

**TABLEROS SIN ADITIVOS A PARTIR DE CAÑA FLECHA
(*GYNERIUM SAGITTATUM*)**

GIOVANNA DIOSSA GALLEGO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
INGENIERÍA QUÍMICA
MEDELLÍN
2014**

**TABLEROS SIN ADITIVOS A PARTIR DE CAÑA FLECHA
(*GYNERIUM SAGITTATUM*)**

GIOVANNA DIOSSA GALLEGO

**Trabajo de grado para optar al título
de Ingeniero Químico**

**Director
JORGE ALBERTO VELÁSQUEZ JIMÉNEZ.
Doctor en Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
INGENIERÍA QUÍMICA
MEDELLÍN
2014**

Nota de aceptación

Director
Ph.D Jorge Alberto Velásquez J.

Msc. Fabio Castrillón Hernández.
Director Ingeniería Química

Medellín, Febrero 2014

A mis abuelos, Hernando y Dolly, por el apoyo que me han brindado en el transcurso de toda mi vida ya que hoy soy lo que ellos con ejemplo y enseñanzas hicieron de mí.

A mis padres Guillermo y Patricia, porque me dieron la vida y la oportunidad de seguir mis sueños.

A mi hermano Julián por ser mi inspiración.

A Dios por cada circunstancia y persona que puso en mi camino para permitirme salir adelante

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Ph.D. Jorge Alberto Velásquez Jiménez, director del proyecto, por las asesorías durante el desarrollo del trabajo.

Ph.D. Germán Quintana, asesor del proyecto, por su aporte y colaboración incondicional proporcionados en todo momento.

Al grupo de investigación Pulpa y Papel, por brindarme los espacios de trabajo y los equipos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
1 MARCO TEÓRICO.....	13
1.1 Caña flecha (<i>Gynerium sagittatum</i>) como materia prima.....	13
1.2 Lignina.....	15
1.3 Pretratamiento con vapor de materiales lignocelulósicos.....	17
1.4 Tableros.....	20
1.4.1 Clasificación de tableros	20
1.4.2 Tableros de fibras sin aditivos ni enlazantes.....	21
2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
2.1 Materia prima.....	23
2.2 Caracterización del material lignocelulósico (Caña flecha y pulpas pretratadas).....	23
2.2.1 Humedad.....	23
2.2.2 Cenizas.....	24
2.2.3 Extractivos.....	25
2.2.4 Lignina Klason.....	26
2.2.5 Holocelulosas.....	27
2.2.6 Pentosanas.....	28
2.3 Pretratamiento con vapor (<i>steam explosion</i>).....	29
2.4 Molienda de pulpa.....	30
2.5 Preparación de tableros.....	31
2.6 Caracterización físico-mecánica.....	32
2.7 Diseño de experimentos.....	32
2.7.1 Herramientas de análisis estadístico.....	34

3	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	37
3.1	Caracterización de la materia prima: Caña flecha (<i>Gynerium sagittatum</i>).....	37
3.2	Obtención de pulpas.....	37
3.3	Elaboración de los tableros.....	38
3.4	Resultados Físico-mecánicos	40
3.4.1	Análisis para el módulo de elasticidad(MOE).....	40
3.4.2	Análisis para el módulo de ruptura (MOR).....	44
3.4.3	Análisis para el hinchamiento en espesor (TS).....	47
3.5	Verificación de resultados.....	51
4	CONCLUSIONES.....	55
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	ANEXOS.....	64

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Caña flecha (<i>Gynerium sagittatum</i>).....	13
Figura 2. Estructura de la lignina.....	16
Figura 3. Reactor <i>steam explosion</i>	17
Figura 4. Despolimerización y repolimerización de la lignina.....	18
Figura 5. Equipo para el tratamiento con vapor <i>steam explosion</i>	30
Figura 6. Molino de cuchillas Retsch.....	30
Figura 7. Prensa hidráulica y caja de formación de tableros.....	31
Figura 8. Máquina universal de ensayos.....	32
Figura 9. Diagrama de flujo metodología del proyecto.....	36
Figura 10. Efecto del pretratamiento <i>steam explosion</i> a diferentes severidades...38	38
Figura 11. Tableros de caña flecha pretratados a diferentes severidades.....	40
Figura 12. Graficos para el analisis del MOE.....	43
Figura 13. Graficos para el analisis del MOR.....	46
Figura 14. Probetas de ensayo estabilidad dimensional del diseño de experimentos.....	49
Figura 15. Graficos para el analisis del TS.....	50
Figura 16. Diagrama circular para la caracterización de la caña flecha y la pulpa pretratada con vapor.....	53
Figura 17. Tableros condiciones optimizadas.....	54

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Matriz del diseño de experimentos aleatorizados.....	33
Tabla 2. Factores y niveles del diseño de experimentos propuesto.....	34
Tabla 3. Caracterización química de la caña flecha.....	37
Tabla 4. Resultado del diseño experimentos para las propiedades físico-mecánicas.....	39
Tabla 5. ANOVA para el MOE.....	42
Tabla 6. ANOVA para el MOR.....	45
Tabla 7. ANOVA para el TS.....	47
Tabla 8. Parámetros de optimización y valores experimentales obtenidos a estas condiciones.....	51
Tabla 9. Caracterización química de la caña flecha a SE 4,1.....	53

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO A. Cálculo de pentosanas Norma T223 cm-01.....	64
ANEXO B. Propiedades mecánicas de los tableros. MOR y MOE.....	65
ANEXO C. Norma UNE 31794.....	67

RESUMEN

Se estudió la formación de tableros aglomerados sin aditivos sintéticos a partir de caña flecha (*Gynerium sagittatum*) pretratada con *steam explosion*. Se empleó un diseño de experimentos con superficie de respuesta (2^2 + estrella con 8 repeticiones al centro) para modelar el efecto de la temperatura de prensado (T_p) entre 137 - 223°C y la severidad del pretratamiento (Se) entre 3,15 – 4,84 sobre propiedades físico mecánicas de interés (Módulo de ruptura (MOR), Módulo de elasticidad (MOE), hinchamiento en espesor (TS)). A partir del modelo obtenido se determinaron los valores óptimos para producir un tablero de calidad comercial para exportación.

La caña flecha se pretrató con vapor, se secó al ambiente y se molió para posteriormente ser prensada a las condiciones que se querían evaluar. Se caracterizaron los tableros físico-mecánicamente según las normas estándar españolas y europeas (UNE-EN) para determinar las propiedades fisicomecánicas antes mencionadas.

La temperatura de prensado y la severidad son influyentes en las propiedades físico-mecánicas de los tableros. Los tableros generados optimizados poseen aproximadamente 3 mm de espesor, un MOE máximo de 5612 MPa, que cumple las normas estándar españolas y europeas (UNE-EN); un MOR máximo de 34.2 MPa; un valor mínimo de hinchamiento en espesor (TS) de 7.76%, comparable con tableros comerciales e investigaciones previas. Los valores óptimos de los factores son severidad de 4.11 y temperatura de prensado 217°C.

PALARAS CLAVES: Tableros de fibras sin aditivos, Caña flecha (*Gynerium sagittatum*), lignina, *steam explosion*.

INTRODUCCIÓN

Los tableros de fibras son un material de uso decorativo y estructural, están formados homogéneamente por fibras lignocelulósicas en combinación con resinas sintéticas o adhesivos aglomerantes combinados con calor y presión. Estos hacen parte de los productos forestales de valor agregado elaborados industrialmente.

Sus usos son diversos lo cual hace que su demanda en el mercado internacional esté siempre en alza, como indica la FAO la cual reportó un aumento de aproximadamente 44% en la producción de estos entre el 2008 y el 2012 donde esta producción llegó a 103.462.084 m³ (1) para suplir la demanda mundial. Colombia reportó una disminución del 32% (2) en la cantidad de tableros importados entre el 2008 y el 2012, lo cual indica una activación importante del sector en Colombiano para suplir la demanda interna de estos productos.

Los tableros de fibras comerciales son unidos con adhesivos de urea formaldehído, resinas fenólicas y epóxicas, estos compuestos son contaminantes y están regidos por estrictas legislaciones debido a sus emisiones tóxicas al medio ambiente y a la salud (3). Al emplear material lignocelulósico pretratado que no necesite aglutinantes sintéticos para su formación se estaría contribuyendo a solucionar este problema ambiental disminuyendo los procesos de contaminación, aumentando los controles de calidad para obtener un producto industrial sostenible.

Por lo anterior es ingente la necesidad de procurar nuevas alternativas del uso de nuevas materias primas lignocelulósicas, a fin de disminuir continuas y grandes presiones industriales sobre el bosque natural y plantaciones forestales.

Por esto se propone el uso de la caña flecha (*Gynerium sagittatum*) cultivo nativo de Colombia, energético y de gran capacidad para su explotación a nivel industrial ya que presenta un rendimiento anual de 110 Ton/ Hect-año (4) además de necesitar menos área de cultivo y tiempo. Los tableros de fibras a base de caña flecha se convierten en una propuesta innovadora en el aporte de soluciones tecnológicas que ayuden a dinamizar y contextualizar aún más la industria forestal de los tableros a las exigencias de los tiempos actuales y futuros.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Caña flecha (*Gynerium sagittatum*) como materia prima.

La caña brava, caña amarga, carrizo, caña flecha o chuchío (*Gynerium sagittatum*), es una especie de planta herbácea perteneciente a la familia de las poáceas originaria de América. Es una hierba gramínea erecta cuyos tallos rectos y verticales crecen hasta 4 ó 5 metros de altura, con hojas dispuestas en abanico de 2 metros de largo como se puede observar en la Figura 1. Es una planta dioica cuyas astas florales pueden elevar la planta hasta más de 9 metros de altura (5).

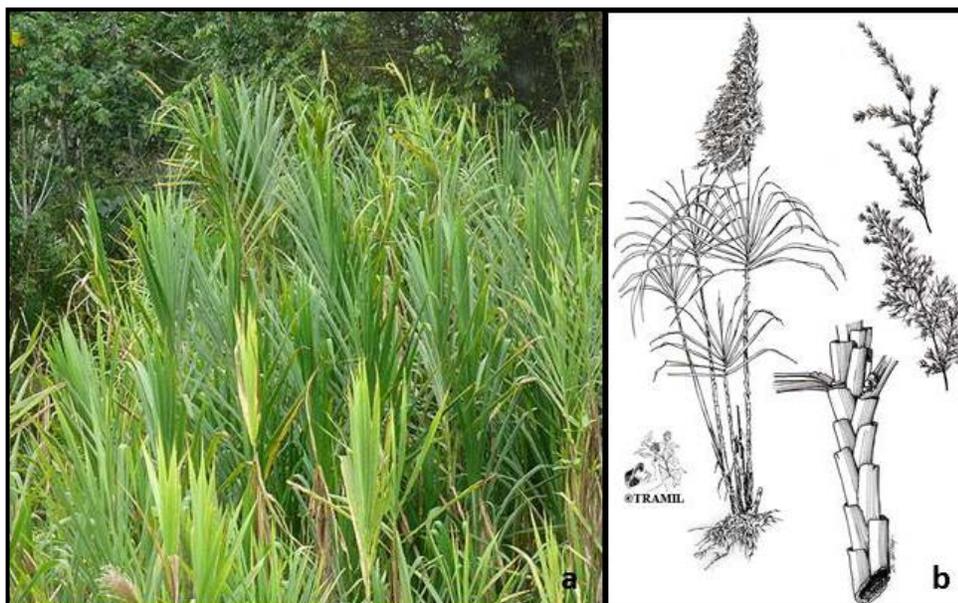


Figura 1. Caña flecha (*Gynerium sagittatum*). a) Foto de planta (6). b) Dibujo componentes de la planta (7).

La caña flecha es un excelente recurso renovable de rápido crecimiento y fácil manejo que brinda beneficios económicos, sociales y ambientales a las comunidades rurales del país, cuyo uso por parte de la población rural ha sido tradicional desde tiempos inmemoriales. Sin embargo, solo desde hace poco tiempo su importancia económica y social está siendo valorada (8).

Esta planta presenta una adaptabilidad ecológica notable y su flexibilidad la ha llevado a adaptarse a terrenos áridos y a zonas de inundación, de manera que se registran múltiples variedades y se desarrolla vigorosa en medio de la vegetación densa, además se utiliza para cercar casas de bahareque y sus espigas sirven para elaborar artesanías y cañas de pescar. Las venas más finas de esta caña son cortadas y utilizadas en anchos diferentes para llevar a cabo trenzados en las artesanías que exigen una mayor dificultad en su fabricación. Por otra parte los indígenas de la etnia Zenú bautizaron a la fibra más delgada de la caña flecha como “lica” materia prima en la fabricación del sombrero vueltiao; símbolo de la cultura costeña colombiana.

La caña flecha es un material lignocelulósico versátil con el cual se han logrado resultados positivos y muchos adelantos en investigación, tales como la recuperación de mercurio con caña flecha propuesta por Ortega (9) en donde se recalcó la facilidad que tiene la caña flecha para rehabilitar suelos contaminados acumulando mercurio en sus tejidos sin afectar su viabilidad como planta, por lo tanto es importante resaltar las propiedades de esta planta, empezando por sus raíces de las cuales han sintetizado isoflavonoides como ilustra Benavides (10) en su investigación.

La caña flecha también se evaluó como una materia prima en la producción de pulpa para papel como recalcó Marcano (11) quien constató su similitud con el bagazo de caña que se utiliza para este propósito y evidenció que la caña flecha tiene dos capas; una externa impermeable lisa y una interna porosa la cual no permite una humectación de los reactivos efectivamente, por lo que se recomienda un pretratamiento.

En cuanto a los productos forestales como los tableros aglomerados de partículas, la caña flecha ha sido evaluada como un material posible para su fabricación. Contreras (12) trabajó con tableros formados con adhesivos de urea-formaldehído, usando un catalizador de sulfato de amonio y partículas de caña flecha con concentraciones de resina del 10 y 13 %, logrando que los tableros del 13% presentaran mejores propiedades físico mecánicas, exceptuando la variación en espesor frente a la humedad, por lo que se los recomienda ampliamente para la fabricación de cerramientos internos y mueblería en general. Los valores de flexión estática que reporta el autor fueron 155.72 y 181.13 Kg/Cm³ para los tableros de concentraciones de resina del 10 y el 13 % respectivamente. Para los ensayos de tracción perpendicular se lograron valores de 3.71 y 3.85 Kg/Cm³ para

los tableros del 10 y 13%, lo cual indicó una buena interacción entre las partículas de caña y el aglomerante.

