaboración de tableros aglomerados con otros

materiales como el *Kelempayan* demuestran que a mayor tamaño de partícula las propiedades como el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura aumentan (Lias et al., 2014). Por otro lado, tableros aglomerados de cemento mezclados con partículas de madera, mostraron que el módulo de ruptura, módulo de elasticidad, absorción de agua e hinchamiento están altamente correlacionados con la longitud y grosor de las partículas de la madera, demostrando que entre mayor es el tamaño de las partículas las propiedades mecánicas y físicas aumentan (Badejo, 1988).

Según los valores arrojados del módulo a la rotura en el estudio anterior, se comprueba que las propiedades mecánicas de los tableros aglomerados particulados se ven afectadas conforme se disminuye el tamaño, siendo una variable importante a tener en cuenta en la elaboración de estos materiales. Por tan razón el patrón de referencia para continuar el trabajo con respecto a la granulometría fue el tamaño de partícula obtenido en el tamiz de malla # 20.

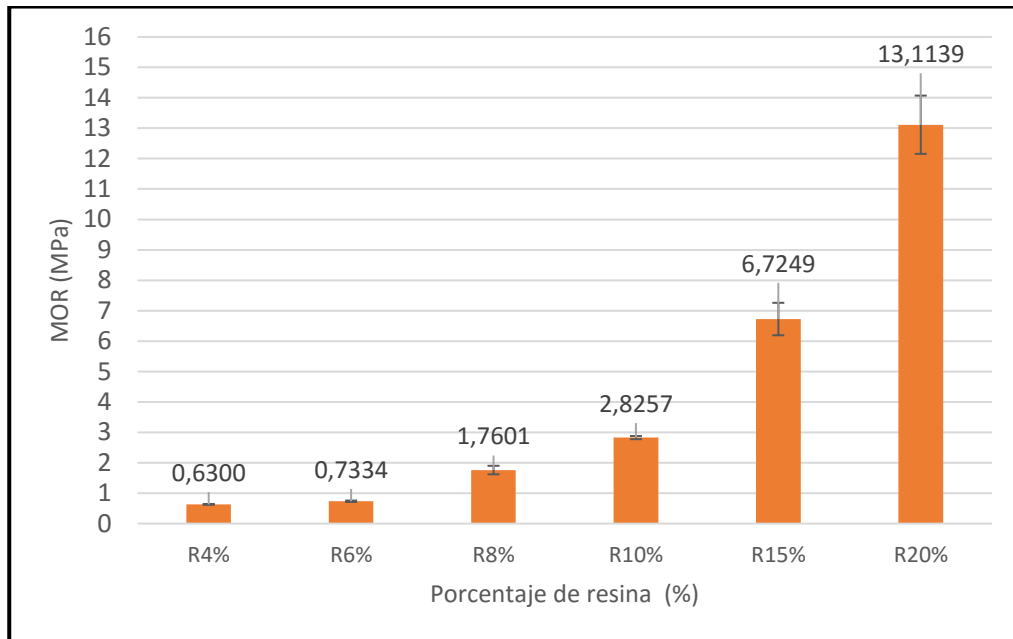
Los resultados obtenidos de módulo de ruptura (MOR) para los tableros aglomerados a partir de CMC en tamiz #20 y variando la cantidad de resina entre el 4% y el 20%, se muestran en la tabla 20. Los datos obtenidos mediante las pruebas se muestran en el ANEXO V

Tabla 20. Análisis estadístico MOR (MPa) para tableros aglomerados de CMC

Muestra	MOR promedio (MPa)	Desviación estándar
CMC-tamiz 20-resina 4%	0,6300	0,0144
CMC-tamiz 20-resina 6%	0,7334	0,0237
CMC-tamiz 20-resina 8%	1,7601	0,1404
CMC-tamiz 20-resina 10%	2,8257	0,0514
CMC-tamiz 20-resina 15%	6,7249	0,5339
CMC-tamiz 20-resina 20%	13,1139	0,9582

El valor promedio máximo de MOR para los tableros aglomerados de CMC es de 13,1130 MPa \pm 0,9582, este valor se obtuvo con la cantidad máxima de resina (20%) permitida por la norma ASTM para tableros aglomerados particulados, la carga promedio máxima que pueden soportar los tableros aglomerado de CMC es de 312,236 N \pm 22,8141. En la gráfica 40, mediante un gráfico de barras se puede observar la tendencia del comportamiento del módulo de rotura frente a diferentes configuraciones de residuo/%resina.

Gráfica 37. MOR para tableros aglomerados de CMC variando la cantidad de resina



En la gráfica 37, se observa el comportamiento a la rotura en flexión para los sistemas con residuos de CMC y diferentes cantidades de resina de poliéster insaturado (residuo/%resina). De acuerdo con la tendencia de los valores de MOR, se muestra una relación ascendente, es decir, en la medida que incrementamos los porcentajes de resina el valor de la resistencia se va incrementando hasta un valor máximo de 113,113 MPa que corresponde al sistema de CMC/20% poliéster, principalmente se observa que por encima del 10% el aumento se hace más pronunciado con un incremento porcentual $\Delta I = > 100\%$ con relación a la resistencia del material. Como se mencionó anteriormente de acuerdo con la norma ASTM D-1554 (ASTM, 2006) para aglomerados, la cantidad de adhesivo no debe superar el 20%. Es importante resaltar que los valores calculados de la desviación estándar son bajos en cada una de las configuraciones y por tanto es un indicador de la homogeneidad de los constituyentes (residuo/%resina) en los tableros aglomerados.

Al comparar los resultados obtenidos de MOR para tableros aglomerados de CMC con otros reportados en la literatura para elaboración de tableros con residuos lignocelulósicos se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 21. MOR de tableros aglomerados elaborados con residuos lignocelulósicos

Residuo lignocelulósico	MOR (MPa)	Referencia
Cascara de maíz	5,6	(Madurwar, Ralegaonkar, & Mandavgane, 2013)
Cascarilla de arroz	6,5	
Cascara de maní	6,3	
Raquis de palma	9,75	(Mejia Almeida, 2012)
Bagazo de caña de azúcar	5,91	(Monteiro et al., 2011)
Racimo de plátano	14,29	(Quintana, Velásquez, Betancourt, & Gañán, 2009)
Corteza de coco	25,56	(Khedari, Nankongnab, Hirunlabh, & Teekasap, 2004)

Según la tabla 21, el MOR de tableros aglomerados con residuos agroindustriales más bajo lo presenta la cascara de maíz, mientras que el más alto se da en los residuos de la corteza del coco 25,56%, con estos valores se estableció un rango comparativo con los resultados obtenidos con los tableros elaborados con CMC con 15% y 20% de resina respectivamente. A pesar de que las condiciones de elaboración entre un material y otro varíen respecto a resina utilizada, presión y temperatura de termoconformado del tablero, este da un resultado satisfactorio para módulo de ruptura comparado con otros residuos agroindustriales usados para elaborar tableros aglomerados.

Por otro lado se realizó una comparación con tableros aglomerados comercializados en Colombia, fabricados a nivel industrial y mediante procesos tecnificados, los cuales utilizan resinas como la urea-formaldehído y melaminicas, en este caso se hizo la comparación con tableros aglomerados 9 mm de TABLEMAC. Los tableros aglomerados elaborados por la empresa TABLEMAC presentan un MOR de $17,6519 \text{ MPa} \pm 1,9613$ ($180 \text{ Kg/cm}^2 \pm 20$) (TABLEMAC, 2016), esto es para un espesor de 9 mm. Los tableros de CMC presentan un espesor de 10 mm, pero este espesor no se encuentra reportado para la empresa TABLEMAC, aun así, la diferencia entre los tableros aglomerados industriales y los tableros de CMC es inferior a 5 MPa (4,538 MPa), esto demuestra que para el tablero aglomerado de CMC con 20% de resina a pesar que este parámetro no es igual ni superior al reportado por TABLEMAC es satisfactorio porque se está trabajando con un residuo lignocelulósico.

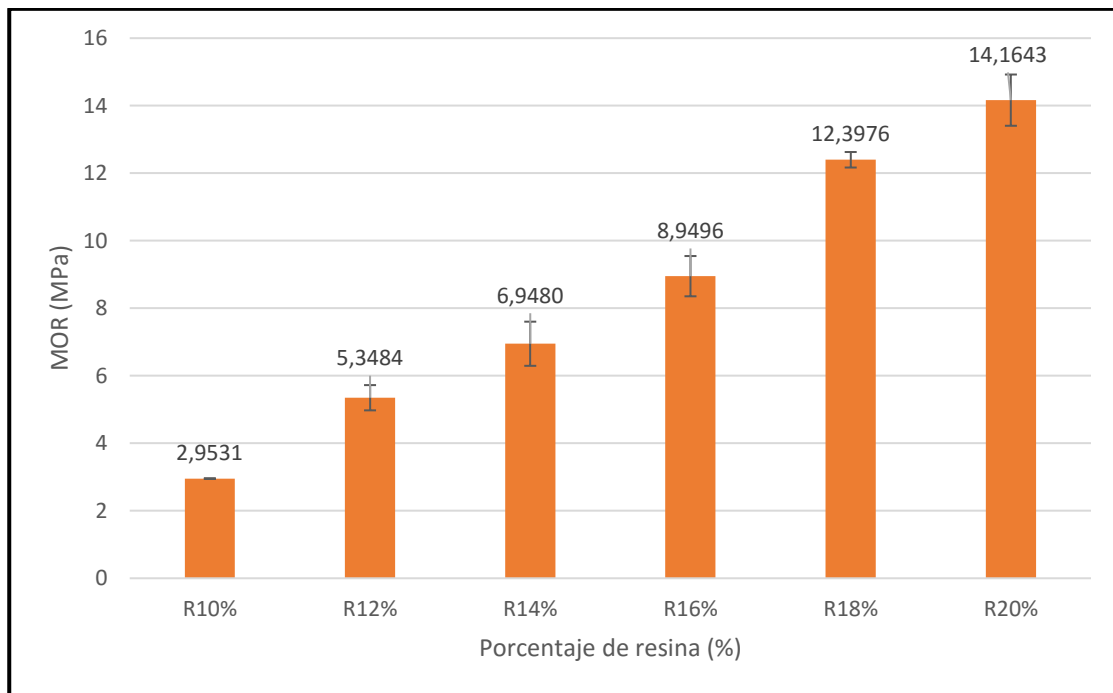
El análisis estadístico realizado de MOR para los tableros aglomerados de FFPA se muestra en la tabla 22. Los cálculos realizados se encuentran en el ANEXO V.

Tabla 22. Análisis estadístico MOR (MPa) para tableros aglomerados de FFPA

Muestra	Media (MPa)	Desviación estándar
FFPA- resina 10%	1,9531	0,1549
FFPA- resina 12%	5,3484	0,3738
FFPA- resina 14%	6,9480	0,6540
FFPA- resina 16%	8,9496	0,5968
FFPA- resina 18%	12,3976	0,2299
FFPA- resina 20%	14.1643	0,7592

El valor promedio máximo de MOR para los tableros aglomerados de FFPA es de 14,1643 MPa \pm 0,7592, con un porcentaje de resina del 20%. . La máxima carga en promedio que soportan los tableros con 20% de resina es de 215,8367 N \pm 11,5689. En la gráfica 38 se observa la tendencia del comportamiento del módulo de rotura frente a las configuraciones de residuo/ %resina

Gráfica 38. MOR para tableros aglomerados de FFPA variando la cantidad de resina.

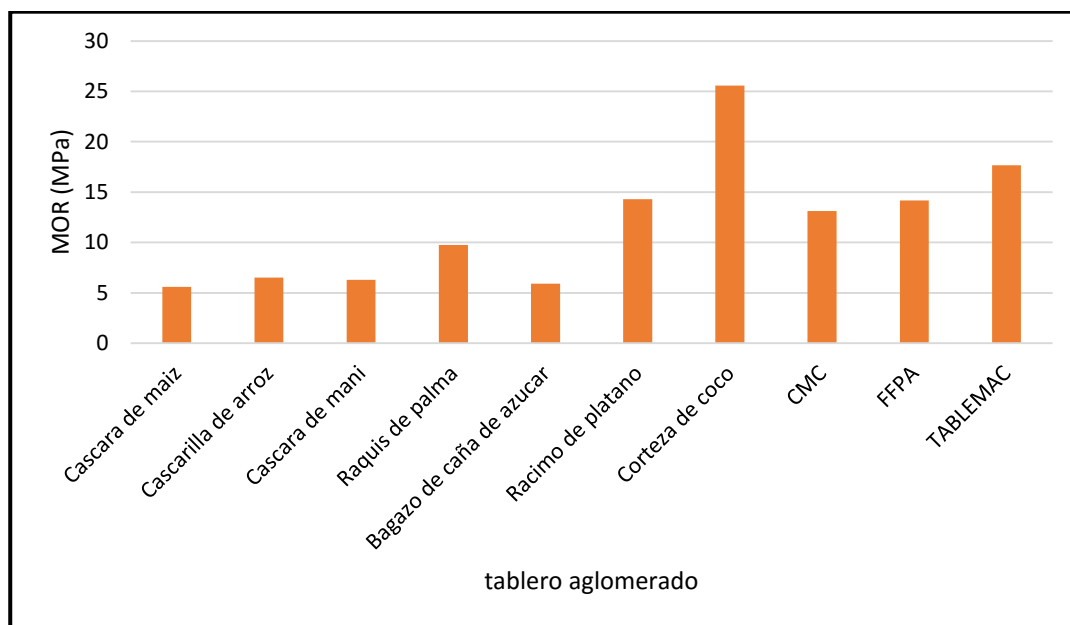


A partir del gráfico anterior, se observa el comportamiento a la rotura en el ensayo de flexión estática para los tableros elaborados con FFPA y cantidades de resina de poliéster que varían desde 10% hasta el 20%. La tendencia que muestra la gráfica es ascendente en la medida que se incrementa el porcentaje de resina, hasta lograr un valor máximo de 14,1643 MPa, correspondiente al sistema FFPA/20% resina de poliéster. Para los resultados

obtenidos en esta prueba la desviación estándar es baja en cada uno de los sistemas analizados, lo cual indica homogeneidad en los tableros aglomerados elaborados.

Al hacer la comparación con los tableros aglomerados de CMC, los reportados en la tabla 21 y los elaborados por la empresa TABLEMAC, se observa que los elaborados a partir de FFPA se encuentran dentro de los rangos reportados, la comparación de estos valores se muestra en la gráfica 39.

Gráfica 39. Comparación de MOR para varios tableros aglomerados



Para los tableros aglomerados elaborados con CMC y FFPA no se presentan grandes diferencias respecto al MOR y es similar al de los tableros elaborados a partir del racimo de plátano. Los tableros elaborados con corteza de coco son los que presentan el mayor MOR con aproximadamente 25,5 MPa y esto puede ser a causa de las condiciones del

proceso utilizado (resina, termocompresión, tiempo) (Khedari et al., 2004). La diferencia con los tableros comercializados en Colombia por la empresa TABLEMAC es menor; teniendo en cuenta que para un espesor de 9 mm la empresa reporta un MOR de 17,6519 MPa. Las características anteriormente descritas demuestran la viabilidad de la elaboración de tableros aglomerados a partir de CMC y FFPA teniendo en cuenta el MOR.

A partir del ensayo de flexión estática también se calculó el módulo elástico MOE, este es otro parámetro para evaluar las propiedades mecánicas de los tableros aglomerados y nos brinda información de la medir la rigidez. Por medio de los datos obtenidos en estos ensayos se calculó la región elástica para cada prueba como la pendiente de una línea recta (ANEXO VI)

El análisis estadístico para los resultados obtenidos para MOE para los tableros elaborados con CMC se muestra en la tabla 23.

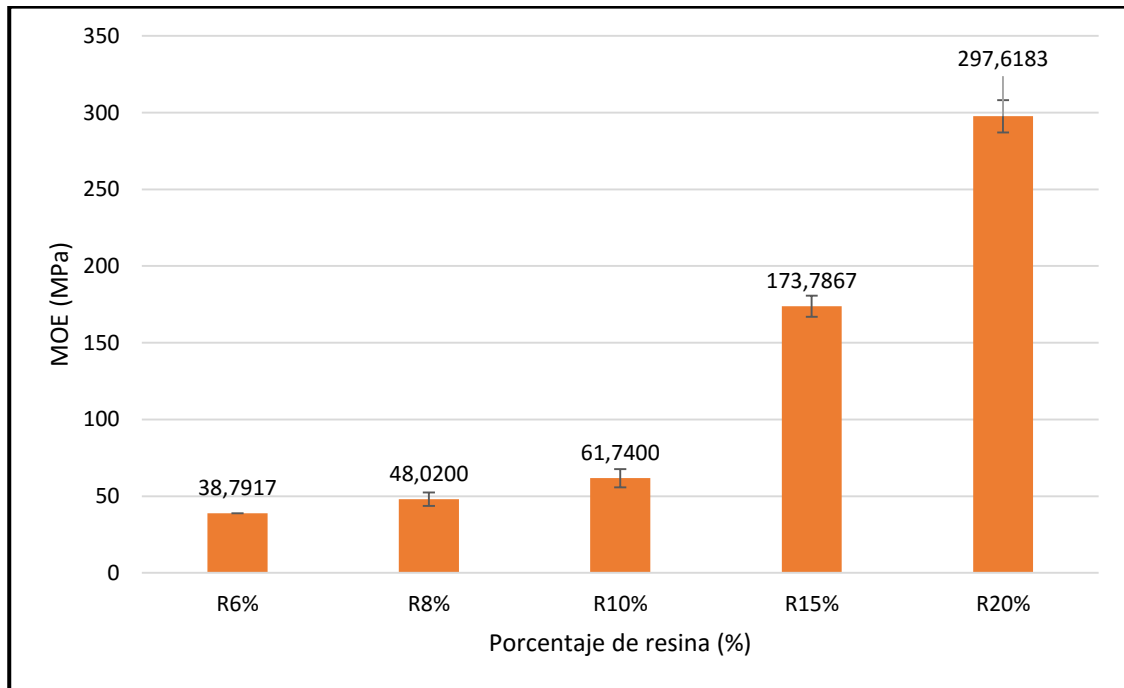
Tabla 23. Análisis estadístico MOE (MPa) para tableros aglomerados de CMC

Muestra	Media (MPa)	Desviación estándar
CMC-tamiz 20-resina 6%	38,7917	4,3021
CMC-tamiz 20-resina 8%	48,0200	5,9409
CMC-tamiz 20-resina 10%	61,7400	6,8600
CMC-tamiz 20-resina 15%	173,7867	10,4788
CMC-tamiz 20-resina 20%	297,6183	21,4218

El tablero elaborado con 4% de resina no presentó una clara tendencia de la región elástica (pendiente de la zona en la cual se presenta un comportamiento lineal) debido a que en la curva esfuerzo vs deformación no se pudo apreciar; este ensayo se rechazó, por lo tanto se calculó el MOE a partir de los tableros con 6% de resina.

Al igual que los resultados obtenidos con MOR, el MOE también aumenta a medida que se aumenta la cantidad de resina, la gráfica 40 muestra la tendencia mencionada.

Gráfica 40. MOE para tableros aglomerados de CMC variando la cantidad de resina



Se puede observar que bajo las condiciones de proceso establecidas el mayor MOE se obtiene con 20% de resina (297,6183 MPa \pm 21,4218), la cantidad de resina utilizada tiene

un gran aporte en el esfuerzo que soporta el tablero aglomerado, debido al contacto entre las partículas del material de CMC y la resina.

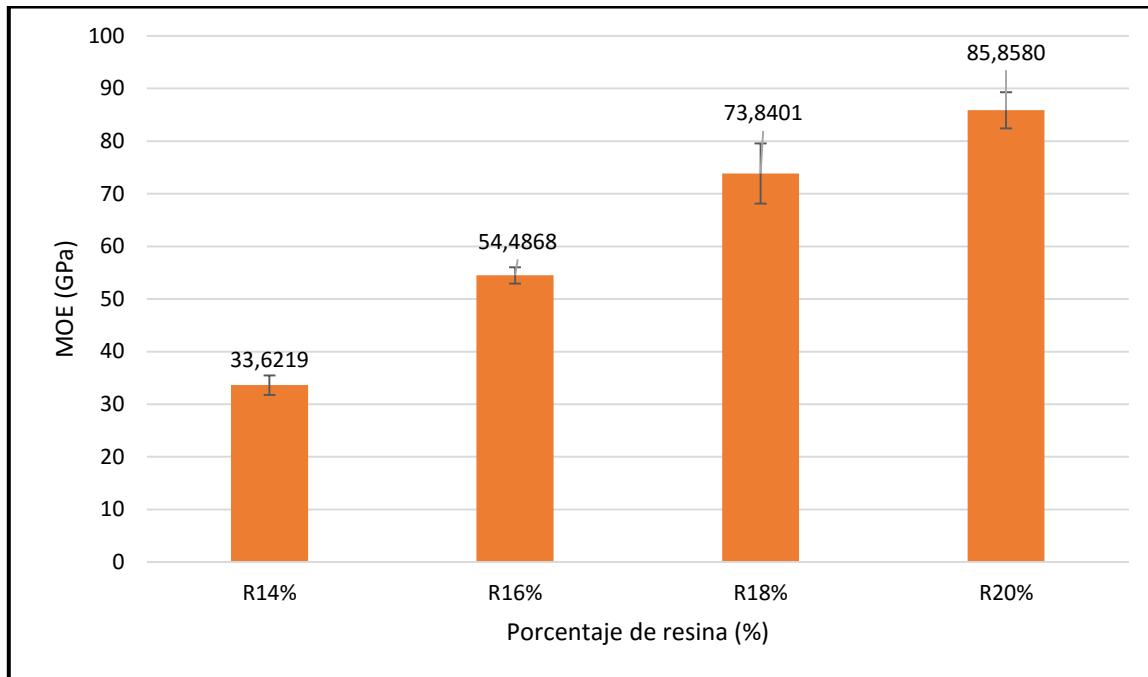
Para los tableros aglomerados a partir de FFPA el análisis estadístico se muestra en la tabla 24.