En estudios posteriores de Contreras (13) repercute el uso de la caña flecha como materia prima para tableros aglomerados de partículas con adhesivos, esto debido a la tendencia de las gramíneas que poseen una parte externa impermeable y lisa, una parte interna porosa la cual disminuye la cohesión al no permitir la humectación del adhesivo en las partículas, por esto recomendó el uso de un pretratamiento que mejore las características del material.

Otro adelanto que realizó Contreras (14) fue la elaboración de elementos estructurales tipo PARALLAM utilizando tira de caña flecha con adhesivo de fenol-formaldehído donde concluyó que los valores de las vigas laminadas tipo PARALLAM fueron menores que las exigidas por las normas consultadas. Esto se debió a la mala humectación de la cola en las superficies de las tiras cuando coincidían las caras impermeables externas de las tiras de caña brava.

1.2 Lignina.

La lignina es el constituyente intercelular incrustante o cementante de las células fibrosas de los vegetales, se concentra en la lámina media y funciona prácticamente como relleno para impartir rigidez al tallo de la planta; es el segundo elemento en importancia de la constitución vegetal, representa el 30% de sus componentes (15) y su estructura se ve alterada por la edad de la planta.

La lignina es un polímero natural amorfo en forma de malla constituido por la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropiónicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico) enlazados por uniones de éster, éter y carbono-carbono que dan origen a su estructura tridimensional (16).

La estructura de la lignina es todavía un asunto de modelos debido a su compleja relación estructural y su heterogeneidad, la lignina alcanza pesos moleculares en el rango de 5000 a 10000 Daltons (17), su estructura general se muestra en la Figura 2.

Las ligninas son polímeros insolubles en ácidos y solubles en álcalis fuertes como el hidróxido de sodio; pueden ligarse a los ácidos biliares y otros compuestos orgánicos como por ejemplo el colesterol (18).

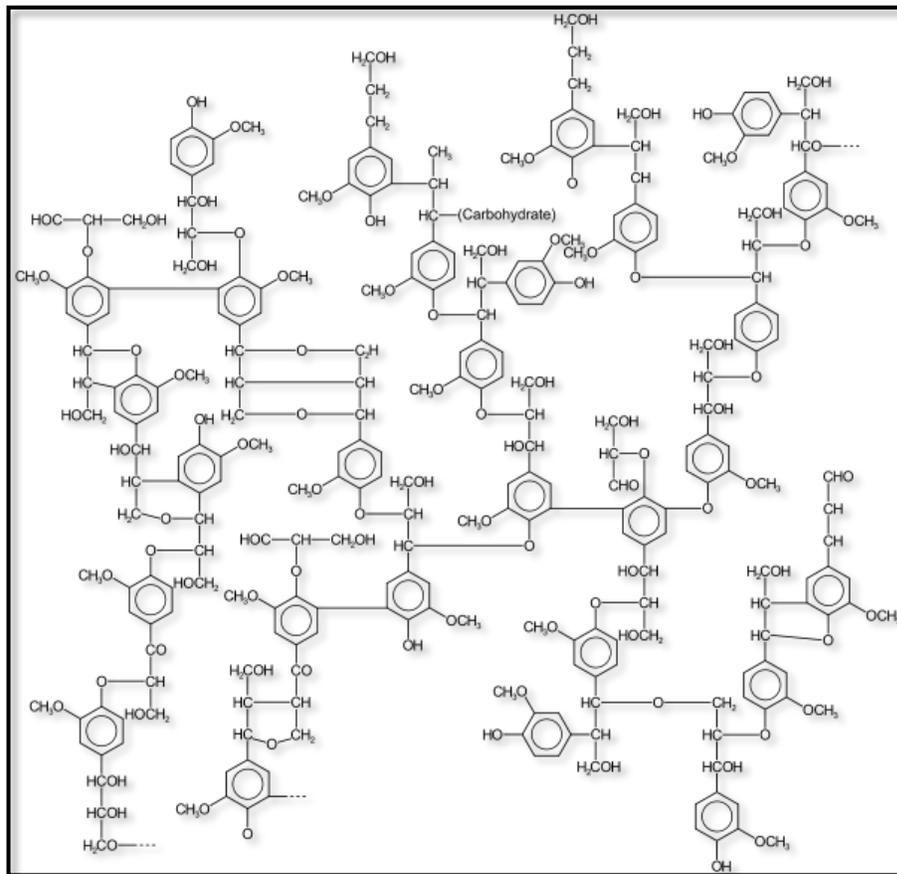


Figura 2. Estructura de la Lignina (18).

La lignina se emplea en la fabricación de neumáticos, colorantes, pesticidas (debido a sus propiedades dispersantes), agentes de flotación y detergentes (dado el carácter tensoactivo de las mismas), así como en la preparación de monómeros químicos, hidrocarburos, compuestos fenólicos y vainillina (19).

Mansouri (20) estudió la manera de remplazar con lignina los adhesivos en los tableros aglomerados, buscando la manera de incorporarla de manera tal que genere unos buenos y resistentes enlaces internos que permitan una mejor adherencia entre las fibras, mejorando la rigidez del tablero.

Las características más importantes de la lignina para su función como aglomerante son su capacidad de fundirse y subsecuentemente entrecruzarse a altas temperaturas, esto se identifica con su comportamiento térmico en los tejidos de las plantas a temperaturas por encima de los 140°C donde se funde y muestra propiedades termoestables.

1.3 Pretratamiento con vapor de materiales lignocelulósicos

Los pretratamientos son procedimientos esenciales que mejoran las características de los materiales lignocelulósicos, al separar sus componentes biomásicos para acceder fácilmente y mejorar la efectividad en usos posteriores.

Uno de los más usados es el pretratamiento con vapor o *steam explosion*, por el cual se efectúa un tratamiento físico químico que presenta la disminución del impacto ambiental, de los costos y del consumo de energía en comparación con la autohidrólisis, el pulpeo y otros métodos que se realizan a las muestras lignocelulósicas (21).

El *steam explosion* utiliza vapor de agua saturada, en el proceso batch el material se almacena en un contenedor al que se le aumenta la presión y la temperatura, seguido por una descarga violenta y una disrupción mecánica en un tanque colector. En la Figura 3 se muestra un esquema del reactor *steam explosion*. Este pretratamiento puede realizarse con o sin la adición de un ácido como catalizador, si no se le adiciona ácido al material el pretratamiento se denomina autohidrólisis o autocatalítico, debido a la acción del ácido acético y fórmico liberados por el mismo material.

Para el proceso de autohidrólisis Overend y Chornet (22) desarrollaron por primera vez un modelo para predecir los efectos del pretratamiento y su severidad sobre el material procesado, resultado que arrojó un factor de severidad (R_o , $\log R_o$ o S_e) número adimensional-empírico de reacción que combina la temperatura del vapor y el tiempo de residencia por el cual puede calcularse según la expresión [8] que se muestra en la metodología.

Durante el pretratamiento con vapor, gran cantidad de los enlaces glicosídicos de la hemicelulosa presente en la biomasa se hidrolizan parcialmente, por los ácidos acético y fórmico liberados. La hidrólisis de la celulosa ocurre en menor extensión (24) y la lignina se degrada debido principalmente al enlace éter, pretratamiento que produce una serie de compuestos fenólicos y subproductos de condensación indicados en la Figura 4 en la que se muestra la despolimerización y polimerización de la lignina con el pretratamiento. Por otro lado la autohidrólisis conlleva a un incremento en la solubilidad de las hemicelulosas en agua y con la lignina en álcalis o solventes orgánicos.

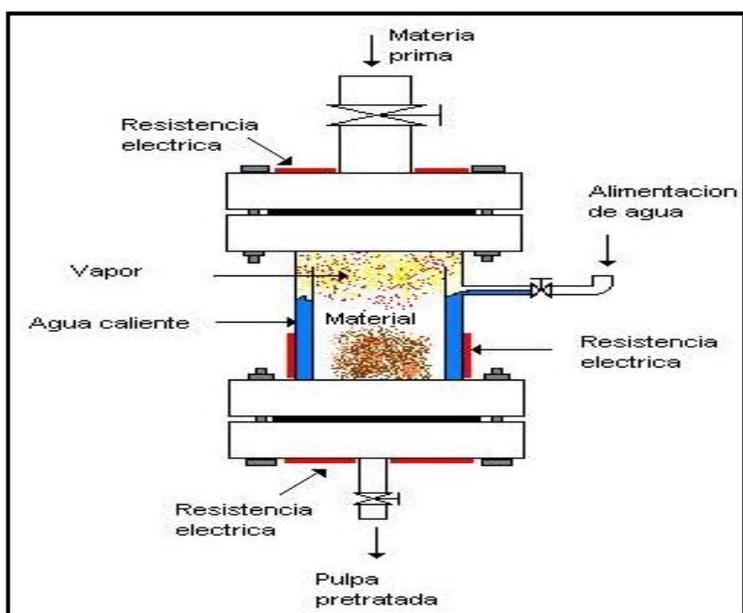


Figura 3. Reactor *steam explosion* (23).

Negro (25) concluyó que al aumentar la temperatura en el pretratamiento con vapor se obtiene una mayor pérdida de hemicelulosas y una degradación de los azúcares dejando más expuesta la celulosa, lo que ocasiona que la pulpa se torne más oscura y de una tonalidad marrón. Asimismo conduce a reacciones de condensación y polimerización que ocasionan la acumulación y redistribución de la lignina sobre la celulosa, reacción que proporciona un alto grado de hidrofobicidad en el material.

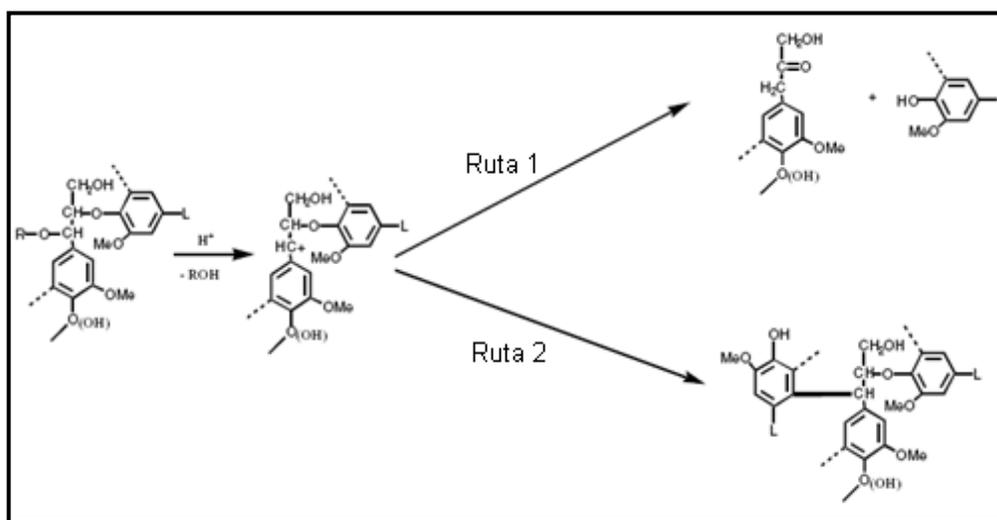


Figura 4. Despolimerización y repolimerización de la lignina (21).

El *steam explosion* involucra un reactor discontinuo con el uso de altas temperaturas y presiones, además de una expansión súbita del material pretratado. Pereira (26) describe que este tratamiento modifica radicalmente la estructura de la pared vegetal celular dando como resultado un material (pulpa) de color marrón oscuro, esto debido a la hidrólisis parcial de las hemicelulosas. Estas se van en su mayoría en la etapa de lavado quedando un material insoluble en agua compuesto por celulosas, hemicelulosas residuales y lignina modificada.

El *steam explosion* tiene múltiples usos como pretratamiento. Es fundamental para maximizar la producción de bioetanol de residuos lignocelulósicos o para la recuperación de productos secundarios como ligninas alcalinas, a las cuales se les puede dar un valor agregado como componentes para biodiesel o productos químicos como describe Jiebing (27). Negro (28) resalta su uso como pretratamiento para la producción de bioetanol a partir de masa lignocelulósica (madera de pino) donde correlaciona la efectividad del tratamiento con la solubilización de las hemicelulosas y la conversión enzimática de la fracción de celulosa.

Velásquez (29; 30) ha demostrado la bondad del *steam explosion* en la formación de tableros sin resinas a partir de Hierba Elefante, obteniendo tableros estables dimensionalmente y unidos por la propia lignina del material. Se pueden obtener una amplia variedad de tableros dependiendo del tipo de material de partida y los parámetros de operación, tanto en la fase de prensado (presión, temperatura, tiempo) como en la de *steam explosion* o líquidos saturados (temperatura, tiempo, presencia de aditivos o catalizadores).

En cuanto al papel que tiene este pretratamiento en los tableros aglomerados sin adhesivos, se han reportado efectos positivos sobre sus propiedades físico químicas, ya que aumenta y mejora la calidad del producto final. Mason (31) plantea que el *steam explosion* genera fibras con mayor flexibilidad, además de activar la lignina lo que contribuye a la auto unión entre las fibras y al ablandamiento de la lignina para que fluya y mejore el rendimiento del tablero, sin necesidad de utilizar aglomerantes sintéticos durante el proceso de prensado en caliente.

Back (32) y Bouajila (33) concluyeron que las fibras pretratadas con *steam explosion* en el proceso de prensado en caliente se unían por la activación de componentes reactivos presentes en la lignina. También es importante resaltar que una exposición muy prolongada a este pretratamiento hace que la fibra pierda

su elasticidad, ya que se destruyen los núcleos aromáticos haciendo que disminuyan sus propiedades físico-químicas como concluyó Satoshi (34) en su trabajo.

Suchsland (35) ha observado que durante el proceso de *steam explosion* a altas temperaturas, el tamaño de las partículas disminuye a medida que se incrementa la severidad de este tratamiento. Este efecto permite obtener tableros con una mayor resistencia a la tracción perpendicular a las caras y una menor absorción de agua. El inconveniente estriba en que el tratamiento a estas altas severidades genera tableros con módulos de elasticidad y de ruptura realmente bajos.

Por otra parte Takatani (36) evidenció en su trabajo con materiales del tipo composite polímero/madera, que la resistencia y la estabilidad dimensional dependen del tamaño de partícula del relleno lignocelulósico y de si este se ha pretratado con *steam explosion* o no, obteniéndose los mejores resultados con material pretratado y menor tamaño de partícula.

1.4 Tableros

Los tableros son elementos presentados en forma de hojas que se obtiene de la madera mediante prensado industrial, por medio de calor y presión; en la actualidad su fabricación se basa en el empleo de materia prima en forma de residuos de otras manufacturas de madera y en el empleo de árboles pequeños y de baja durabilidad.

Para mejorar las propiedades en los tableros se emplean aglomerantes, en la industria los más comunes son las resina sintéticas fenol-formaldehído (FF) y úrea-formaldehído (UF).

1.4.1 Clasificación de los tableros

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) distingue tres tipos de tableros: los de madera contrachapada o triplay, los de fibra y los de partículas.

- *Tableros de madera contrachapada o triplay* (37): Las maderas contrachapadas o triplay se fabrican por medio de la sobreposición en capas impares de un material compuesto de chapa de madera, las cuales se unen con resinas para lograr un material con una resistencia mecánica mayor que la madera sólida de igual superficie y grosor.

- *Tableros de partículas* (38): Los tableros de partículas buscan por medio del prensado de una mezcla de partículas de madera como las hojuelas, astillas y viruta con resinas sintéticas u otro tipo de adhesivo, aumentar la densidad y obtener un producto con características físicas semejantes o superiores a las de piezas de madera maciza.
- *Tableros de fibras* (39) : Los tableros de fibras son la combinación de fibras lignocelulósicas con una resina sintética. Estos tableros se clasifican por la densidad; un tablero con gravedad específica entre 0.50 y 0.80 se clasifica como tablero de fibras de densidad media (MDF) y un tablero de fibras de madera con la gravedad específica mayor que 0.80 se clasifica como tablero de fibras de densidad alta (HDF).

En los últimos años, la industria de los tableros de partículas ha ampliado el tipo de materia prima empleada en la fabricación de estos, incluyendo residuos como la corteza y el polvo producido por el lijado, especies maderables de coníferas, entre otras. Grigoriu (40) fabricó tableros de partículas a partir kenaf cultivada en Grecia y mostró que ésta puede sustituir industrialmente alrededor de un 50% la madera de los tableros. Blanchet (41) estudió la producción de tableros a partir de partículas de corteza de picea negra molida enlazadas con resina de urea formaldehído y reportó que las mejores propiedades mecánicas se obtienen con un contenido de 50% de madera y un 14% de contenido de resina en la capa superficial.

Okuda (42) encontró que al adicionar furfural como aglomerante al tablero fabricado de centro de *kenaf* se incrementan los enlaces internos, mejorando el desempeño de estos. También se han elaborado tableros con adiciones de úrea-formaldehído de buenas propiedades mecánicas a partir de bambú y cascarilla de arroz (43).

1.4.2 Tableros de fibras sin aditivos ni enlazantes

Los tableros de fibras sin resinas ni enlazantes son una solución efectiva en el ámbito ambiental como en el económico, debido a que se utilizan materiales lignocelulósicos los cuales son reciclables y renovables, además que no utiliza resinas convencionales en su fabricación, las cuales no son renovables (fuente fósil) y encarecen el producto.

Estos tableros no necesitan periodos de curado ni presentan emisiones de formaldehído, lo cual evidencia beneficios económicos y ambientales ya que estas emisiones están ampliamente legisladas debido a los problemas de salud que pueden generar.

Se han realizado grandes esfuerzos para producir tableros fabricados en seco y en húmedo, sin recurrir a la adición de resinas enlazantes, como Mobarak (44) que utilizó bagazo de caña sin pretratamiento y obtuvo muy buenos resultados en la fabricación de tableros sin aditivos trabajando a altas densidades.

Los residuos lignocelulósicos de la palma de aceite también han sido analizados para la fabricación de tableros sin adhesivos enlazantes, como evidencia Hashim (45) en su trabajo donde concluyó que las condiciones de prensado idóneas para la formación de estos tableros son temperaturas de prensado cercanas a los 180°C y con presión de prensado equivalente a 12MPa.

Se han comparado ampliamente en investigaciones que los pretratamientos empleados en los materiales lignocelulósicos son efectivos, ya que preparan el material en su estructura. Halvarsson (46) trabajó con paja de trigo, la cual trató previamente con vapor y ácido sulfúrico, antes del proceso de desfibrado, para aflojar su estructura física. La unión adhesiva entre las fibras fue iniciada por la activación de las superficies de las mismas, por un tratamiento oxidativo durante el proceso de desfibración con reactivo Fenton.

Suchsland (35; 47; 48) trabajó a partir de pulpa *mansonite* sin lavar con la cual obtuvo tableros en seco sin adhesivos enlazantes de buenas características. Asimismo evidenció la importancia de los finos del material pretratado en la formación de los tableros. Se concluyó también que se pueden obtener tableros de similar calidad a partir de una misma materia prima, sin importar que la formación del tablero se lleve a cabo en seco o en húmedo.

Anglés (49) evaluó el efecto de las condiciones de prensado sobre la calidad de los tableros de madera blanda, concluyó que las temperaturas de prensado deben ser por lo menos de 200°C para asegurar que la lignina pueda fundir y fluir ya que las mejores propiedades se a la más alta temperatura, 230°C donde además la influencia del tiempo de prensado no fue significativa.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materia prima.

La caña flecha (*Gynerium sagittatum*) proviene de cultivos de Titiribí (Antioquia). La materia prima se limpia quitando las hojas y corteza externa para dejar la vaina de la caña. Estas se cortan en astillas de aproximadamente 5 cm utilizando una sierra caladora. Posteriormente el material se extiende y se deja secar al ambiente para que después sea almacenado en bolsas de plástico para su uso.

2.2 Caracterización del material lignocelulósico (caña flecha y pulpas pre tratadas).

La caracterización se realiza para el material previamente seco al ambiente molido y tamizado garantizando un tamaño de malla - 40+60 para cumplir con las normas estándar ASTM.

2.2.1 Humedad: La humedad se debe determinar para poder expresar los resultados de las diferentes fracciones haciendo referencia al material lignocelulósico en base seca.

Procedimiento

En la determinación de la humedad del material lignocelulósico se sigue el protocolo indicado en la norma ASTM E-871-82 (50). Inicialmente, en una balanza de precisión, se pesan aproximadamente 2 g. de muestra húmeda. Se introduce la fibra en la estufa a 105°C durante 4 horas. Pasado este tiempo se retira la muestra del horno, se deja enfriar en un desecador y se vuelve a pesar. Esta operación se repite hasta obtener un peso constante. El análisis se realiza por triplicado.

Cálculos

El porcentaje de humedad (%H) haciendo referencia al material húmedo original se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\%H = \frac{(M_2 - M_3)}{(M_2 - M_1)} * 100 \quad [1]$$

Dónde:

M1: peso del recipiente.

M2: peso del recipiente y de la muestra húmeda.

M3: peso del recipiente y de la muestra seca.

2.2.2 Cenizas: Las cenizas determinan la cantidad de sales minerales (constituyentes inorgánicos sólidos) que hay en el material lignocelulósico original.

Procedimiento

En la determinación de la cantidad de cenizas se sigue el protocolo indicado en la norma ASTM D 1102-84 (51). Se utilizan crisoles de porcelana previamente introducidos en una mufla a 600°C por un periodo de una hora. Estos se pesan en una balanza de precisión. Se toman entre 2 y 5 g de una muestra de humedad conocida y se pesan en los crisoles. Se colocan los crisoles en la mufla calentada previamente a 600°C. Se deja 3 horas a esta temperatura, posteriormente se apaga la mufla y las muestras se retiran cuando se alcanza una temperatura de 200°C. Se enfrían en un desecador y se pesan rápidamente.

Cálculos

El porcentaje de cenizas (%Cenizas) referido al material seco con cenizas se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\%Cenizas = \frac{(M_3 - M_1)}{(M_2 - M_1) * \left(\frac{100 - \%H}{100}\right)} * 100 \quad [2]$$

Dónde:

M1: peso del crisol.

M2: peso del crisol y de la muestra húmeda.

M3: peso del crisol y de las cenizas.

%H porcentaje de humedad de la muestra.

2.2.3 Extractivos: Para poder realizar una caracterización del material lignocelulósico sin interferencias es necesario preparar una muestra libre de extractivos. Los extractivos del material representan los compuestos de bajo peso molecular solubles en diferentes tipos de solventes. La preparación de un material libre de extractivos es necesaria para realizar los análisis de lignina Klason y de azúcares elementales.

- **Extractivos orgánicos**

Los extractivos orgánicos están compuestos, principalmente, por ceras, grasas, resinas, aceites y taninos.

Procedimiento

Para esta determinación se utiliza la norma estándar ASTM D1107-84 (52). Inicialmente se determina la cantidad de material seco presente en el cartucho de extracción. Con ayuda de una mezcla de etanol y tolueno (1:2) se logran extraer los compuestos orgánicos. El sistema de extracción soxhlet se mantiene en reflujo por un tiempo mínimo de 6 horas, tiempo durante el cual el líquido de extracción alcanza un color transparente. Se intenta regular la potencia del sistema de calentamiento de tal manera que la velocidad de vaciado del sifón sea de 4 a 6 veces por hora. Posteriormente se seca el cartucho con el material libre de extractivos a 105°C en una estufa de convección.

Cálculos

El contenido de extractivos orgánicos (%EO), se expresa con referencia al material seco original y se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\%EO = \frac{(M_3 - M_2)}{(M_3 - M_1)} * 100 \quad [3]$$

Dónde:

M1: Peso del cartucho soxhlet seco a 105°C.

M2: peso del sistema cartucho-muestra extraída con orgánicos seco.

M3: Peso del sistema cartucho-muestra seco a 105°C

- **Extractivos acuosos**

Mediante una extracción con agua caliente se solubilizan las sales minerales, el almidón, las sustancias pépticas, los colorantes y algunos azúcares.

Procedimiento

El método seguido se encuentra detallado en el estándar ASTM D1110-84 (53). El sistema de partida es el material libre de extractivos orgánicos.

El sistema de extracción soxhlet con agua se mantiene en reflujo durante un tiempo mínimo de 6 h a 100°C, durante este tiempo el líquido de extracción debe alcanzar un color transparente. Finalmente se seca el conjunto cartucho-fibra a 105°C, se enfría en un desecador y se pesa.

Cálculos

El contenido de extractivo acuosos (%EA) con referencia al material seco original se determina según la expresión:

$$\%EA\% = \frac{(M_4 - M_2)}{(M_3 - M_1)} * 100 \quad [4]$$

Dónde:

M1 y M3: especificados como en el caso anterior.

M2: peso del sistema cartucho-muestra extraído con agua seca.

M4: peso del sistema cartucho-muestra extraída con orgánicos seco.

2.2.4 Lignina Klason: La lignina representa aproximadamente un 30% del material lignocelulósico. Se determina y se cuantifica la lignina insoluble en medio ácido. El material libre de extractivos se somete a dos hidrólisis consecutivas, los polisacáridos se hidrolizan hasta sus monómeros constituyentes y en la solución permanece un sólido que es el que se cuantifica.

Procedimiento

Se sigue el protocolo descrito en la norma estándar ASTM D1106-84 (54). Inicialmente, en la primera hidrólisis, se tratan unos 0.3 g del sustrato

lignocelulósico libre de extractivos con 3 ml de ácido sulfúrico concentrado al 72% w/w (24.1 N) en un baño con temperatura controlada a 30°C. Durante una hora se va agitando todo el sistema.

En la segunda hidrólisis, se diluye el sistema anterior agregando 84 ml de agua destilada, alcanzándose una concentración de ácido del 4% w/w (0.82 N). El recipiente se tapa y se introduce en un autoclave, calentado previamente a 100°C, se cierra el autoclave y se deja durante media hora a 120°C. Posteriormente el recipiente se deja enfriar hasta alcanzar unos 20°C.

El sólido se filtra en papel filtro, previamente pesado. Se recogen el filtrado, el cual contiene los azúcares disueltos. El residuo de lignina se lava con agua destilada hasta que las aguas de lavado sean neutras. Se seca el sistema sólido - filtro en la estufa a 105°C hasta lograr peso constante.

Cálculos

El cálculo de la lignina klason (%LK) referido al material original seco es el siguiente:

$$\%LK = \frac{(M_3 - M_2)}{M_1} * \left(1 - \frac{\%EO}{100} - \frac{\%EA}{100}\right) * 100 \quad [5]$$

Dónde:

%EA: porcentaje de extractivos acuosos.

%EO: porcentaje de extractivos orgánicos.

M1: masa de la muestra seca libre de extractivos.

M2: masa del filtro seco.

M3: masa del sistema filtro-lignina seco.

2.2.5 Holocelulosa: la holocelulosa es la mezcla de celulosa y hemicelulosa y son la fracción que se hidroliza en el procedimiento anterior. Estos se calculan por diferencia porcentual de la caracterización del material lignocelulósico teniendo en cuenta extraíbles y lignina como se muestra en la ecuación [6].

Cálculos

El cálculo de holocelulosa (%Holocelulosa) referido al material original seco es el siguiente:

$$\%Holocelulosa = 100 - \%EO - \%EA - \%LK \quad [6]$$

Dónde:

%EO: porcentaje de extractivos orgánicos.

%EA: porcentaje de extractivos acuosos.

%LK: porcentaje de lignina klason.

2.2.6 Pentosanas: las pentosanas contenidas en los materiales lignocelulósicos indican la relación o perdida de hemicelulosas que este presenta, representadas en el contenido de xilosas. Para cuantificarlas se utilizó la norma TAPPI Pentosans in Wood and pulp T223 cm-01 (55) en donde las pentosanas son transformadas en ebullición con HCL 3.85N a furfural, el cual es colectado en el destilado y determinado colorimétricamente con el reactivo de Orcinol.