Tabla 24. Análisis estadístico MOE (MPa) para tableros aglomerados de FFPA

Muestra	Media (MPa)	Desviación estándar
FFPA- resina 14%	33621,95	1870,76
FFPA- resina 16%	54486,83	1547,11
FFPA- resina 18%	73840,07	5742,64
FFPA- resina 20%	85858,04	3435,85

Los resultados de la tabla anterior no se muestran los valores de MOE para tableros con 10% y 12% de resina debido a que en las gráficas obtenidas no se pudo apreciar la zona elástica de la curva esfuerzo vs deformación. Mediante la gráfica 41 se evidencia que a medida que se aumenta la cantidad de resina en el tablero aglomerado, el MOE de este aumenta.

Gráfica 41. MOE para tableros aglomerados de FFPA variando la cantidad de resina



A pesar de las desviaciones que se obtiene en el análisis estadístico, el valor de la desviación es relativamente bajo teniendo en cuenta que el MOE se trabajó en unidades de GPa. La desviación más alta la presentó el conjunto de datos del tablero de FFPA con 18% de resina ($\pm 5,7426$ GPa).

Los datos obtenidos del módulo elástico para los dos tableros de FFPA son muy altos en relación a los de CMC y una de las causas puede ser la distribución de las fibras de la FFPA en el tablero aglomerado, debido a la geometría alargada más no a las partículas; lo que provoca una mayor cohesión fibra-resina por el entrelazamiento. De otro lado, se debe tener en cuenta que no se separaron de los residuos el cuesco presentes en el material proveniente de la planta de beneficio, sino más bien se distribuyeron de forma homogénea en el proceso de prensado; por lo que se puede inferir que esos trozos de cuesco influyeron en el módulo

elástico de los tableros aglomerados de FFPA aportándole mayor rigidez al material. (Gatani, 2013)

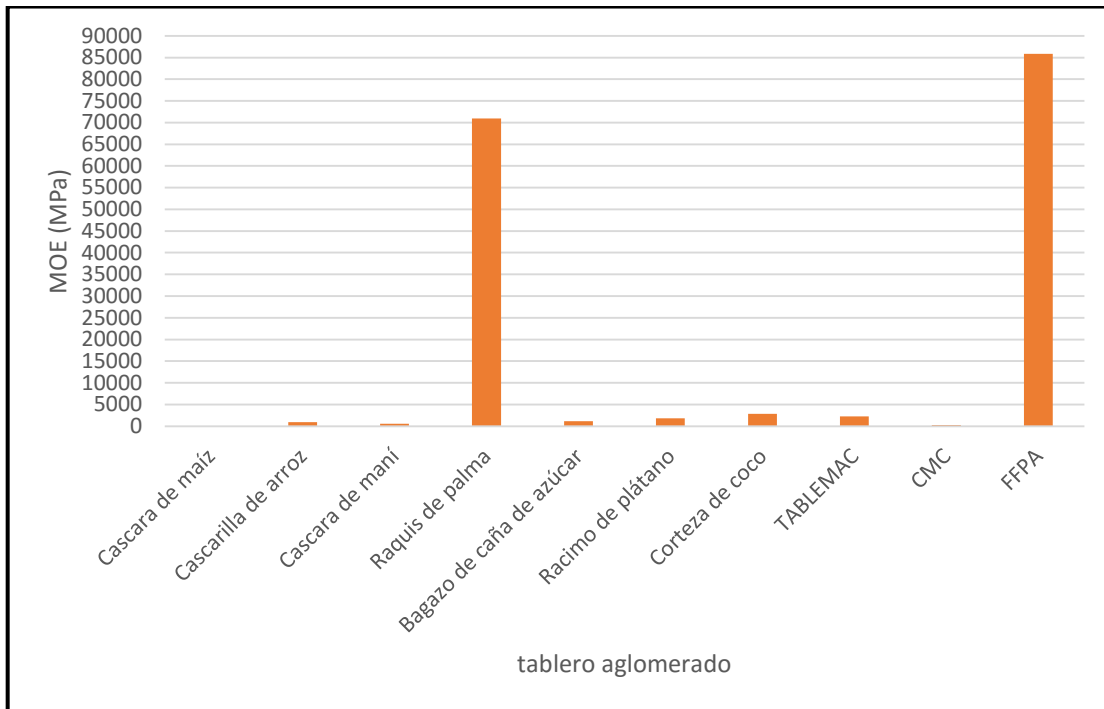
Al igual que con el MOR se realizó una comparación con los tableros aglomerados de la tabla 21 pero analizando en este caso el MOE. En la tabla 25 y grafico 42 se presentan la comparación de los valores del módulo elástico con otros trabajos de investigación en donde utilizaron residuos orgánicos para la manufactura de tableros aglomerados.

Tabla 25. MOE de tableros aglomerados elaborados con residuos lignocelulósicos.

Tablero aglomerado	MOE (MPa)	Referencia
Cascara de maíz	21,30	(Madurwar et al., 2013)
Cascarilla de arroz	930,00	
Cascara de maní	523,00	
Raquis de palma	70970,00	(Mejia Almeida, 2012)
Bagazo de caña de azúcar	1129,00	(Monteiro et al., 2011)
Racimo de plátano	1790,02	(Quintana et al., 2009)
Corteza de coco	2860,21	(Khedari et al., 2004)
TABLEMAC	2255,53	(TABLEMAC, 2016)
CMC	297,62	Elaboración propia
FFPA	85858,04	

Según la comparación realizada, para los tableros elaborados con CMC el MOE es superior a los elaborados con cascara de maíz e inferior al elaborado con cascara de maní, para los tableros aglomerados de FFPA el MOE es superior al reportado para el raquis de palma.

Gráfica 42. Comparación de MOE para varios tableros aglomerados



Se hace necesario tener en cuenta que al comparar los valores del módulo de elasticidad con los obtenidos por otros autores, las variables en el proceso de conformado son diferentes y por tanto se observan variaciones con respecto a esta propiedad. Tal es el caso del proceso de elaboración de tableros aglomerados con raquis de palma de aceite (Mejía Almeida, 2012), en donde el tiempo de prensado fue de 5 minutos, la humedad del material 10%, la presión fue de 14 MPa y la temperatura de prensado de 180°C, en otro ensayo de esa investigación se obtuvo un tablero aglomerado con un MOE de 110,08 GPa con la diferencia que la temperatura de prensado era de 200°C. Este proceso anterior se realizó por medio de auto-adhesión teniendo en cuenta el contenido de lignina del raquis de la palma es del 16,46%. El valor de lignina para nuestro estudio es de 23,8% mostrando también que es un residuo factible para elaborar tableros auto-adhesivos debido a que la lignina actúa como aglomerante natural a altas temperaturas.

7.3.2. Caracterización física

Después de elaborados los tableros aglomerados, se cortaron en dimensiones de 5 cm * 5 cm para realizar las pruebas de determinación de densidad de los tableros y absorción e hinchamiento al agua después de 2 y 24 horas.

- **Densidad de los tableros**

Se calculó la densidad de cada probeta mediante la ecuación 9, obteniendo un valor promedio densidad para cada una de las configuraciones residuo/%resina. Los datos y resultados de las pruebas se encuentran en el ANEXO VII. El análisis estadístico para los tableros aglomerados de CMC y FFPA se muestra en la tabla 26.

Tabla 26. Análisis estadístico de densidad para tableros aglomerados de CMC y FFPA

Muestra	Media (Kg/m³)	Desviación estándar	Muestra	Media (Kg/m³)	Desviación estándar
CMC-malla 20-resina 4%	643,0880	18,9597	FFPA- resina 10%	693,1753	33,9125
CMC- malla 20-resina 6%	697,4424	28,2805	FFPA- resina 12%	708,8593	29,3016
CMC- malla 20-resina 8%	731,1988	35,4478	FFPA- resina 14%	1016,5153	25,5111
CMC-malla 20-resina 10%	776,7652	13,7385	FFPA- resina 16%	1034,2575	30,5591
CMC-malla 20-resina 15%	883,2608	55,1971	FFPA- resina 18%	1083,0997	75,2023
CMC-malla 20-resina 20%	1088,8027	47,3553	FFPA- resina 20%	1157,7821	25,5566

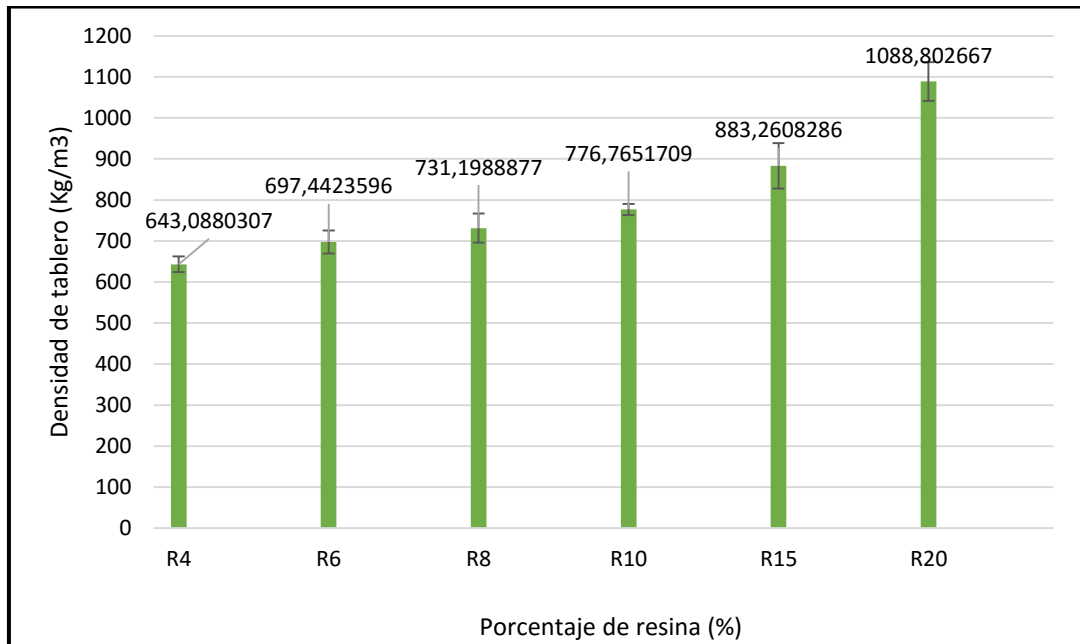
A través de los resultados del análisis estadístico se puede hacer la clasificación de los tableros según la norma ASTM D 1554-10.