Cálculos

El cálculo de pentosanas (%Pentosanas) referido al material original seco es el siguiente:

$$\%Pentosanas = \frac{grXilano}{gr Muestra libre EO y EA} * \left(1 - \frac{\%EO}{100} - \frac{\%EA}{100}\right) * 100 \quad [7]$$

Dónde:

gr Xilano: gramos cuantificados mediante la curva de calibración implementando la norma TAPPI T223 cm-01 (Ver **Anexo A**)

%EO: porcentaje de extractivos orgánicos.

%EA: porcentaje de extractivos acuosos

2.3 Pretratamiento con vapor (*steam explosion*).

El reactor discontinuo donde tiene lugar el pretratamiento con vapor, fue diseñado y construido por el Grupo Pulpa y Papel de la UPB, para autogenerar el vapor requerido durante el pretratamiento. Consiste en dos tanques de acero inoxidable.

El tanque superior es un reactor cilíndrico de 10 L con aislamiento térmico en el cual se realiza la autohidrólisis del material lignocelulósico, unido mediante una electroválvula de accionamiento a distancia a un recipiente de 100 litros ubicado en la parte inferior, en éste se realiza la expansión súbita y recolecta del material pretratado minimizando las pérdidas de materia (56). En la Figura 5. se muestra una foto del equipo utilizado.

Para el pretratamiento de la caña flecha (*Gynerium sagittatum*) mediante *steam explosion* se realizó el siguiente procedimiento:

- ❖ El *Steam Explosion* se alimenta con el material lignocelulósico (astillas de caña flecha). En esta experimentación se trabaja con 200 gr húmedos.
- ❖ Se adiciona al equipo la cantidad de agua necesaria para el pretratamiento. En esta experimentación se trabaja con dos litros.
- ❖ Se calcula la severidad (SE) cada 5 minutos o menos mediante la ecuación [8], la cual se integra en el tiempo con el método numérico del trapecio, hasta obtener la severidad deseada.
- ❖ Se abre la válvula de descarga y la fibra explota debido a la diferencia de presiones y el vapor en expansión la expulsa hacia fuera. Esta pulpa recogida es filtrada y lavada con abundante agua, para posteriormente ser secada al ambiente.

$$SE = \log \left(\int \exp^{(T_{exp} - (100/14.75))} . dt \right) \quad [8]$$

Donde T_{exp} es la temperatura experimental en °C y t es el tiempo en min.

Luego del pretratamiento en el *Steam explosion* se determina la humedad a cada muestra pretratada, con el fin de tener en cuenta el contenido de fibra en base seca.



Figura 5. Equipo para el tratamiento con vapor *STEAM EXPLOSION*

2.4 Molienda de la pulpa

La pulpa seca al ambiente pretratada con el *steam explosion* es molida hasta pasar por malla de 4 mm en un molino de cuchillas el cual se muestra en la Figura 2. Este procedimiento se realizó para incrementar el área superficial así como el área de contacto entre las fibras como sugiere Velásquez (57).



Figura 6. Molino de cuchillas Retsch.

2.5 Preparación de los tableros

El material pretratado con *steam explosion* y molido se seca al ambiente hasta humedades alrededor de 7%. Los tableros de prueba serán prensados usando una caja de formación de 150 mm de longitud y 50 mm de ancho. Se pesa la cantidad necesaria de pulpa molida para garantizar densidades de 110 kg /m³ y espesor de 3.0 mm.

Se utiliza una prensa hidráulica de 30 toneladas con temporizador y control de temperatura la cual se precalienta antes de formar los tableros. Las temperaturas de prensado se varían entre 135 a 230 °C, el tiempo de prensado es de 2 min y la presión de prensado se mantiene constante en 12MPa.

Todos los tableros son prensados siguiendo el método de prensado de 3 etapas descrito por Velásquez (58):

- ❖ Preprensado durante el tiempo de consigna a la presión y a la temperatura deseada.
- ❖ Tiempo de respiración durante 1 minuto.
- ❖ Prensado a la presión de consigna durante el tiempo deseado a la temperatura deseada.
- ❖

En la Figura 7. Se puede observar una foto de la prensa y de la caja de formación utilizada.



Figura 7. a) Prensa Hidráulica de 30 Toneladas con temporizador. b) Caja de formación de tableros.

2.6 Caracterización Físico mecánica

Los tableros son caracterizados utilizando las respectivas normas estándar españolas y europeas (UNE-EN): para el espesor (TS) y la absorción de agua (WA) EN 317 (59), para el módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) EN 310 (60) y para la densidad EN 323 (61).

De acuerdo a las normas europeas los requerimientos estándar para estas propiedades son: densidad $> 800\text{kg/m}^3$, MOR $\geq 40\text{MPa}$, MOE $\geq 3000\text{MPa}$, WA $\leq 30\%$ y TS $\leq 20\%$.

Los cálculos y especificaciones necesarios para la determinación de las propiedades mecánicas de los tableros según las normas se muestran en el **anexo B**.

Estas pruebas son realizadas en una máquina universal de ensayos para tracción y flexión la cual se muestra en la Figura 8.



Figura 8. a) Máquina Universal de Ensayos. b) Mecanismo para determinación de propiedades mecánicas.

2.7 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos es una técnica estadística que permite recopilar la mayor cantidad de información a partir de ensayos experimentales planeados de manera que la experimentación se haga con el mínimo de recursos y con el menor costo posible. Las técnicas de diseño de experimentos se basan en estudiar

simultáneamente los efectos de todos los factores de interés, siendo posible estudiar la existencia de interacción entre ellos.

En este estudio se utiliza un diseño de experimentos con superficie de respuesta 2^2 más estrella con 8 repeticiones al centro. El diseño propuesto tendrá 16 ensayos de un mismo bloque los cuales se muestran en la Tabla 1.

Los factores serán la temperatura de prensado (T_p) y la severidad del pretratamiento (Se) y las variables de respuesta serán el módulo de elasticidad (MOE), módulo de ruptura (MOR) y el hinchamiento en espesor (TS). Se determinará un óptimo en la región analizada. En la Tabla 2. se muestran los valores de los factores y niveles fijados para la realización del diseño de experimentos.

El orden de los experimentos será completamente aleatorizado para disminuir los errores no controlables. Las respuestas serán analizadas en el programa *Statgraphics Plus 5.0*.

Tabla 1. Matriz del diseño de experimentos aleatorizados.

Experimento No.	Severidad	Temperatura de prensado (°C)
1	3,4	150
2	4,6	150
3	4	180
4	4	137,574
5	4	180
6	4	180
7	3,4	210
8	4	222,426
9	4	180
10	3,15147	180
11	4	180
12	4,6	210
13	4	180
14	4	180
15	4	180
16	4,84853	180

Tabla 2. Factores y niveles del diseño de experimentos propuesto.

Factores	Nivel inferior	Nivel Superior	Unidades
Severidad	3,4	4,6	Adimensional
Temperatura de prensado	150	210	°C

El diseño de experimentos propuestos es de optimización ya que se tenía amplio conocimiento en la respuesta de las variables y no fue necesario una búsqueda del óptimo para estas. Este diseño busca el análisis de calidad de los tableros mediante el estudio de los diferentes factores sobre su comportamiento de variables de carácter físico-mecánico de los tableros.

Para poder analizar e interpretar los resultados estadísticos resultantes del uso del software *Statgraphics centurion* es necesario conocer que información dan las herramientas de este.

2.7.1 Herramientas de análisis estadístico

Se utilizan varios métodos estadísticos para el análisis de los datos y se verifica la idoneidad del modelo. No está de más recordar que los métodos estadísticos no pueden probar que un factor dado tiene un efecto particular. Sólo proporcionan directrices para la veracidad y validez de los resultados. Los métodos estadísticos, aplicados adecuadamente, no permiten probar algo experimentalmente, sólo hacen posible obtener el probable error de una conclusión, o asignar un nivel de confianza a los resultados.

Entre las herramientas utilizadas para la tarea se deben mencionar las siguientes (58):

- *Análisis de variancia (ANOVA)*: En este análisis, la variabilidad de la respuesta en cuestión se secciona en partes separadas correspondientes a cada uno de los efectos. Luego se prueba cual de dichos efectos es estadísticamente significativo comparando la media de cuadrados con un estimado del error experimental. En este caso los análisis se llevan a cabo a un nivel de confianza del 95%.

En la tabla ANOVA un área bajo la curva menor de 0.05 indicaría que el efecto es estadísticamente significativo. La estadística R^2 (coeficiente de determinación) indica que porcentaje de la variabilidad de la respuesta

explica el modelo ajustado. Naturalmente mientras más cercana este al 100% es mejor el modelo ajustado. La estadística SDR (desviación estándar de los residuos) da una idea de la dispersión de los datos con respecto al modelo, mientras más pequeño mejor.

- *Diagrama de Pareto*: Este diagrama muestra cada uno de los efectos estimados en orden de magnitud decreciente. La longitud de cada barra es proporcional al efecto estandarizado, el cual se calcula como el efecto estimado dividido por su error estándar. Esto es equivalente a calcular la estadística t para cada efecto. La línea vertical puede usarse para juzgar cuales efectos son estadísticamente significativos. Cualquier barra que se extienda más allá de la línea corresponde a un efecto el cual es estadísticamente significativo a un nivel de confianza del 95%.
- *Gráfico de efectos principales*: Este grafico muestra la variable de respuesta analizada como una función de cada factor experimental. El factor de interés se varía desde su nivel bajo hasta su nivel alto, mientras todos los otros factores se mantienen constantes en sus valores centrales.
- *Gráficos de interacción*: Este grafico muestra la variable de respuesta estimada como una función de pares de factores. En cada gráfico, el primer factor se mantiene constante en su nivel bajo hasta su nivel alto. En una línea, el segundo factor se mantiene constante en su nivel alto. Todos los otros factores se mantienen constantes en sus valores centrales. Una diferencia en la pendiente de dichas líneas implica una interacción entre ambos factores.
- *Gráficos de superficie de respuesta*: Este grafico muestra la variable de respuesta estimada como una función de dos factores. La altura de la superficie representa el valor de la variable de respuesta. Los otros factores se mantienen constantes.
- *Gráficos de valor predicho contra valor observado*: Este es un gráfico de diagnóstico, muestra los valores observados de la variable de respuesta contra los valores predichos por el modelo ajustado. Mientras más cercanos estén los puntos a la línea diagonal, mejor será el modelo en predecir los valores observados. Dicho grafico permite observar además la variabilidad de los datos experimentales.

- *Gráfico de probabilidad normal de los residuos*: Este gráfico se utiliza para determinar si los residuos siguen una distribución normal asumida. Los puntos se encuentran aproximadamente a lo largo de una línea recta y cualquier desviación constante de la línea recta sería una señal de un comportamiento anormal lo que significaría el no cumplimiento de hipótesis y la no validación del modelo.

En la Figura 9. Se muestra el diagrama de flujo de la metodología propuesta en el proyecto.

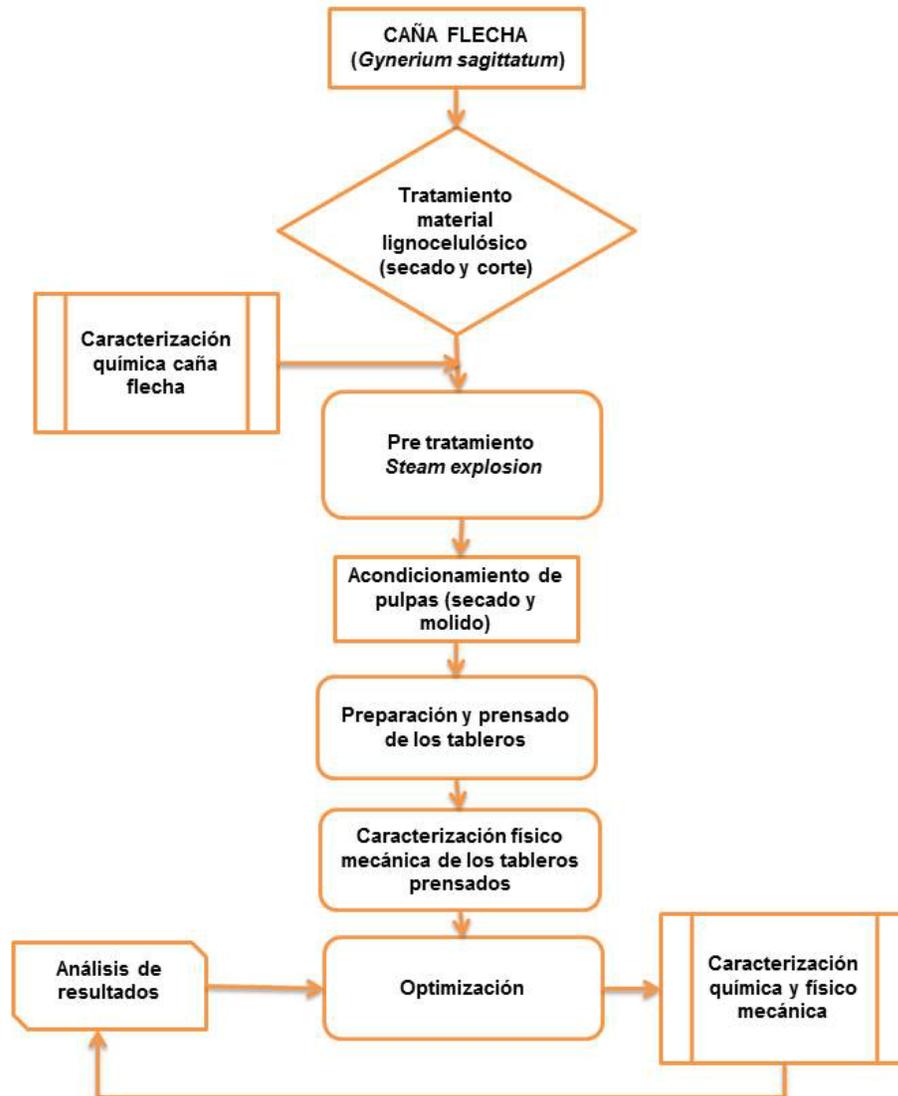


Figura 9. Diagrama de flujo metodología del proyecto

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1 Caracterización de la materia prima: Caña flecha (*Gynerium sagittatum*)

Los resultados de la caracterización química de la caña flecha se muestran en la Tabla 3. donde se puede resaltar el bajo contenido de constituyentes inorgánicos sólidos de esta representados en las cenizas totales. Es importante resaltar el contenido de celulosa obtenido ya que este es junto con el material insoluble en ácido (lignina) los principales compuestos para la elaboración de tableros aglomerados, El valor de lignina determinado experimentalmente para la caña se confirma con el valor reportado por Niño (62). La caña flecha posee porcentajes de estos compuestos superiores al 20% lo cual lo hace una materia óptima para este fin.