Tabla 27. Clasificación de tableros aglomerados según la densidad

Clasificación ASTM D 1554-10	Tablero aglomerado elaborado
Baja densidad (menor a 640 Kg/m ³)	Ninguno
Densidad media (entre 640 Kg/m ³ y 800 Kg/m ³)	CMC (R4%, R6%, R8%, R10%) FFPA (R10%, R12%)
Alta densidad (mayor a 800 Kg/m ³)	CMC (R15%, R20%) FFPA (R14%, R16%, R18%, R20%)

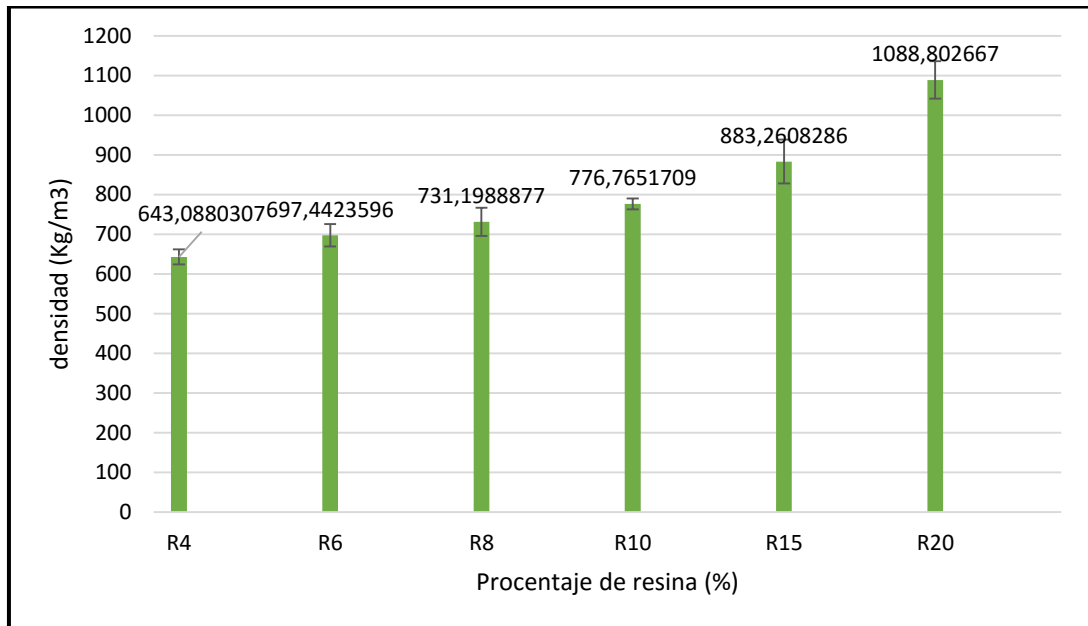
Para los tableros aglomerados con CMC la mayoría es de densidad media (640 kg/m³-800 kg/m³). A partir de un 15% de resina los tableros aglomerados de CMC son de alta densidad, este es un factor determinante para establecer los posibles usos de los tableros aglomerados. Para los de FFPA la mayoría son tableros de alta densidad, solo los que se elaboraron con un porcentaje de resina de 10% y 12% son de densidad media. Las gráficas 43 y 44 muestran la tendencia de densidad de los tableros aglomerados; a medida que aumenta la cantidad de resina en el tablero se incrementa la densidad.

Gráfica 43. Densidad de tableros aglomerados de CMC



Las densidades de los sistemas con CMC/4%, 6%, 8% y 10% de resina se clasificaron como tableros de densidad media, estos tableros tiene múltiples aplicaciones; estructurales, carpintería, y mobiliario. Dentro de las propiedades se caracteriza la uniformidad y homogeneidad en el espesor, además no presentan problemas de corte ni mecanizado.

Gráfica 44. Densidad de tableros aglomerados de FFPA



El tablero con 20% de resina de FFPA tiene una mayor densidad respecto al tablero de CMC con 20% de resina, esto es debido a que la densidad aparente de las fibras de FFPA es menor que la de las partículas de CMC, por lo tanto se hizo necesario utilizar una mayor cantidad de FFPA en la elaboración de los tableros aglomerados, teniendo en cuenta que la presión ejercida en la prensa hidráulica fue la misma para los dos tableros aglomerados.

Una comparación realizada con tableros realizados a partir de residuos lignocelulósicos, se muestra una densidad de 1000 Kg/m³ para tableros a partir de racimo de plátano y de 789 Kg/m³ para tableros de cascara de maíz.(Madurwar et al., 2013). Los tableros aglomerados realizados por la empresa TABLEMAC para paneles de fibra de densidad media con espesores de 9mm una densidad promedio de 680 Kg/m³ y para los paneles sin recubrimientos de espesor 9 mm la densidad es de 700 Kg/m³. Para las anteriores especificaciones los tableros de CMC con 8% se

encuentran en este rango, mientras que para los tableros de FFPA no están dentro del rango, pero si son similares a los tableros de racimo de plátano. De igual forma, la densidad del tablero puede variar en el momento de la elaboración y está también dependerá de los diferentes usos del producto final.

- **Absorción e hinchamiento de agua**

El análisis estadístico realizado para los datos obtenidos de determinación de absorción de agua después de 2 horas y 4 horas para los tableros de CMC, como se muestra en la tabla 28 y 29 respectivamente. Los datos y resultados obtenidos se encuentran en el anexo VIII.

Tabla 28. Análisis estadístico absorción de agua (%) tableros de CMC después de 2 horas

Muestra	Media (%)	Desviación estándar
CMC-tamiz 20-resina 8%	225,6131	3,1383
CMC-tamiz 20-resina 10%	148,7632	6,0956
CMC-tamiz 20-resina 15%	82,0031	1,9518
CMC-tamiz 20-resina 20%	23,9063	1,6805

En el análisis estadístico solo se muestran resultados para los tableros aglomerados de CMC a partir del 8% de resina debido a que los que tenían 4% y 6% de resina se

desintegraron totalmente, lo cual indica que estos tableros no son aptos para trabajar en ambientes húmedos debido a su incremento porcentual ($\Delta I = >100\%$). La aplicación de estos tableros sería evaluada como aislantes térmicos o acústicos. El sistema CMC/ 20% Resina muestra que es poco viable el uso de este residuo en tableros aglomerados debido a la rápida absorción de agua.

Gráfica 45. Muestras de tableros de CMC después de 2 horas en agua



En la tabla 29 se muestra los resultados del análisis estadístico de absorción de agua para los tableros de CMC después de 24 horas.

Tabla 29. Análisis estadístico absorción de agua (%) tableros de CMC después de 24 horas

Muestra	Media (%)	Desviación estándar
CMC-tamiz 20-resina 10%	169,6261	7,3349
CMC-tamiz 20-resina 15%	138,5145	17,3211
CMC-tamiz 20-resina 20%	47,2685	2,2471

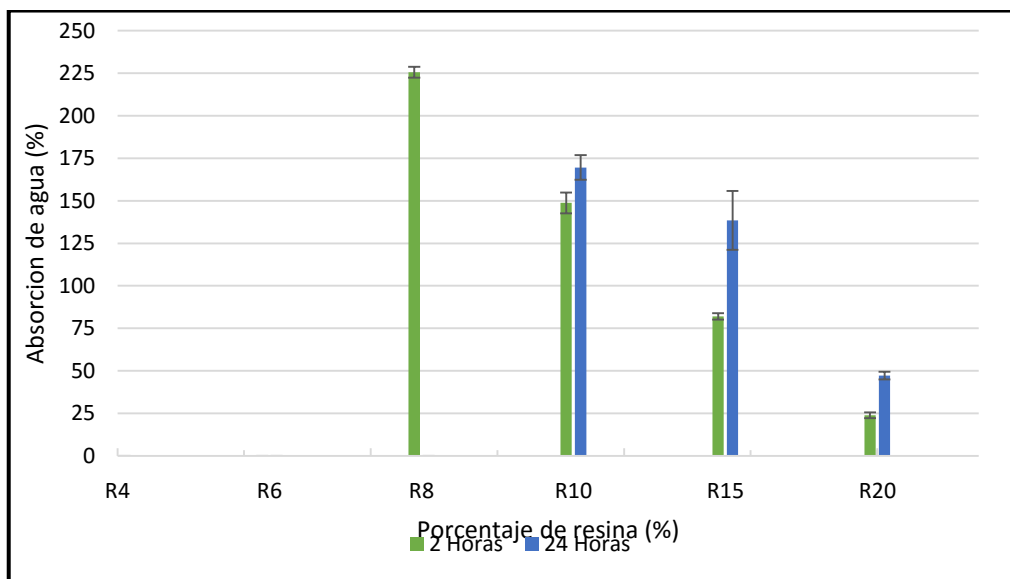
Las muestras de los tableros aglomerados de 8% de resina se desintegraron totalmente haciendo imposible una determinación de la masa, por lo que al fin de las 24 horas solo fue posible determinar la absorción de los tableros con 10%, 15% y 20% de resina.

La absorción de humedad de la CMC representa una dificultad al ser propuesto como material sustituto en tableros aglomerados, a pesar del secado previo que se le realizó al residuo hasta llegar a una humedad del 8% no resulta factible para la industrial el uso de este residuo. La gráfica 46 muestra la desintegración de los tableros aglomerados después de las 24 horas de inmersión en agua.

Gráfica 46. Muestras de tableros aglomerados de CMC después de 24 horas

Mediante la gráfica 47 se hace una comparación de la absorción de agua para los tableros de CMC 2 y 24 horas después de inmersión en agua.

Gráfica 47. Absorción de agua de tableros aglomerados de CMC 2 y 24 horas después.



La gráfica anterior representa el porcentaje de la absorción de los tableros aglomerados de CMC, como se mencionó anteriormente el aumento porcentual y la desintegración del material demuestra el uso limitado de este residuo para la elaboración de tableros aglomerados.

Para los tableros aglomerados de FFPA el análisis estadístico de la prueba de absorción de agua 2 y 24 horas después se muestran en la tabla 30.

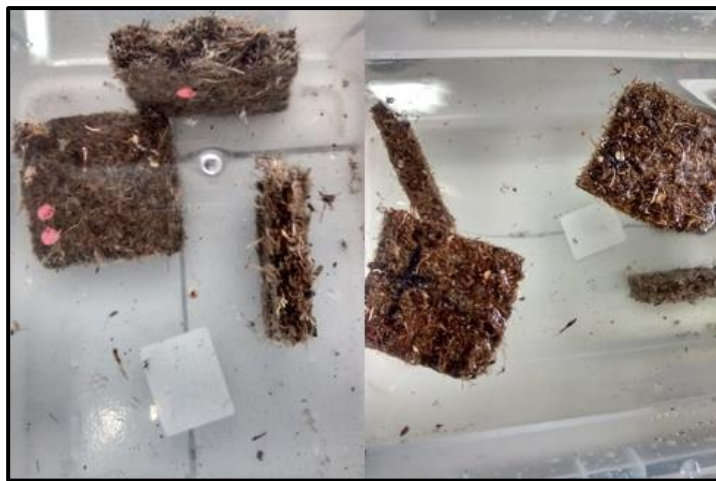
Tabla 30. Análisis estadístico absorción de agua tableros de FFPA después de 2 y 24 horas

Muestra	2 Horas		24 Horas	
	Media (%)	Desviación estándar	Media (%)	Desviación estándar
FFPA- resina 10%	97,8949	9,8396	105,0465	10,5147

FFPA- resina 12%	63,9450	8,4336	71,4727	5,0210
FFPA- resina 14%	50,3743	7,0035	59,0080	8,4077
FFPA- resina 16%	25,5209	3,3581	26,6184	5,2375
FFPA- resina 18%	21,6349	1,3737	22,3015	5,4211
FFPA- resina 20%	19,1714	2,1353	20,8840	1,5524

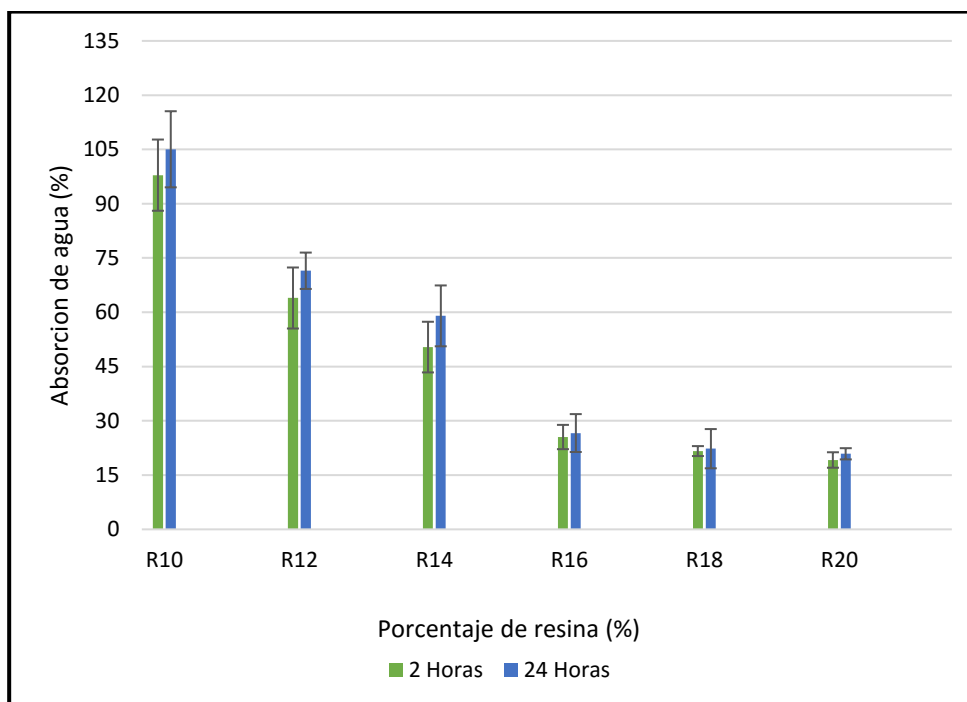
Las mayores desviaciones las presentan los tableros elaborados con 10% de resina, esto se debe a la porosidad y la poca homogeneidad residuo-resina en el tablero aglomerado, las menores desviaciones se presentan a partir de los sistemas FFPA/16% de resina de poliéster, indicando la aplicabilidad del material en ambientes expuestos a una alta humedad.

Gráfica 48. Muestras de tableros aglomerados de FFPA después de 2 horas



La absorción de agua en los tableros aglomerados se presenta en los bordes de estos debido al corte que se les hace, el área superficial permaneció sin cambio alguno, siendo este un indicador de calidad de los tableros aglomerados.

Gráfica 49. Absorción de agua de tableros aglomerados de FFPA 2 y 24 horas después.



Según lo indicado por la gráfica 49, para los tableros aglomerados a partir de FFPA a las 24 de inmersión en agua el máximo porcentaje de absorción es de 20,8840%, para el sistema FFPA/resina 20%. Ninguna de las muestras de este material se desintegraron. También se puede evidenciar que a partir del sistema FFPA/resina.20% la absorción de agua aumentó muy poco entre las 2 y 24 horas.

La composición química del residuo juega un papel fundamental en estos resultados, la cantidad de ceras grasas y resinas crean una capa protectora e hidrofóbica en las fibras del residuo que lo protegen de la humedad.

Los tableros aglomerados con CMC presentan una mayor absorción, esto se relaciona con la capilaridad del material debido a que el agua penetra profunda y eficientemente el material (Lertsutthiwong, Khunthon, & Siralermukul, 2008). Por otra parte, la resina de poliéster no es la más recomendada para el uso como adhesivo en la elaboración de tableros aglomerados y por tanto se utilizan generalmente las resinas melaminicas que le aportan una mayor resistencia al material en la absorción de agua. La descomposición de los tableros aglomerados de CMC con baja cantidad de resina demuestra que esta concentración de resina no es la más óptima para ambientes húmedos, razón por la cual la solubilidad del residuo lignocelulósico en hidróxido de sodio representa la susceptibilidad al ataque por hongos y por tanto a las pérdidas estructurales del mismo.

La absorción de agua para otros tableros aglomerados reportados en la literatura se presenta en la tabla 31.

Tabla 31. Absorción de agua después de 24 horas para algunos tableros aglomerados de residuos lignocelulósicos

Tablero aglomerado	Absorción de humedad después de 24 horas (%)	Referencia
Cascarilla de arroz	11-14	(Madurwar et al., 2013)
Cascara de maní	11-14	

Bagazo de caña de azúcar	139,96	(Monteiro et al., 2011)
Racimo de plátano	42,67	(Quintana et al., 2009)
Corteza de coco	78,80	(Khedari et al., 2004)
Biomasa de palma de aceite	35,6305	(Khalil, Fazita, Bhat, Jawaid, & Fuad, 2010)

El sistema FFPA/ 20% de resina presentó la menor absorción de agua para todos los tableros aglomerados estudiados, estos valores representan una absorción menor comparada con otros tableros aglomerados elaborados a partir de residuos lignocelulósicos, como lo son los de bagazo de caña de azúcar y corteza de fabricados con resina de urea formaldehído y melanina formaldehído.

La absorción de agua también puede explicarse desde la geometría de las partículas, las partículas de CMC son más pequeñas respecto a las de la FFPA y por lo tanto tiene una mayor área superficial y a la vez esta área permite una mayor absorción de agua, ya que crea un área de contacto más grande y una menor disponibilidad de resina-partícula. (Monteiro et al., 2011)

Los resultados del aumento en el espesor de los tableros aglomerados o hinchamiento debido a la absorción de agua se presentan en la tabla 32.

Tabla 32. Análisis estadístico de hinchamiento (%) para tableros aglomerados de CMC

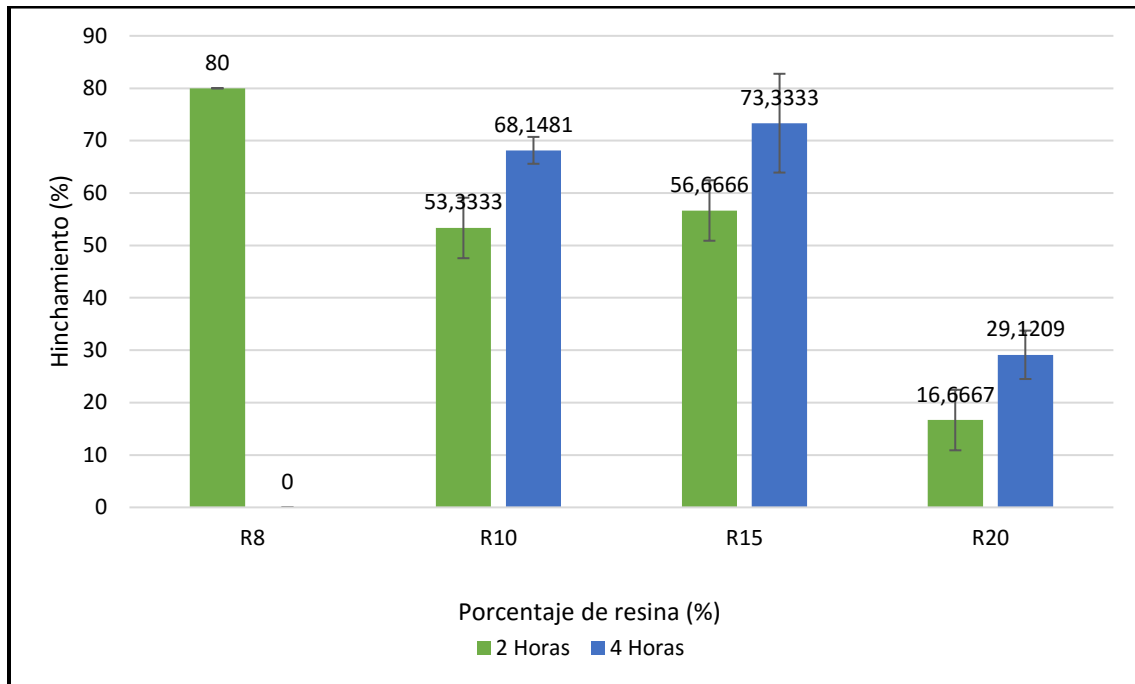
Muestra	Tiempo	Media (%)	Desviación estándar
---------	--------	-----------	---------------------

CMC- tamiz 20- resina 8%	2 horas	80,0000	0,0370
	24 horas	-	-
CMC- tamiz 20- resina 10%	2 horas	53,3333	5,7735
	24 horas	68,1481	2,5660
CMC- tamiz 20- resina 15%	2 horas	56,6666	5,7735
	24 horas	73,3333	9,4281
CMC- tamiz 20- resina 20%	2 horas	16,6667	5,7735
	24 horas	29,1209	4,6193

Los resultados anteriores demuestran que no se pueden elaborar tableros de CMC inferiores al 10% de resina debido a la desintegración estructural de estos. El mejor resultado se da en el sistema CMC/ Resina 20%, logrando la resina actuar como impermeabilizante y solo aumentando el espesor en un 12,46% entre las 2 y 24 horas de inmersión en agua.