Tabla 3. Caracterización química de la caña flecha.

Prueba	% base seca
Humedad	8,88 ± 0,09
Cenizas totales	2,18 ± 0,16
Extraíbles Orgánicos	7,06 ± 0,22
Extraíbles Acuosa	5,66 ± 0,68
Lignina Klason	24,18 ± 1,08
Holocelulosa	63,10 ± 1,98
Pentosanas	24,16 ± 0,19
Celulosa	38,95 ± 0,19

3.2 Obtención de pulpas

Las pulpas pretratadas con *steam explosion* a diferentes severidades se muestran en la Figura 10. donde se evidencia el cambio de color y estructura de las pulpas debido a la pérdida de hemicelulosas por la autohidrólisis de los enlaces glicosídicos presentes por los ácidos acético y fórmico liberados (56). El contenido de celulosa presente se hidroliza en menor extensión y necesita condiciones más severas (24). El contenido de lignina porcentual de las pulpas aumenta con una mayor severidad además de producir una serie de compuestos fenólicos y subproductos de condensación que la hacen apta para su uso en la fabricación de tableros al fluir y plastificarse entre las fibras en el proceso de prensado (57).

Es importante resaltar la efectividad del pretratamiento en el material lignocelulósico caña flecha como se evidencia en la Figura 10. Ya que es este el que le da las propiedades adecuadas para producir tableros de buena calidad sin la necesidad de utilizar aglomerantes o resinas.



Figura 10. Efecto del pretratamiento *steam explosion* a diferentes severidades. a) Caña flecha. b) caña flecha SE 3.15. c) caña flecha SE 3.4. d) caña flecha SE 4. e) caña flecha SE 4.6. f) caña flecha SE 4.8.

3.3 Elaboración de los tableros

Se evaluaron solo tableros de pulpas de caña flecha tratada con *steam explosion* para encontrar un óptimo mejorando las variables de respuesta. Se procede de esta manera teniendo como precedente la efectividad de este pretratamiento en la modificación de materiales lignocelulósicos para la fabricación de tableros de fibras aglomerados (49; 23; 29). Ya que el efecto del *steam explosion* disminuye el contenido de hemicelulosas y aumenta el contenido porcentual de lignina en las pulpas lo cual lo hace apto para la formación. Estos estudios respaldan la necesidad del pretratamiento y la viabilidad de la materia prima para la elaboración de tableros aglomerados.

El resultado del diseño de experimentos para las propiedades físico-mecánicas se muestra en la Tabla 4. Para cada variable de respuesta (MOE; MOR y TS) se llevó a cabo un análisis de varianza donde todas las hipótesis se llevaron a cabo con un nivel de confianza del 95%.

Es importante resaltar que todos los tableros de fibras presentaron densidades mayores a 900kg/m^3 por lo cual están clasificados como tableros de fibras de alta densidad (HDF) y dentro de este grupo serán comparados con los valores estándar para las propiedades físico-mecánicas.

En la Tabla 4. Hay algunos datos de respuesta de las propiedades que se excluyeron para obtener mejores correlaciones en su modelación. Estos puntos corresponden a repeticiones del punto central lo cual no afecta los extremos o valores puntuales decisivos evaluados en el diseño del experimento, garantizando su veracidad.

Tabla 4. Resultado de diseño de experimentos propiedades físico-mecánicas

Experimento	Severidad	T prensado (°C)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	%TS
1	3,4	150	462,43	3,21	227,5
2	4,6	150	3078,78	26,99	46,7
3	4	180	3372,33	-	33,3
4	4	137,57	2687,78	23,99	101,7
5	4	180	-	30,01	25
6	4	180	-	40,26	31
7	3,4	210	1294,56	9,50	71,9
8	4	222,42	3360,84	36,90	15,3
9	4	180	2615,52	35,12	36,7
10	3,15	180	508,45	3,01	133,3
11	4	180	2878,59	34,78	37,9
12	4,6	210	2727,33	25,99	16,7
13	4	180	3506,57	-	18,2
14	4	180	2723,75	30,09	36,4
15	4	180	2863,44	38,14	25
16	4,84	180	1806,28	11,68	12,5

En la Figura 11 se muestra las probetas o tableros formados con pulpas de caña flecha pretratados a diferentes severidades, evidenciándose que con los de mayor

severidad da como resultado un tablero con mejor acabado liso y sin imperfecciones señal de que la lignina presente en el material se distribuyó uniformemente entre las fibras y plastifico con el calor generando una capa repelente en el tablero como también reporta Castro en su trabajo (63).

Las marcas son señales de puntos calientes que presenta el molde en donde hay mayor contacto con el material presado, estas partes también son las que presentan superficie más uniforme confirmando la influencia de la temperatura con la plastificación de la lignina que fluye entre las fibras en el proceso de prensado.

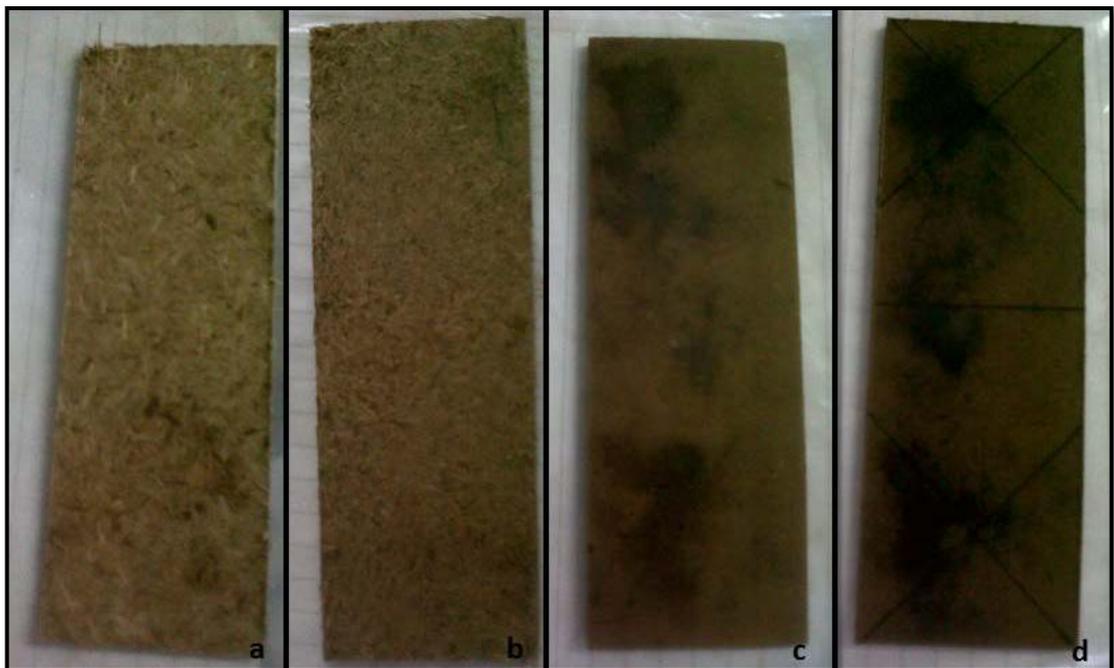


Figura 11. Tableros de caña flecha pretratado a diferentes severidades a) SE 3,15. b) SE 3,4. c) SE 4. d) 4,6.

3.4 Resultados propiedades físico-mecánicas.

3.4.1 Análisis para el módulo de elasticidad (MOE).

El análisis de varianza para el MOE se presenta en la Tabla 5. donde se muestra que solo 1 factor tiene influencia estadísticamente significativamente sobre la variable. La severidad es el factor con mayor influencia en esta propiedad como se evidencia en el diagrama de Pareto de la Figura 12. Además se concluye que no se presentaron interacciones con los demás factores estudiados.

Es importante recalcar la importancia de la severidad ya que este pretratamiento hace una modificación química a la caña flecha al eliminar las hemicelulosas y aumentar porcentualmente el contenido de lignina en esta como concluye Quintana en su trabajo (56). La lignina es la que actúa como enlazante entre las fibras ya que se distribuye entre estas debido al efecto del calor y de la presión que se le ejerza en la formación del tablero.

El factor de la temperatura de prensado no es influyente esto puede ser debido a las consideraciones del error experimental que pudo presentarse o que a cualquier temperatura analizada dentro de la región es suficiente para activar la lignina presente en el material lignocelulósico plastificándola y activando su efecto enlazante.

La severidad y la temperatura de prensado tienen un efecto positivo sobre la propiedad mecánica MOE como se muestra en la gráfica de efectos principales de la Figura 12. No se encontró un valor máximo para el factor de la temperatura de prensado en la región explorada. Pero se determina también que su cambio no es significativo en el aumento del MOE ya que se corresponde con el error experimental que pudo haber ocurrido.

Se observa que hay un valor mínimo y máximo para el valor del MOE en relación con la severidad del pretratamiento con *steam explosion*. Confirmando que a severidades menores es menor esta propiedad y a mayores más alta esto se explica gracias al contenido de lignina porcentual presente en las pulpas las cual se plastifica en la formación generando mayores puntos de contacto lo que se traduce en mayor rigidez para el tablero.

El valor máximo de MOE alcanzado es superior a los 3000 MPa que exigen las normas europeas como parámetro de calidad en sus productos confirmando las buenas características de estos para suplir los tableros comerciales estándar. Comparando con otros trabajos realizados previamente esta propiedad está en el mismo rango de magnitud. Quintana (23) con raquis de banano y Inglés con madera suave (*abies alba-pinus insignis*) (64) reportan valores de 3064 y 3900 MPa respectivamente para sus tableros aglomerados pretratados con vapor.

Hay autores que han obtenido mejores resultados para esta propiedad mecánica en los tableros aglomerados de materiales pretratados también con vapor. Mancera (65) con racimos de *vitis vinifera* y Velásquez (66) con *miscanthus sinensis* reportaron valores de MOE de 4135 y 6590 MPa respectivamente siendo

el ultimo uno de los trabajos en tableros aglomerados sin aditivos con mejores resultados en propiedades mecánicas.

En la Figura 12. Se muestra el gráfico de probabilidad normal de residuos el cual confirma la hipótesis de normalidad ya que los puntos en esta se distribuyen uniformemente como una línea recta. También es importante resaltar en el grafico superficie de respuesta estima hay la formación de un máximo lo cual confirma que la región explorada es suficiente para alcanzar un valor óptimo de esta propiedad.

El modelo generado a partir de los datos experimentales se ajusta con un R^2 de 89,6306 % y un R^2 ajustado a los grados de libertad de 83,1497 %.

La correlación entre los valores observados y los predichos por el modelo se puede observar en el gráfico de MOE de la Figura 12. donde se evidencia un poco de dispersión entre los puntos.

Tabla 5. ANOVA para el MOE

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	Razón F	Área bajo la curva (P)
A:Severidad	4,32844E6	1	4,32844E6	25,22	0,0010
B:T prensado	256513,	1	256513,	1,49	0,2563
AA	6,9198E6	1	6,9198E6	40,32	0,0002
AB	350214,	1	350214,	2,04	0,1910
BB	8813,0	1	8813,0	0,05	0,8264
Error total	1,37287E6	8	171609,	-	-
Total (corr.)	1,32397E7	13	-	-	-

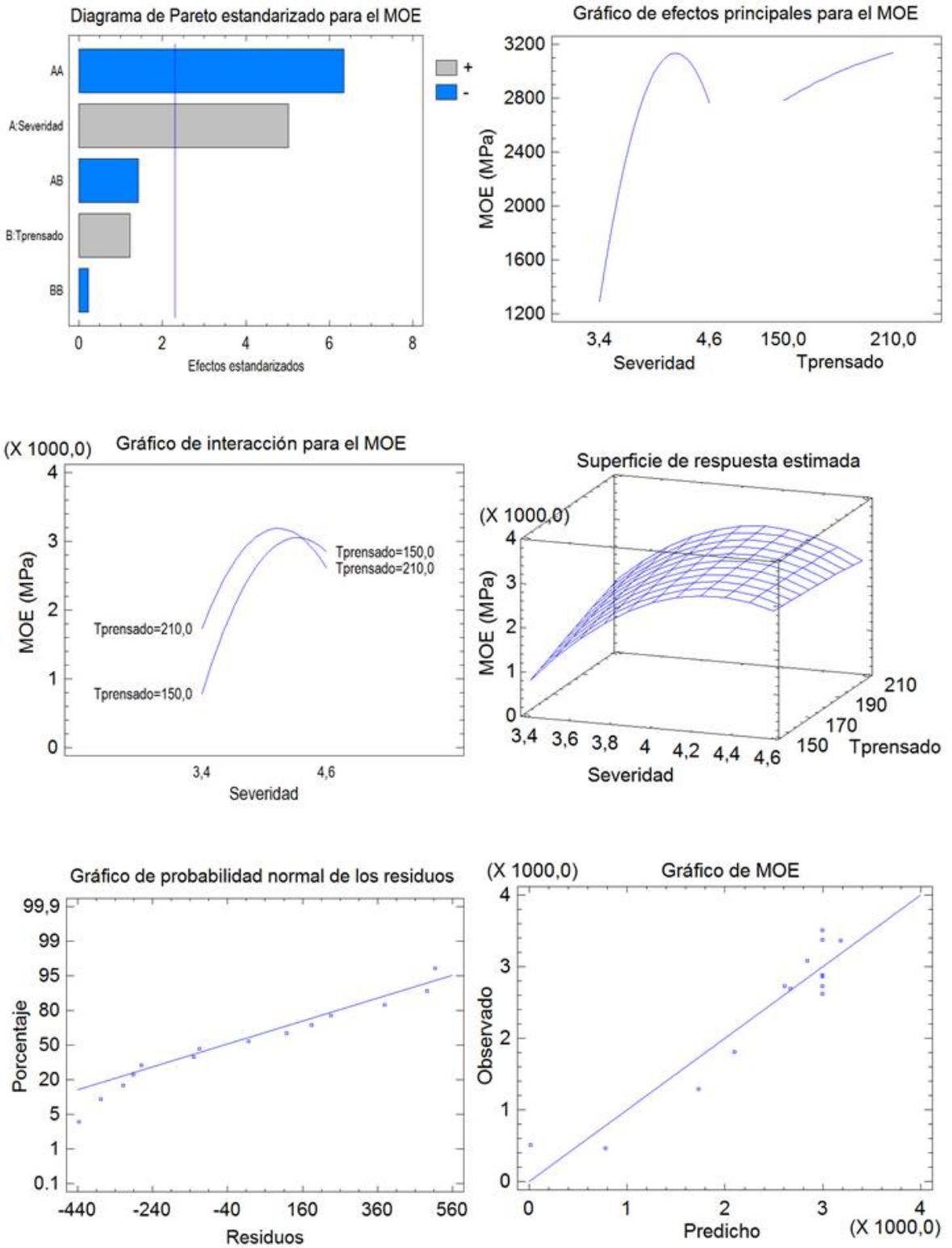


Figura 12. Gráficos para el análisis del MOE

3.4.2 Análisis para el módulo de ruptura (MOR)

El análisis de varianza para la resistencia a la flexión o módulo de ruptura (MOR), se presenta en la Tabla 6. El análisis arrojó que solo un factor la severidad tiene influencia estadísticamente significativamente sobre esta propiedad. Esto se puede evidenciar en el diagrama de Pareto de la Figura 13. Los resultados muestran que los mejores valores para el MOR se obtuvieron a severidades intermedias y el efecto de la severidad del pretratamiento es más fuerte a temperaturas altas como se observa en el gráfico de efectos principales de la Figura 13. donde se observan máximos para la severidad y temperatura de prensado en la región estudiada.