Con los datos obtenidos a partir del análisis estadístico se construyeron las gráficas 50 y 51.

Gráfica 50. Hinchamiento después de 2 y 24 horas para tableros aglomerados de CMC



La desintegración de los tableros aglomerados con 4% y 6% de resina se desintegraron totalmente, por lo que estos tableros no tienen mucha aplicabilidad, la higroscopia de los tableros aglomerados es un indicador de calidad en la industria, por lo que al igual que la prueba de absorción en agua, el único tablero que es factible para elaborar a partir de CMC es el que forma el sistema CMC/resina-20%.

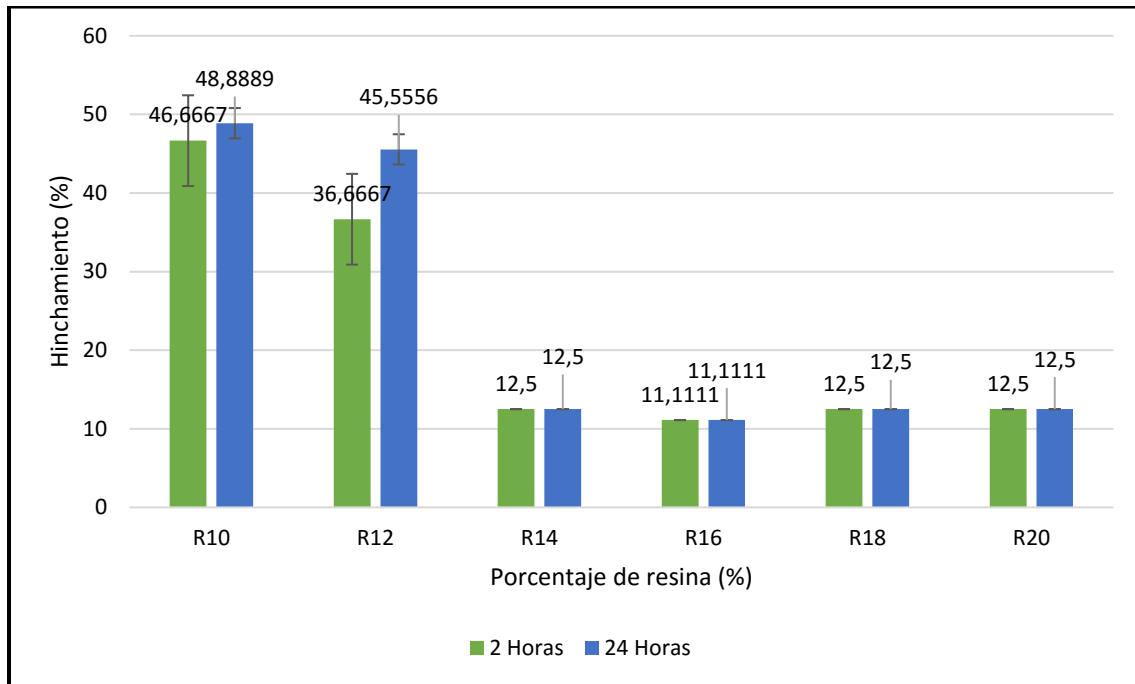
Para la FFPA se muestran los resultados obtenidos en la tabla 33.

Tabla 33. Análisis estadístico de hinchamiento (%) para tableros aglomerados de FFPA

Muestra	Tiempo	Media (%)	Desviación estándar
FFPA- resina 10%	2 horas	46,6667	5,7735
	24 horas	48,8889	1,9245
FFPA- resina 12%	2 horas	36,6667	5,7735
	24 horas	45,5556	1,9245
FFPA- resina 14%	2 horas	12,5000	0,0113
	24 horas	12,5000	0,0113
FFPA- resina 16%	2 horas	11,1111	0,0113
	24 horas	11,1111	0,0113
FFPA- resina 18%	2 horas	12,5000	0,0113
	24 horas	12,5000	0,0113
FFPA- resina 20%	2 horas	12,5000	0,0113
	24 horas	12,5000	,0113

De este residuo no se desintegró ningún tablero y se muestra que a partir de 14% de resina, no hay cambio en el espesor de los tableros aglomerados, el aumento en el espesor se da solo en las 2 primeras horas de inmersión en agua, tampoco se evidencia desprendimiento del residuo, por lo que podemos afirmar que este material representa una buena alternativa para elaborar tableros aglomerados que estén expuestos a ambientes húmedos.

Gráfica 51. Hinchamiento después de 2 y 24 horas para tableros aglomerados de FFPA



En general podemos decir que los tableros aglomerados elaborados con CMC presentan un mayor hinchamiento comparados con los elaborados con FFPA, el mejor valor para el hinchamiento en ambos casos se da cuando el porcentaje de resina es del 20%, y es debido a la capa aislante o hidrofóbica que crea la resina en el material, aun así la diferencia entre los tableros de CMC y FFPA es de aproximadamente 17%. También es claro observar que los mayores cambios se presentan durante las dos primeras horas de inmersión en agua y que los tableros de CMC con un porcentaje menor al 10% en resina no resisten la inmersión en agua.

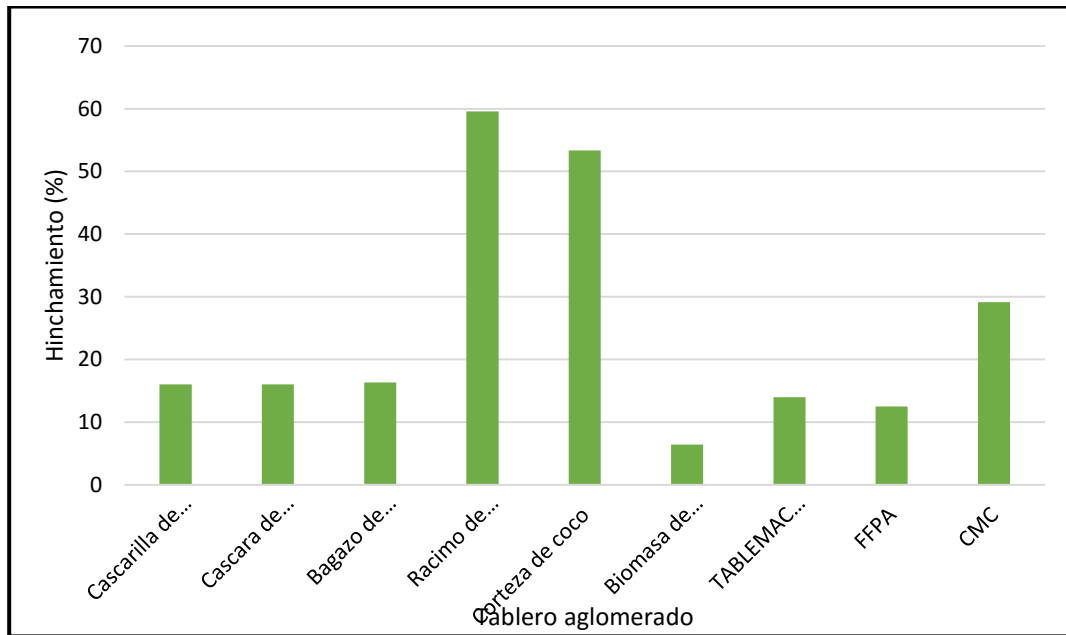
Para otros tableros aglomerados se muestran los valores de hinchamiento después de 24 horas en la tabla

Tabla 34. Hinchamiento de tableros aglomerados

Tablero aglomerado	Hinchamiento después de 24 horas (%)	Referencia
Cascarilla de arroz	16,0000	(Madurwar et al., 2013)
Cascara de maní	16,0000	
Bagazo de caña de azúcar	16,3300	(Monteiro et al., 2011)
Racimo de plátano	59,5900	(Quintana et al., 2009)
Corteza de coco	53,3500	(Khedari et al., 2004)
Biomasa de palma de aceite	6,4189	(Khalil et al., 2010)
TABLEMAC (MDF RH)	14,0000	(TABLEMAC, 2016)

Al hacer una comparación con los tableros aglomerados de la tabla anterior se puede observar, que el resultado de los tableros aglomerados de FFPA es favorable, y por tanto son menores a los reportados en la literatura con respecto a los tableros aglomerados que se comercializan resistentes a la humedad (RH). Respecto a los elaborados con biomasa de palma de aceite (raquis y tronco de racimo) es mayor, de igual forma los residuos lignocelulósicos que generan las plantas de beneficio de extracción de aceite muestran buenos resultados respecto a % de hinchamiento.

Gráfica 52. Hinchamiento después de 24 horas de algunos tableros aglomerados.

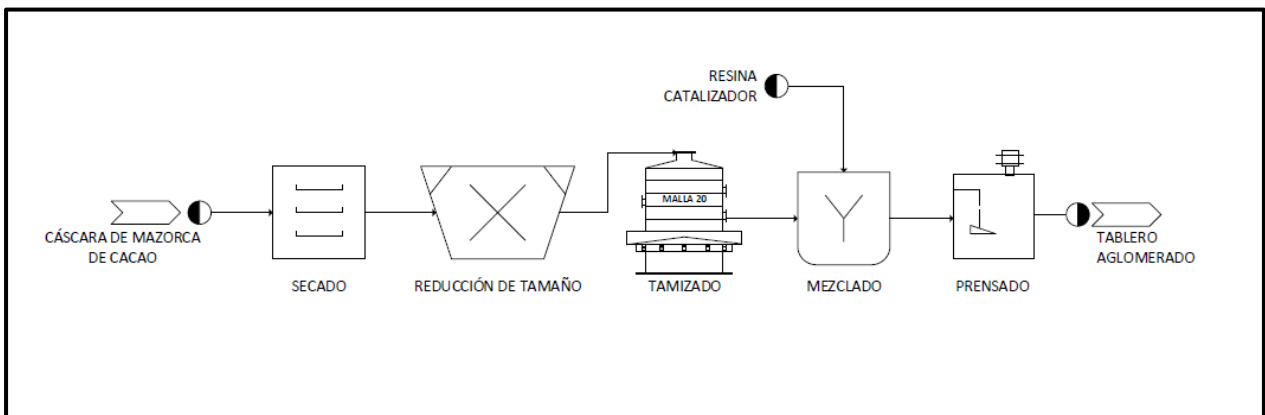


Los tableros aglomerados elaborados con racimo de plátano y corteza de coco presentan el mayor hinchamiento al ser sumergidos en agua por 24 horas. El hinchamiento o aumento en el espesor es una variable importante para los tableros de partículas debido a la inestabilidad dimensional y por tanto el aumento en su volumen, ocasionando defectos importantes en su vida útil. Las variables del proceso de elaboración de los tableros aglomerados inciden en el porcentaje de hinchamiento principalmente por el tipo de adhesivo utilizado, afectando el producto final, un claro ejemplo, es la durabilidad de los tableros aglomerados, esta se ve reflejada en un contenido de hinchamiento bajo, permitiendo mayor control dimensional al contacto con la humedad. (Zambrano, Moreno, Muñoz, & Durán, 2013). Una mayor densidad en los tableros aglomerados también es causante de la disminución en la porosidad del material, ya que habrá menos espacios vacíos entre el residuo-resina y esto impide la penetración del agua.

7.4. Diagramas de proceso de la elaboración de tableros aglomerados de CMC y FFPA.

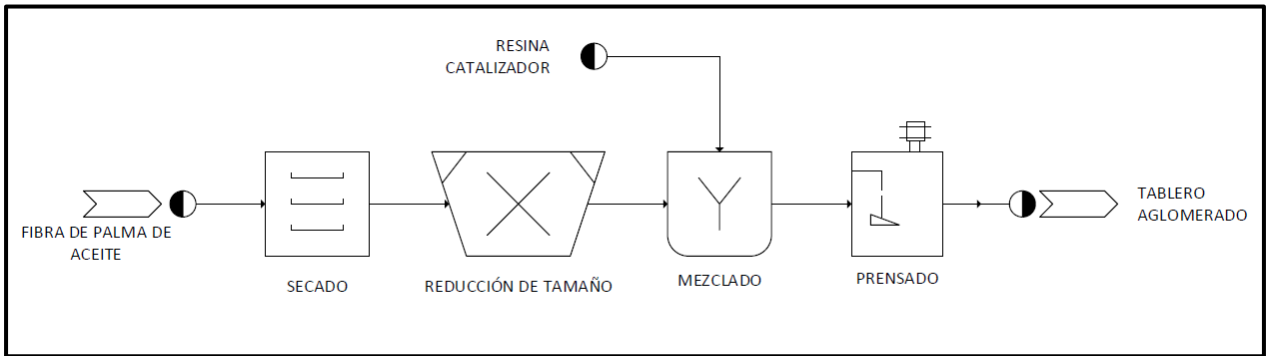
A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de elaboración de tableros aglomerados y en la caracterización físico-mecánica de estos, a continuación se proponen los siguientes diagramas de procesos aplicables a escala industrial.

Gráfica 53. Diagrama de proceso de elaboración de tableros aglomerados de CMC



Para los tableros aglomerados a partir de CMC proceso de secado se realiza durante 80 horas a 60°C en un horno de bandejas, la reducción de tamaño se realiza en un molino de cuchillas para posteriormente pasar a una selección de tamaño por medio de un tamizado del cual las partículas retenidas en la malla #20 pasarán al proceso de mezclado con resina-catalizador para continuar al proceso de prensado que se realiza durante 12 horas a una presión de 550 Kg/cm². El proceso de elaboración de los tableros aglomerados con FFPA solo difiere del anterior en el proceso de selección de tamaño de partícula, ya que en este no se realiza este proceso.

Gráfica 54. Diagrama de proceso de elaboración de tableros aglomerados de FFPA



Para la fibra de palma de aceite el secado se da durante 60 horas a 60°C, la reducción de tamaño se realiza en un molino de cuchillas con el fin de disminuir la longitud de la fibra y reducir el tamaño de las partículas de cuesco, a partir de este proceso pasa directamente al mezclado con resina-catalizador. El proceso de prensado se da a una presión de 550 Kg/cm² durante 12 horas a temperatura ambiente.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

- La composición química de los residuos lignocelulósicos de FFPA y CMC tiene una gran influencia en la elaboración de tableros aglomerados, la cantidad de extraíbles juega un papel fundamental en las propiedades como la absorción de agua e hinchamiento.
- La determinación de humedad de los residuos sirve como punto de partida para establecer las condiciones óptimas del proceso de elaboración de tableros aglomerados, ya que una humedad superior al 10% afecta las propiedades mecánicas de estos.
- Los termogramas corroboran las cantidades de componentes halladas en la caracterización química y también dan información sobre las temperaturas de degradación de los residuos, siendo la FFPA más estable térmicamente respecto a la CMC, ya que la degradación de las hemicelulosas se da por encima de los 250°C.
- Para los sistemas de tableros aglomerados elaborados con CMC se hace sumamente importante la selección del tamaño de partícula con el fin de lograr homogenizar el producto final e incrementar las propiedades mecánicas.
- El mejor módulo de rotura lo presentan los tableros elaborados con FFPA, siendo el sistema con 20% de resina el que presenta los mejores valores, la diferencia de este valor comparado con los tableros de CMC es baja.
- El módulo elástico de los tableros de FFPA es similar al realizado en otros estudios con residuos lignocelulósicos de esta planta, resultan factible este resultado para la elaboración de tableros aglomerados como sustitutos de especies maderables convencionales.

- El porcentaje de resina tiene una influencia directa tanto en las propiedades físicas como las mecánicas de los tableros aglomerados, siendo el único limitante los costos que implicaría el adicionamiento de resina a niveles superiores a 15%

8.2.Recomendaciones

El manejo de los residuos lignocelulósicos antes de la elaboración de los tableros aglomerados es imprescindible para evitar la absorción de humedad y el ataque por hongos en los materiales.

Mejorar el proceso de mezclado entre residuos lignocelulósicos y resina con el fin de homogenizar y lograr la impregnación de todo el residuo.

Realizar análisis morfológico a los tableros aglomerados para verificar la adhesión entre la resina y el residuo.

Realizar pruebas de elaboración de tableros con otras resinas para poder realizar el proceso de termocompresión.

9. BIBLIOGRAFIA

- Alfárez Rivas, L. E. (2013). *SELECCIÓN DE UN PROCESO PARA LA PRODUCCION DE TABLEROS AGLOMERADOS A BASE DE CASCARILLA DE ARROZ*. Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Aranzazu Hernandez, F., Martínez Guerrero, N., Palencia Calderon, G., Coronado, R., & Rincon Guarin, D. (2009). Manejo del recurso genético para incrementar la producción y productividad del sistema de cacao en Colombia. Retrieved from http://www.fedecacao.com.co/site/images/recourses/pub_doctecnicos/fedecacao-pub-doc_01A.pdf
- ASTM. (2006). Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle.
- ASTM. (2011). Standard Terminology Relating to Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials D1554-10, I(2005), 1–4. <http://doi.org/10.1520/D1554-10>. Copyright.
- Badejo, S. O. O. (1988). Effect of flake geometry on properties of cement-bonded particleboard from mixed tropical hardwoods. *Wood Science and Technology*, 370, 357–370.
- Barroso Casillas, M. (2010). *Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorrefinería*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Bauer, S., & Iba, A. B. (2014). Rapid Determination of Cellulose. *Biotechnology and Bioengineering*, 9999(xxx), 1–3. <http://doi.org/10.1002/bit.25276>
- Caicedo, F., & Salamanca, C. S. (2011). *ELABORACIÓN DE COMPOSITES A BASE DE RESINA*

- POLIÉSTER, POLIESTIRENO POSTCONSUMO Y ASERRÍN*. Universidad Industrial de Santander.
- Capanema, E., & Rojas, O. (2009). Desarrollo de tableros aglomerados auto-enlazados a partir de fibra de la vena central de la hoja de plátano. *Prospect*, 7(2), 69–74.
- Clotario, T., Cecilia, P., Alcides, L., & Galindo, C. G. (n.d.). ELABORACIÓN DE TABLEROS DE PARTICULA FINA A PARTIR DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS Y RESINAS.
- Cochard, B., Adon, B., Rekima, S., & Billotte, N. (2009). Geographic and genetic structure of African oil palm diversity suggests new approaches to breeding. *Tree Genetics & Genomes*, 493–504. <http://doi.org/10.1007/s11295-009-0203-3>
- Conde, B. (2015). *Diseño y construcción de un prototipo de termoconformado para materiales aglomerados*. Universidad de Pamplona.
- Conferencia Mundial del Sector palma. (2015). *Documento informativo: Un informativo sobre el sector Palma africana*. Santa Fé de Bogotá.
- Contreras, W., Owen, M., Garay, D., & Contreras, Y. (1999). ELABORACION DE TABLEROS AGLOMERADOS DE PARTÍCULAS DE CAÑA BRAVA (*Gynerium sagittatum*) Y ADHESIVO UREA – FORMALDEHÍDO. *Revista Forestal de Venezuela*, 43, 129–135.
- Daud, Z., Sari, A., Kassim, M., Aripin, A. M., Awang, H., Hatta, Z. M., ... Pahat, B. (2013). Chemical Composition and Morphological of Cocoa Pod Husks and Cassava Peels for Pulp and Paper Production. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(9), 406–411.
- Dias, Luiz Antônio dos Santos, & Kageyama, P. Y. (1997). Multivariate genetic divergence and hybrid performance of cacao (*Theobroma cacao* L.). *Brazilian Journal of Genetics*, 20(1).

Retrieved from <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-84551997000100012>

DINERO, R. (2015). Oportunidades para la producción de cacao. Retrieved October 7, 2016, from [http://www.dinero.com/economia/articulo/oportunidades-para-produccion-cacao-](http://www.dinero.com/economia/articulo/oportunidades-para-produccion-cacao-pais/209690)

[pais/209690](http://www.dinero.com/economia/articulo/oportunidades-para-produccion-cacao-pais/209690)

Fedepalma. (2013). *Minianuario Estadístico 2013*. Santa Fé de Bogotá.

Ferrer Carrera, A. (2013). *Aprovechamiento integral del residuo de la industria del aceite de palma (EFB). Obtención de derivados de las hemicelulosas, pastas celulósicas y celulosa nanofibrilar*. Universidad de Córdoba.