El valor máximo de MOR alcanzado en los ensayos es de 40MPa para una severidad de 4 a estas condiciones la temperatura de prensado no es relevante. Esto se puede explicar que al rango de temperaturas trabajado y teniendo en cuenta el error experimental presente en los ensayos la temperatura trabajadas son suficientes para hacer fluir y plastificar el contenido de lignina la cual se distribuye en el interior del tablero. Lo anterior incrementa la resistencia de los tableros al existir una mejor capacidad de enlaces entre las fibras de las diferentes pulpas (30).

Es importante evidencias que la severidades altas aplicadas también producen un efecto negativo sobre la resistencia de los tableros disminuyendo su calidad ya que el pretratamiento genera ligninas modificadas demasiado frágiles debido a los procesos de polimerización en la autohidrólisis que se presentan. Por esto para los resultados experimentales obtenidos no se recomienda pretratamiento con severidades mayores a 4,2.

El pretratamiento con vapor es de gran importancia en esta propiedad en tableros aglomerados sin enlazantes, Hashim (67; 68) trabajo con troncos de palma de aceite en donde obtuvo valores de MOR para tableros de 5,73 MPa sin pretratamiento y con pretratamiento estos valores ascendían a 25 MPa lo que confirma ampliamente la efectividad del pretratamiento en la formación de tableros aglomerados sin enlazantes de calidad.

Otros autores como Anglés (64), Quintana (23) y Mancera (65) los cuales trabajaron con madera suave, raquis de banano y racimos de *vitis vinífera* respectivamente obtuvieron resultados para el MOR de 25 MPa. El cual es menor que el determinado en este trabajo para la caña flecha demostrando las buenas

propiedades mecánicas para estos tableros. Velásquez (66) reporta un valor de 54 MPa para el MOR de sus tableros a partir de *miscanthus sinensis* de nuevo es la mayor propiedad encontrada para esta clase de tableros sin enlazantes.

El modelo generado a partir de los datos experimentales se ajusta con una R^2 de 90,0116% y el R^2 ajustado por grados de libertad con 83,7688 %. La buena correlación entre los valores observados y los valores predichos por el modelo se puede contrastar en el Diagrama de MOR de la Figura 13. Donde la variabilidad del modelo y los datos experimentales no es mayor.

Igual que el MOE en la Figura 13. Se muestra el gráfico de probabilidad normal de residuos para el MOR el cual confirma la hipótesis de normalidad ya que los puntos en esta se distribuyen uniformemente como una línea recta.

Tabla 6. ANOVA para el MOR

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	Razón F	Área bajo la curva (P)
A:Severidad	345,039	1	345,039	12,69	0,0074
B:Tprensado	69,2506	1	69,2506	2,55	0,1492
AA	1512,61	1	1512,61	55,62	0,0001
AB	13,3189	1	13,3189	0,49	0,5039
BB	56,2681	1	56,2681	2,07	0,1883
Error total	217,573	8	27,1967		
Total (corr.)	2178,25	13			

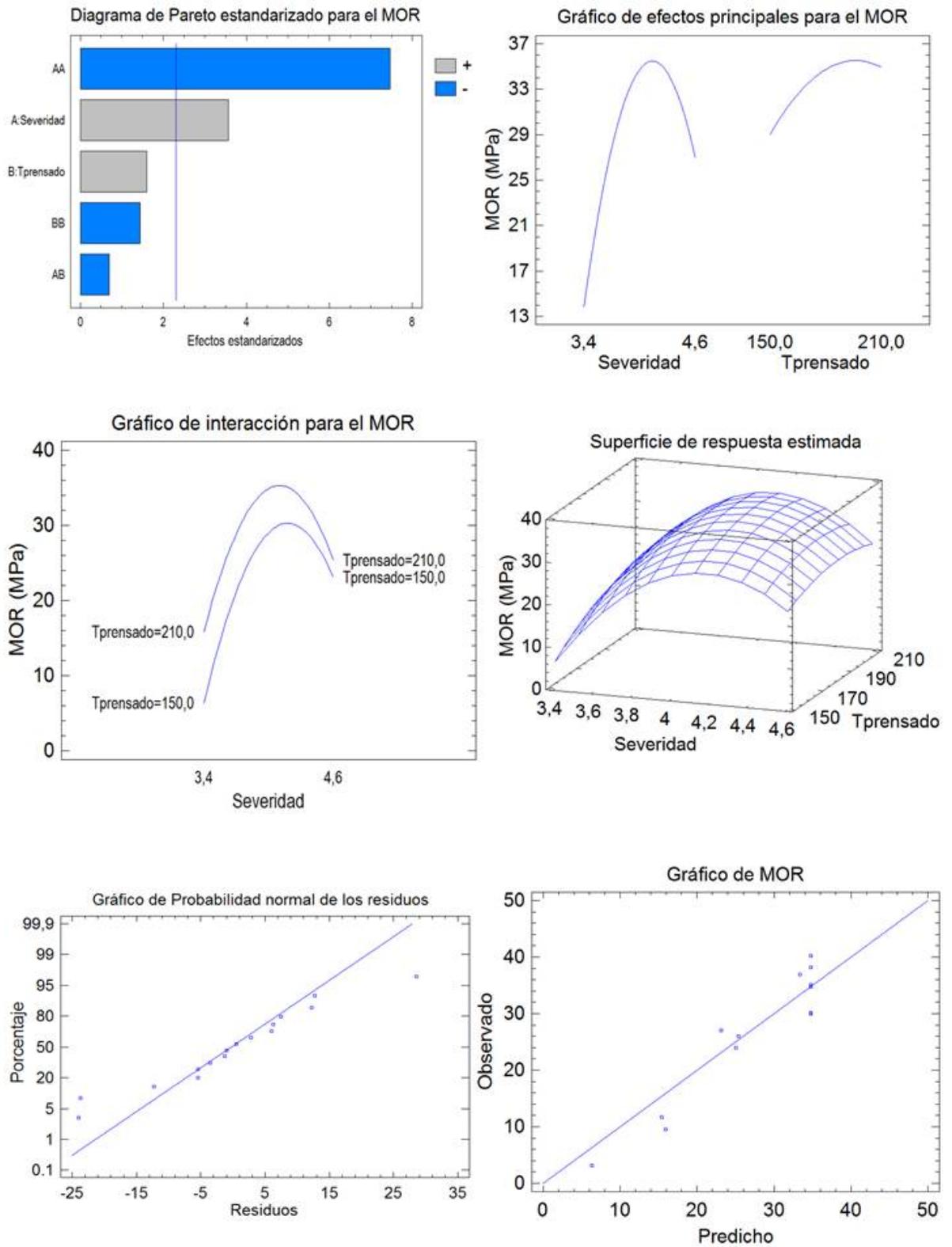


Figura 13. Gráficos para el análisis del MOR

3.4.3 Análisis para el hinchamiento en espesor TS

Los resultados para el hinchamiento en espesor de los tableros analizados se muestran en la Tabla 4. donde para el diseño de experimentos se determinó la estabilidad dimensional de estos a los diferentes factores propuestos.

A diferencia de las demás propiedades analizadas anteriormente el análisis estadístico del TS presenta interacción entre todos los factores posibles como se evidencia en la Tabla 7. Donde los valores P son estadísticamente significativos. Esto también se evidencia en el diagrama de Pareto de la Figura 15.

Tabla 7. ANOVA para el TS

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	Razón F	Área bajo la curva (P)
A:Severidad	20689,5	1	20689,5	78,63	0,0000
B:Tprensado	11841,7	1	11841,7	45,00	0,0001
AA	6041,7	1	6041,7	22,96	0,0007
AB	3943,84	1	3943,84	14,99	0,0031
BB	3290,68	1	3290,68	12,51	0,0054
Error total	2631,23	10	263,123		
Total (corr.)	48438,7	15			

Observando el gráfico de interacciones para el TS de la Figura 15 se evidencia que es más importante el efecto que tiene la severidad en esta propiedad dimensional de los tableros ya que muestra que a altas temperaturas de prensado no se presentan variaciones tan significativas entre los cambios en el espesor del tablero a diferentes severidades, mientras que a bajas temperaturas el efecto de la severidad es dramático en la propiedad.

Para obtener un tablero resistente a la humedad la absorción de agua debe ser mínima, observando el gráfico de efectos principales de la Figura 15. se confirma que esto se logra aumentando las severidades del pretratamiento y la temperatura de prensado. Esto se explica ya que al aumentar la severidad el contenido de hemicelulosa del material lignocelulósico disminuye logrando una mejor distribución de la lignina porcentual en la celulosa mejorando el recubrimiento de las fibras resultando en una mejor resistencia al agua al disminuir la posibilidad de formación de puentes de hidrogeno (64).

Al pretratar el material con *steam explosion* se busca que la lignina con su carácter hidrofóbico cubra la celulosa y disminuya la posible formación de múltiples puentes de hidrógeno que la hacen soluble en agua reduciendo la absorción de agua haciendo que los tableros conserven su estabilidad dimensional (69) .

Según la superficie de respuesta estimada de la Figura 15. La relación adecuada que se debe mantener para obtener un tablero con baja deformación dimensional son mayores temperaturas de prensado y severidades.

El valor para el TS menor determinado experimentalmente fue de 12%, este cumple con los requerimientos estándar ya que es menor al 20% además de superar valores reportados por otros autores como Hashim (68) quien encontró valores de 38.78% para tableros de troncos de palma de aceite. Anglés (64) reporto el 14% para el TS de sus tableros de madera suave los cuales también cumplen la norma estándar pero no supera el comportamiento de los tableros de caña flecha.

Otros autores presentan valores que contrastan con los hallados. Quintana (23) determino un valor del 49% para el TS utilizando raquis de banano para sus tableros, a su vez Mancera (65) y Velásquez reportaron valores de Ts del 8.9 y 8% respectivamente los cuales hacen a sus tableros mejores opciones en cuanto a esta propiedad.

Los valores de TS determinados experimentalmente para la caña flecha también cumplen con la hipótesis de normalidad para su modelación, esto se confirma en la Figura 15. Con el gráfico de probabilidad normal de residuos en donde los puntos se distribuyen uniformemente como una línea recta.

El modelo ajustado a partir de los datos experimentales se ajusta con un R^2 del 94,5679% y el R^2 ajustado por grados de libertad con el 91,8519%. La buena correlación entre los valores observados y los valores predichos por el modelo se puede contrastar en el gráfico de TS de la Figura 15.

En la Figura 14 se observa la probetas de ensayo para cada punto del diseño de experimentos planteados, se ve claramente como los tableros que son formados a partir de pulpas pretratadas a menor severidad presentaron mayor deformación dimensional (probetas 1,7 y 10) también es importante evidenciar el efecto no tan drástico de la temperatura de prensado (probeta 4).

Estas imagen confirman que una mejor redistribución de la lignina que recubre a la fibra se logra a temperaturas de prensado altas lo que hace que las sustancias hidrofílicas presentes sean menos accesibles por el agua, disminuyendo el hinchamiento de los tableros.

Debido a la interacción presente entre la temperatura de prensado y la severidad, es posible lograr bajos valores de hinchamiento en espesor a bajas severidades, incrementando la temperatura de prensado.