FEUM. (2016). Densidad aparente y densidad compactada de polvos. México D.F. Retrieved from <http://www.farmacopea.org.mx/Repositorio/Documentos/258.pdf>

García, Jesus Alberto; Garcia, Manuel; Das, K. C. (2009). Determinación de parámetros cinéticos de degradación térmica de subproductos de las plantas de beneficio mediante análisis termogravimétrico calorimetría de barrido diferencial, *51*(4), 547–557.

García, J. A., Cárdenas, M., & Yáñez, E. E. (2010). Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *PALMAS*, *31*(2), 41–48.

Gatani, M. et al. (2013). Determinación de la influencia del tamaño y forma de partículas de cáscaras de maní en paneles aglomerados. *Queg*, *21*, 67–80.

Gil, A. (2012). *Resinas de poliéster*. Medellín.

Haghighi, S., Hossein, A., & Tabatabaei, M. (2013). Lignocellulosic biomass to bioethanol , a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *27*, 77–93. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.033>

- Infomadera. (2010). Tableros de Fibras. Retrieved from http://infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_401_fibras.pdf
- Khalil, H. P. S. A., Fazita, M. R. N., Bhat, A. H., Jawaid, M., & Fuad, N. A. N. (2010). Development and material properties of new hybrid plywood from oil palm biomass. *Materials and Design*, *31*(1), 417–424. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.040>
- Khedari, J., Nankongnab, N., Hirunlabh, J., & Teekasap, S. (2004). New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. *Building and Environment*, *39*, 59–65. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.08.001>
- Lertsutthiwong, P., Khunthon, S., & Siralermukul, K. (2008). New insulating particleboards prepared from mixture of solid wastes from tissue paper manufacturing and corn peel. *Bioresource Technology*, *99*, 4841–4845. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.051>
- Lias, H., Kasim, J., Atiqah, N., Johari, N., Lyana, I., & Mokhtar, M. (2014). INFLUENCE OF BOARD DENSITY AND PARTICLE SIZES ON THE HOMOGENOUS PARTICLEBOARD PROPERTIES FROM KELEMPAYAN (*Neolamarckia cadamba*). *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, *3*(6), 173–176. Retrieved from http://www.mnkjournals.com/ijlrst_files/Download/Vol 3 Issue 6/33-62-20122014 INFLUENCE OF BOARD DENSITY AND PARTICLE SIZES ON THE HOMOGENOUS PARTICLEBOARD PROPERTIES FROM KELEMPAYAN.pdf
- Madurwar, M. V., Ralegaonkar, R. V., & Mandavgane, S. A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, *38*, 872–878. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011>
- Martín, M. H. C., Molina, O. A., García, M. A., & Rodríguez, L. E. S. (2004). Tableros de madera

- de partículas. *Ingeniería Y Ciencia*, 3, 39–46.
- Martínez, J. D. (2015). Characterization and evaluation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husk as a renewable energy source POD HUSK AS A RENEWABLE ENERGY SOURCE. *Agrociencia*, (JANUARY).
- Mejía Almeida, M. E. (2012). *ELABORACIÓN DE TABLEROS AGLOMERADOS AUTO-ADHERIDOS A PARTIR DE FIBRA DE RAQUIS DE PALMA AFRICANA (Elaeis guineensis Jacq.)*. Escuela Politécnica Nacional.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2013). *Guía ambiental para el cultivo del cacao*. Santa Fé de Bogotá. Retrieved from http://www.fedecacao.com.co/site/images/recourses/pub_doctecnicos/fedecacao-pub-doc_05B.pdf
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2015). Base Agrícola EVA 2007-2015. Retrieved from <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>
- Monteiro, R., Filho, D. B., Marin, L., Monteiro, K., Oliveira, L., & Roberto, V. (2011). Hybrid chipboard panels based on sugarcane bagasse , urea formaldehyde and melamine formaldehyde resin. *Industrial Crops & Products*, 33(2), 369–373. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.11.007>
- Morán, J. (2008). EXTRACCIÓN DE CELULOSA Y OBTENCIÓN DE NANOCELULOSA A PARTIR DE FIBRA SISAL - CARACTERIZACIÓN, (1), 16–17.
- Naranjo Vasquez, L. R. (2012). *Evaluación de los residuos vegetales con alto porcentaje de lignina de los cultivos de arroz, caña de azúcar y palma de aceite, ubicados en el departamento Norte de Santander para la generación de un material sustituto del aglomerado M.D.F*. Universidad

de Pamplona.

Nereida, S., & Galvis, B. (2011). *Estructura genética de poblaciones naturales de palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq)*. Universidad Nacional de Colombia.

Novoa Carrillo, M. A. (2005). *ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE TABLEROS AGLOMERADOS A BASE DE FIBRA DE COCO Y CEMENTO*. Universidad de Colima.

Parra, S. B., & López, C. Á. (2011). Efecto de la temperatura de procesado sobre las propiedades mecánicas de tableros aglomerados sin resina sintética. *Prospect*, 9(2), 75–80.

Patricia, A., Mart, P., & Santamar, E. (2014). LA PALMICULTURA COLOMBIANA : SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA , SOCIAL Y AMBIENTAL. *Revista de La Facultad de Ciencias Económicas Y Administrativas*, XV(1), 173–186. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4820631.pdf>

Perez Rincon, M. A. (2014). DINÁMICA DEL SECTOR PALMERO EN COLOMBIA Y LA REGIÓN DEL SUR DE BOLIVAR : ANALISIS DE SUS CONFLICTOS AMBIENTALES. *FEDEPALMA*, 1, 1–18.

Quintana, G., Velásquez, J., Betancourt, S., & Gañán, P. (2009). Binderless fiberboard from steam exploded banana bunch. *Industrial Crops and Products*, 9, 60–66. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.04.007>

Ramirez, N., Silva, A., Garzón, E., & Yañez, E. (2011). *Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite*. Santa Fé de Bogotá. Retrieved from publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/article/.../10492

Romero Alvarez, Y. (2012). Incidencia del PIB agropecuario en el PIB nacional Evolución y

transformación. *Gestión Y Desarrollo*, 12.

Ruiz Bolaños, J. (2011, June 11). Cacao: de chocolate a combustible. *UNPERIODICO*, p. 24. Santa Fé de Bogotá. Retrieved from <http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/un-periodico-impreso-no-145.html>

Rusconi, M., & Conti, A. (2010). Theobroma cacao L., the Food of the Gods: A scientific approach beyond myths and claims. *Pharmacological Research*, 61, 5–13. <http://doi.org/10.1016/j.phrs.2009.08.008>

Salazar, J. A. H., & Pérez, J. H. (1998). Determinación de componentes químicos de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla, 4(124), 79–93.

Saval, S. (2012). Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro. *Biotecnología*, 16(2), 14–46.

Seong, K., Husseinsyah, S., & Osman, H. (2013). Modified Cocoa Pod Husk-Filled Polypropylene Composites by Using Methacrylic Acid. *BioResources Journal*, 8(3), 3260–3275.

Serrato Monroy, C. C., & Lesmes Cepeda, V. (2016). *METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE ENERGÍA EXTRAÍDA A PARTIR DE LA BIOMASA EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Retrieved from [http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3687/1/Documento final Metodología Potencial Energético Biomasa.pdf](http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3687/1/Documento%20final%20Metodología%20Potencial%20Energético%20Biomasa.pdf)

Shakhes, J., Marandi, M., & Zeinaly, F. (2011). Tobacco residuals as promising lignocellulosic materials for pulp and paper industry. *BioResources Journal*, 6, 4481–4493.

TABLEMAC. (2016). Catálogo de productos. Medellín. Retrieved from

<http://www.tablemac.com/productos/>

Tapia Bastidas, C. V. (2007). *Elaboración de Tableros de Partícula Fina a partir de Residuos Lignocelulósicos y Resinas Termoestables*. Escuela Politecnica del Litoral.

UNE. (1971). Determinacion de la resistencia a la flexión y módulo de elasticidad CDU 674. *Normas Españolas Para Tableros de Partículas*. Retrieved from http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_456_16355.pdf

Vázquez, D., & Vázquez, M. (2002). Transformacion de materiales lignocelulosicos. composición, fraccionamiento y aprovechamiento. *Revista de Agroquímica Y Tecnología de Alimentos*, 2, 143.

Yepes, S. M., Naranjo, L. J. M., & Sánchez, F. O. (2008). VALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES – FRUTAS – EN MEDELLÍN Y EL SUR DEL VALLE DEL ABURRÁ, COLOMBIA. *RFNA*, 61(1), 4422–4431.

Zambrano, L., Moreno, P., Muñoz, F., & Durán, J. (2013). Tableros de partículas fabricados con residuos industriales de madera de Pinus patula Particle boards manufactured from industrial residues of Pinus patula wood. *Maderas Y Bosques*, 19(3), 65–80.

La República de Colombia
y en su nombre

Nº 34332



LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

LA FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA

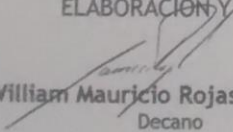
Certifica que:

DIANA ESTEFAN VILLAMIZAR FUETNES

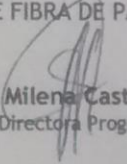
CC 1094269000
Participó como
PONENTE
En el

I SIMPOSIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL "UNA MIRADA SOSTENIBLE"

ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE TABLEROS AGLOMERADOS A PARTIR DEL RESIDUO DE FIBRA DE PALMA
DE ACEITE USANDO UNA RESINA TERMOESTABLE


William Mauricio Rojas Contreras
Decano

Pamplona 29 de septiembre de 2016


Sandra Milena Castro Escobar
Directora Programa



Universidad
Francisco de Paula Santander
Ocaña - Colombia
"Vigilada Mineducación"



**Grupo de Investigación Ambiental Agropecuario
y Desarrollo Sostenible**

Certifica que:

DIANA STEFAN VILLAMIZAR FUENTES

CC N° 1094269000 de PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER

Participó como Ponente

CATATUMBARÍ
I Congreso Internacional de
Producción Animal y Gestión Ambiental
"Una estrategia al Desarrollo Sustentable para el Posconflicto"

En la Universidad los días 13 al 14 de Octubre de 2016

Tema(s): APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE FIBRA DE PALMA PARA LA ELABORACIÓN DE TABLEROS AGLOMERADOS

E. A. Sánchez

Edgar Antonio Sánchez Ortiz
Director UFPSO

Juan Carlos Hernández Criado

Juan Carlos Hernández Criado
Director Grupo de Investigación GI@DS

Daniel Antonio Hernández Villamizar

Daniel Antonio Hernández Villamizar
Decano Facultad Ciencias Agrarias y del Ambiente