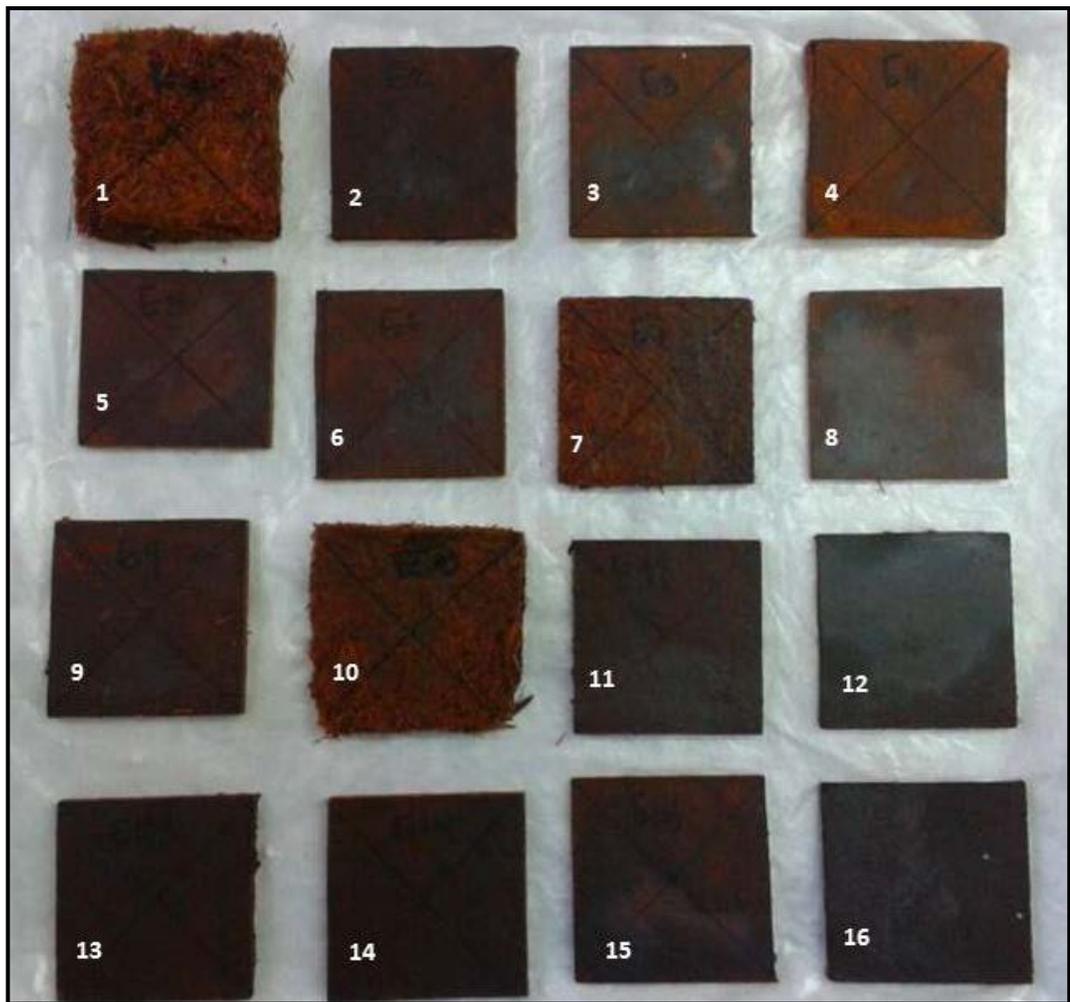


Figura 14. Probetas de ensayo de estabilidad dimensional del diseño de experimentos.

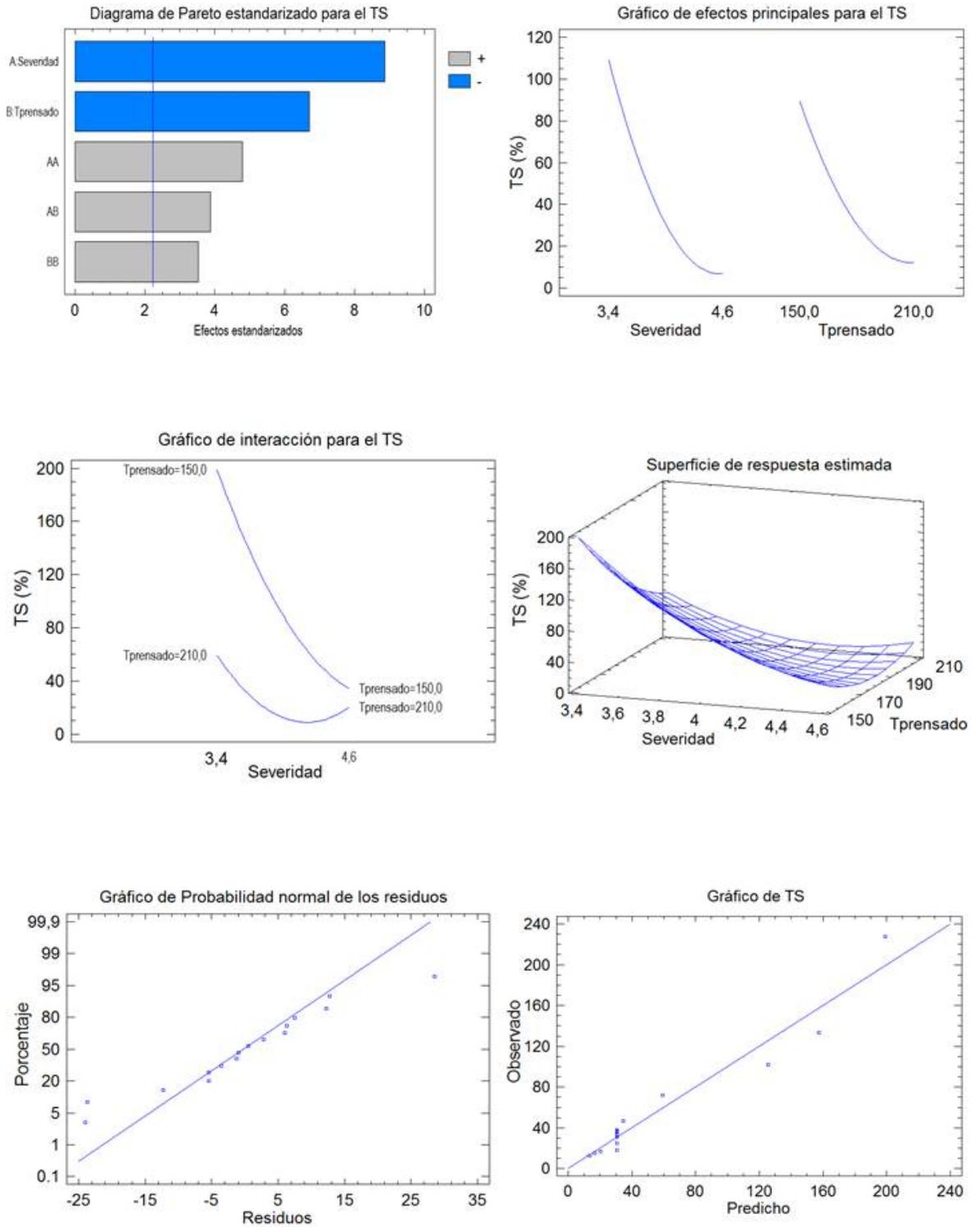


Figura 15. Gráficos para el análisis del TS

3.5 Verificación de resultados

Partiendo del análisis estadístico y de los modelos encontrados para las diferentes variables de respuesta, se pudo establecer los valores que deben tener los factores evaluados para obtener las mejores propiedades para los tableros.

En la Tabla 8. se muestra los valores en los que deben estar cada uno de los factores y los óptimos encontrados, resaltando en negrilla los promedios de las variables de respuesta de 3 ensayos propuestos a las condiciones optimizadas.

Para establecer cuáles deben ser las condiciones óptimas de trabajo, solo se optimizó con las variables de respuesta MOE y el TS ya que el comportamiento del MOE y el MOR son similares y el cálculo del MOE es menos sensible a factores como el espesor de los tableros.

Según los valores óptimos encontrados, los tableros resultantes a partir de caña flecha pretratada cumplen en términos generales con los mínimos exigidos para tableros de alta densidad a nivel comercial. Aunque estas propiedades están por debajo de trabajos similares como el que reporta Velásquez con *M. sinensis* (58).

Al trabajar con los troncos de la caña flecha y ser estos la parte estructural de la planta se parte de un material de buena calidad en términos de contenido de celulosas, fibras y lignina lo cual genera un buen efecto enlazante lo que se tradujo en tableros de buena resistencia.

Tabla 8. Parámetros de optimización y valores experimentales obtenidos a estas condiciones.

Severidad	T prensado (°C)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	%TS
4,1	217	5383,54	32,59	6,25
		5330,76	31,59	8,47
		6361,17	38,42	8,57
Promedio		5691,82 ± 656,63	34,20 ± 4,17	7,77 ± 1,49

En la Tabla 9. se reporta la caracterización para la severidad óptima encontrada donde se confirma el aumento del contenido de porcentual de lignina en un 36% respecto al material original (caña flecha) lo cual valida la relación de la lignina con el aumento de la resistencia de los tableros, una disminución del 68% de pentosanas o hemicelulosas las cuales como se ha reportado anteriormente como las principales responsables de la estabilidad dimensional de los tableros y una

disminución de menos del 10% en la celulosa contenida en el material pretratado con el *steam explosion* lo cual confirma que el pretratamiento no disminuye esta drásticamente lo cual no disminuye la calidad de los tableros ya que esta es una de los principales requerimientos para la formación de un tablero con calidad.

En la Figura 16. Se evidencia la reestructuración porcentual que sufre la caracterización de la caña flecha al ser tratada con vapor a SE 4,1. Es importante resaltar el aumento de los EO en el material pretratado ya que es 3 veces mayor. La lignina (alto peso molecular) de la caña flecha en el pretratamiento con vapor es sometida a reacciones de ruptura formando compuestos o ligninas de bajo peso molecular por reacciones de condensación (70). Esta lignina modificada se redistribuye en su mayoría sobre las microfibrillas de la celulosa. Al caracterizar los EO se cuantifico en su mayoría los compuestos y ligninas degradados aumentando significativamente su valor.

El aumento de los componentes antes y después del pretratamiento con vapor se explica gracias a la pérdida de hemicelulosa que sufrió la caña flecha con el pretratamiento lo cual distribuyo en base al total los demás componentes. Estas estas contenidas en el lixiviado que arroja el pretratamiento junto con EO que se pierden en el tratamiento.

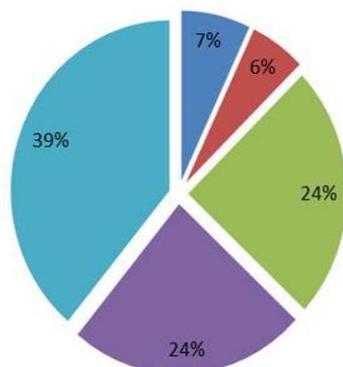
La hemicelulosa en la madera es la encargada de impartir las propiedades viscoelásticas, al degradar estas se hace frágil y rígido material pretratado (70). La eliminación de los grupos OH de estas por reacciones de deshidratación dan como resultado un material con superficies hidrófobas (mayor resistencia a la humedad) como se ha comprobado anteriormente.

El valor optimo determinado para la severidad es 4.1 este valor maximiza el MOE y al no tener influencia significativa sobre el MOR este punto no hará que cambie su optimo significativamente. La temperatura determinada para la optimización es 217°C la cual al no ser influente con el MOR y el MOE se determinó para sustentar la disminución del TS donde si tenía una importancia marcada por esta razón esta temperatura se puede considerar alta.

Tabla 9. Caracterización química de la caña flecha SE 4,1.

Prueba	% en base seca
Humedad	5,82 ± 0,23
Cenizas totales	0,86 ± 0,14
Extraíbles Orgánicos	21,64 ± 1,24
Extraíbles Acuoso	2,12 ± 0,62
Lignina Klason	33,27 ± 5,26
Holocelulosa	42,97 ± 7,12
Pentosanas	8,01 ± 0,08
Celulosa	34,96 ± 0,08

Caracterización Caña flecha



Caracterización Caña flecha SE 4,1

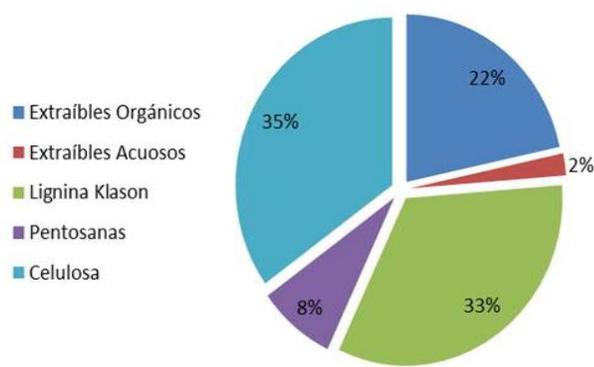


Figura 16. Diagrama circular para la caracterización de la caña flecha y la pulpa pretratada con vapor SE 4,1.

En la Figura 17. Se muestran los tableros resultantes de la optimización donde se evidencian claramente la superficie lisa en sus caras resultante de plastificación de la lignina como se ha reportado anteriormente la cual hace al tablero hidrofóbico para disminuir la absorción de agua y conserva la estabilidad dimensional conservando buenas cualidades mecánicas cumpliendo con los estándares comerciales para tableros de alta densidad.



Figura 17. Tableros condiciones optimizadas a) Cara frontal. b) Cara posterior.

4. CONCLUSIONES

Es posible obtener tableros de partículas de alta densidad y calidad a partir de la caña flecha mediante tratamiento con *steam explosion*, superando los valores mínimos exigidos por las normas europeas y españolas.

La materia prima es adecuada para la realización de los tableros a pesar de necesitar un pretratamiento para maximizar sus propiedades.

El pretratamiento con vapor conlleva a la pérdida de hemicelulosas y una mejor distribución de la lignina sobre las fibras.

Los modelos ajustados en los diseños de experimentos a las diferentes variables de respuesta han sido satisfactorios y han permitido realizar un análisis fiable desde el punto de vista estadístico.

Entre mayor sea la severidad y con temperaturas de prensado intermedias se obtienen los mejores resultados para las propiedades mecánicas MOR y MOE, los valores más altos son de 40 MPa y 3300 MPa respectivamente.

La lignina cumple su función como aglomerante y proporciona el carácter hidrofóbico al tablero, trabajar con alta severidad resulta en un TS de 12%.

Existe una dependencia directa entre la estabilidad dimensional de los tableros y las hemicelulosas ya que estas son altamente hidrofílicas y por lo tanto absorben humedad que se traducirá en un aumento del espesor del tablero.

Los valores óptimos de los factores para maximizar las propiedades mecánicas y minimizar las propiedades físicas de los tableros son severidad 4.11 y temperatura de prensado de 217°C.

Los valores para las propiedades físico mecánicas optimizadas fueron MOE 5691,82 MPa, MOR 34,20 MPa y TS 7.7%.

Es necesario realizar un estudio sobre el efecto del pretratamiento con vapor sobre la estructura de la lignina para poder establecer claramente el efecto de su

peso molecular sobre sus características adhesivas y las propiedades mecánicas de los tableros.

Las severidades altas aumentan la concentración relativa de lignina dejando muy poca cantidad de fibras, además la estructura de la celulosa se ve deteriorada mediante hidrólisis desmejorando sus propiedades lo que se traduce en tableros de baja calidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. **FAO**. Estadísticas de productos forestales. Producción e importación tableros de fibras a nivel mundial. [En línea] 2012. [Citado el: 8 de 10 de 2013.] <http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=626&lang=es#ancor>.
2. **FAO**. Producción e importación tableros de fibras en Colombia. [En línea] 2012. [Citado el: 8 de 10 de 2013.] <http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=626&lang=es#ancor>.
3. *Extractable formaldehyde from waste medium density fibreboard*. **Hashim, R y Hamid, SHA**. 2009, J Trop, Vol. 21, págs. 25–33.
4. Proyecto caña brava. [En línea] [Citado el: 10 de 10 de 2013.] http://www.canabrava.com.pe/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=48&Itemid=64.
5. **IUSH EPM**. Desarrollo sostenible “La caña flecha”. [En línea] [Citado el: 30 de 9 de 2013.] <http://iushepmjawi.blogspot.com/>.
6. **Wikipedia**. *Gynerium sagittatum*. [En línea] [Citado el: 5 de 11 de 2013.] http://es.wikipedia.org/wiki/Gynerium_sagittatum.
7. **TRAMILoteca**. *Gynerium sagittatum*. [En línea] [Citado el: 5 de 11 de 2013.] http://www.tramil.net/fototeca/imageDisplay.php?id_elem=180&famil=POACEAE.
8. **Rojas, Humbertho**. Determinación del potencial de la caña brava en la provincia de Cañete-Peru. [En línea] [Citado el: 30 de 9 de 2013.] <http://potencial-gynerium-sagittatum-pe.blogspot.com/>.
9. *Acumulación de mercurio (Hg) por caña flecha (Gynerium sagittatum) (Aubl) Beauv. in vitro*. **Ortega, Rafael Esteban y Beltrán, Javier Darío**. 1, s.l. : SCIELO, 5 de 2011, Revista colombiana biotecnología , Vol. 13.
10. *Flavonoids and isoflavonoids from Gynerium sagittatum*. **Benavides, Angelyne y Bassarello, Carla**. s.l. : ELSELVIER, 2007, PHYTOCHEMISTRY, Vol. 68, págs. 1277-1284.

11. **Marcano, Aumaitre.** *Evaluación de la caña brava Gynerium sagittatum – Gramineae, como materia prima en la elaboración de pulpa y papel.* Merida-Venezuela: s.n., 1967.
12. *Tableros aglomerados de partículas de caña brava (Gynerium sagittatum) y adhesivo urea–formaldehído.* **Contreras, Wilver y Contreras, Yoston.** 231, s.l. : AITIM, 9 de 2004, Boletín de información técnica.
13. *Diseño de tableros de partículas de caña brava y adhesivo fenol-formaldehído(R 10% / R 13%).* **Contreras, Wilver y Owen, Mary.** 39, 2006, Rev. For. Lat., págs. 39-55.
14. *Elaboración de un elemento estructural laminado, tipo PARALLAM, con tiras de caña brava (Gynerium sagittatum) y adhesivo fenol-formaldehído.* **Contreras, Wilver y Owen de Contreras, Mary.** 1, Merida : s.n., 1997, Revista Forestal Venezolana, Vol. 41, págs. 29-36.
15. **Papelera Palermo.** Productos. *Lignina.* [En línea] [Citado el: 5 de 11 de 2013.] <http://papelera.eurofull.com/shop/detallenot.asp?notid=46>.
16. **Gutiérrez, Leonardo.** *Efecto del azufre sobre la digestibilidad In Situ de un alimento en base a fibra y su relación sobre los microorganismos del rumen de ovinos.* Universidad de Colima. 2004.
17. **Ysambertt, F.** *Interferencias analíticas asociadas al estudio de la distribución de pesos moleculares en fase orgánica de desechos lignicos del pulpado de papel.* s.l. : Multiciencias, 2004. pág. 9. Vol. 4.
18. **Wikipedia.** *Lignina.* [En línea] [Citado el: 5 de 11 de 2013.] <http://es.wikipedia.org/wiki/Lignina>.
19. *Recent developments in lignin utilization as wood adhesive .* **Matte, J.** 1988, Cellulose Chemistry and Technology, Vol. 22, pág. 71.
20. *Lignin bases polycondensation resins for wood adhesives.* **Mansouri, N y Salvado, J.** 3, 2007, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 103, pág. 1690.
21. *Lignin depolymerization/repolymerization and its critical role for delignification of aspen wood by steam explosion.* **Jiebing, Li y Gunnar, Henriksson.** 98, s.l. : ELSEVIER, 2007, Bioresource Technology, págs. 3061–3068.

22. *Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pretreatments.* **Overend, R y Chornet, E.** 1561, 1987, Philosophical Transaction of the Royal Society, Vol. 321, págs. 523-536.
23. *Binderless fiberboard from steam exploded banana bunch.* **Quintana, German.** 1, 2009, Industrial crops and products, Vol. 29, pág. 62.
24. *Characteristics of degraded cellulose obtained from steam exploded wheat straw.* **Sun, X.** 1, 2005, Carbohydrate Research, Vol. 340, pág. 97.
25. *Changes in various physical/chemical parameters of Pinus pinaster wood after steam exposition pretreatment.* **Negro, M.** 3, 2003, Biomass & Bioenergy, Vol. 25, pág. 301.
26. *The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials.* **Pereira Ramos, Luiz.** 6, 2003, Quim. Nova, Vol. 26, págs. 863-871.
27. *Steam explosion lignins; their extraction, structure and potential as feedstock for biodiesel and chemicals.* **Jiebing, Li y Göran, Gellerstedt.** 100, s.l. : ELSEVIER, 2009, Bioresource Technology, págs. 2556–2561.
28. *Changes in various physical/chemical parameters of Pinus pinaster wood after steam explosion pretreatment.* **Negro, M y Manzanares, P.** Madrid : PERGAMON, 2003, Biomass and Bioenergy, Vol. 25, págs. 301 – 308.
29. *Binderless fiberboard from steam exploded Miscanthus sinensis.* **Velásquez, J.** 3, s.l. : Berlin, 2003, Wood Science and Technology, Vol. 37, págs. 269 – 278.
30. *Binderless fiberboard from steam exploded Miscanthus sinensis: optimization pressing and pretreatment conditions.* **Salvadó, J y Velásquez, J.** 3, s.l. : Berlin, Diciembre de 2003, Wood Science and Technology, Vol. 37, págs. 279 – 286.
31. *Pulp and paper from steam exploded wood.* **Mason, W.** 84, 1927, Paper trade J, pág. 131.
32. *Oxidative activation of wood surfaces for glue bonding.* **Back, El.** 40, 1998, Forest Prod Journal, pág. 130.

33. *Lignin plasticization to improve binderless fiberboard mechanical properties.* **Bouajila, J y Limare, A.** 6, 2005, Polymer Engineering & Science, Vol. 45, págs. 809-816.
34. *Preparation of Binderless Boards from Steam Exploded Pulps of Oil Palm (Elaeis guineensis Jaxq.) Fronds and Structural Characteristics of Lignin and Wall Polysaccharides in Steam Exploded Pulps to be Discussed for Self-Bindings.* **Satoshi, Suzuki y Hiroyuki, Shintani .** 4, 2009, Holzforschung, Vol. 52, págs. 417-426.
35. *Effect on cooking conditions on fiber bonding in dry-formed binderless hardboard.* **Suchsland, O y Woodson, G.** 11-12, 1987, Forest Products Journal, Vol. 37, págs. 65 – 69.
36. *Effect of Lignocellulosic Materials on the Properties of Thermoplastic Polymer/Wood Composites.* **Takatani, M.** 2, 2000, Holzforschung, Vol. 54, págs. 197 – 200.
37. **Wikipedia.** Contrachapado. [En línea] [Citado el: 5 de 11 de 2013.] <http://es.wikipedia.org/wiki/Contrachapado>.
38. **Infomadera.** Tableros de partículas. [En línea] [Citado el: 5 de 11 de 2013.] http://www.infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_73_particulas.pdf?PHPSESSID=2640717e35b57f3646a17dedb2da73b0.
39. **Clustermadeira.** Tableros de fibras. [En línea] [Citado el: 5 de 11 de 2013.] http://www.clustermadeira.com/pdf/6_tableros_fibras.pdf.
40. *Experimental particleboards from kenaf plantations grown in greece.* **Grigoriu, A.** 5, 2000, Holz als Roh und Werkstoff, Vol. 58, págs. 309.
41. *Particleboard made from hammer milled black spruce bark residues.* **Blanchet, P.** 1, 2000, Wood Science and Technology, Vol. 34, págs. 11.
42. *Manufacture and mechanical properties of binderless boards from kenaf core.* **Okuda, Nobuhisa.** 1, 2004, Journal of wood science, Vol. 50, págs. 61.
43. *Overlaying properties of fiberboard manufactured from bamboo and rice straw.* **Hiziroglu, S.** 2008, Industrial Crops and Products, Vol. 28, págs. 107.

44. *Binderless Lignocellulose Composite from Bagasse and Mechanism of Self-Bonding.* **Mobarak, F y Fahmy, Y.** 1982, *Holzforschung*, Vol. 36, pág. 131.
45. *Characterization of raw materials and manufactured binderless particleboard.* **Hashim, Rokiah.** s.l. : ELSEVIER, 2011, *Materials and Design*, Vol. 32, págs. 246–254.
46. *Manufacture of non-resin wheat straw fibreboards.* **Halvarsson, Sören y Edlund, Håkan.** s.l. : ELSEVIER, 2009, *industrial crops and products*, Vol. 29, págs. 437–445.
47. *Effect of hardboard process variables on fiberbonding.* **Suchsland, O y Woodson, E.** 1983, *Forest Products Journal*, Vol. 33, pág. 58.
48. *Binderless fiberboard from two diferferent types of fiber furnishes.* **Suchsland, O y Woodson, G.** 1985, *Forest Products Journal*, Vol. 35, pág. 63.
49. *Binderless Composites from Pretreated Residual Softwood.* **Anglès, M y Reguant, J.** 1999, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 73, págs. 2485-2491.
50. **ASTM.** Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. [En línea] [Citado el: 20 de 11 de 2013.] <http://www.astm.org/Standards/E871.htm>.
51. **ASTM.** Standard Test Method for Ash in Wood. [En línea] [Citado el: 20 de 11 de 2013.] <http://www.astm.org/Standards/D1102.htm>.
52. **ASTM.** Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood. [En línea] [Citado el: 20 de 11 de 2013.] <http://www.astm.org/Standards/D1107.htm>.
53. **ASTM.** Standard Test Methods for Water Solubility of Wood. [En línea] [Citado el: 20 de 11 de 2013.] <http://www.astm.org/Standards/D1110.htm>.
54. **ASTM.** Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood. [En línea] [Citado el: 20 de 11 de 2013.] <http://www.astm.org/Standards/D1106.htm>.
55. **TAPPI .** *Norma T223 cm-01 Pentosans in wood and pulp.* 2001.
56. **Quintana, German.** *Pretratamiento con vapor del raquis de banano para la producción de tableros de aglomerados sin enlazantes.* Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín : s.n., 2006. Tesis maestría.

57. *Binderless fiberboard from steam exploded miscanthus sinensis: the effect of a grinding process.* **Velásquez, J, Ferrando, F y Salvadó, J.** 60, 2002, Holz als Roh- und Werkstoff, págs. 297- 302.
58. **Velásquez, J.** *Producción de tableros de fibras a partir de Miscanthus sinensis.* Tarragona : s.n., 2002.
59. **UNE EN.** *Norma para la determinación de la hinchazón en el espesor de tableros de prensado plano EN 317.* 1993. Norma.
60. **UNE EN.** *Norma para la determinación del módulo de elasticidad aparente en flexión de cara y la resistencia a flexión de los tableros derivados de la madera con espesor > 3mm EN 310 .* 1993. Norma.
61. **UNE EN.** *Norma para la determinación de la densidad de las probetas de los tableros derivados de madera EN 323.* 1995. Norma.
62. **Niño Lozano, Jairo Fernando.** *Potencial y beneficio socio-ambiental del uso de materiales lignocelulósicos generados en proyectos lineales.* Medellín : Universidad Nacional de Colombia, 2011.
63. **Castro, Daniela y Henao, Elizabeth.** *Elaboración de tableros aglomerados a partir de lodos papeleros y lignina.* Medellín : Universidad Pontificia Bolivariana, 2009.
64. *Suitability of steam exploded residual softwood for the production of binderless panels. Effect of pre-treatment severity and lignin addition.* **Anglés, M.** 3, 2001, Biomass and Bioenergy , Vol. 21, págs. 211-224.
65. *The effect of lignin as a natural adhesive on the physico-mechanical properties of vitis vinifera fiberboards.* **Mancera, Camilo y Mansouri, N.** 3, 2011, Bioresources, Vol. 6, págs. 2851-2860.
66. *Effects of kraft lignin addition in the production of binderless fiberboard from steam exploded Miscanthus sinensis.* **Velásquez, J y Ferrando, F.** 2003, Industrial Crops and Products, Vol. 18, págs. 17-23.
67. *Influence of press temperature on the properties of binderless particleboard made from oil palm trunk.* **Said, N y Hashim, R.** 2011, Materials and Design, Vol. 32, págs. 2520-2525.

68. *Properties of steam treated binderless particleboard made from oil palm trunks.* **Saari, Norhafizah y Hashim, Rokiah.** 2014, Composites, Vol. 56, págs. 344-349.
69. **Fengel, Dietrich y Wegener, Gerd.** *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions.* s.l. : Verlag Kessel, 2003. pág. 613.
70. **Wolfgang, Stelte.** *Steam explosion for biomass pre-treatment.* Danish Technological institute. pág. 15, Reporte.

ANEXOS

ANEXO A. Cálculo de pentosanas Norma T223 cm-01

Las pentosanas se transforman en ebullición con HCL a furfural el cual es colectado en el destilado y determinado colorimétricamente con el reactivo Orcinol-ferrico cloridico. La pentosanas contenidas en la pulpa indica la retención o pérdida de hemicelulosas en general durante el pulpeo y el blanqueo.

En la Figura 1. Se muestra la curva de calibración determinada mediante estándares de xilosa para determinar el contenido de pentosanas en los materiales lignocelulósicos

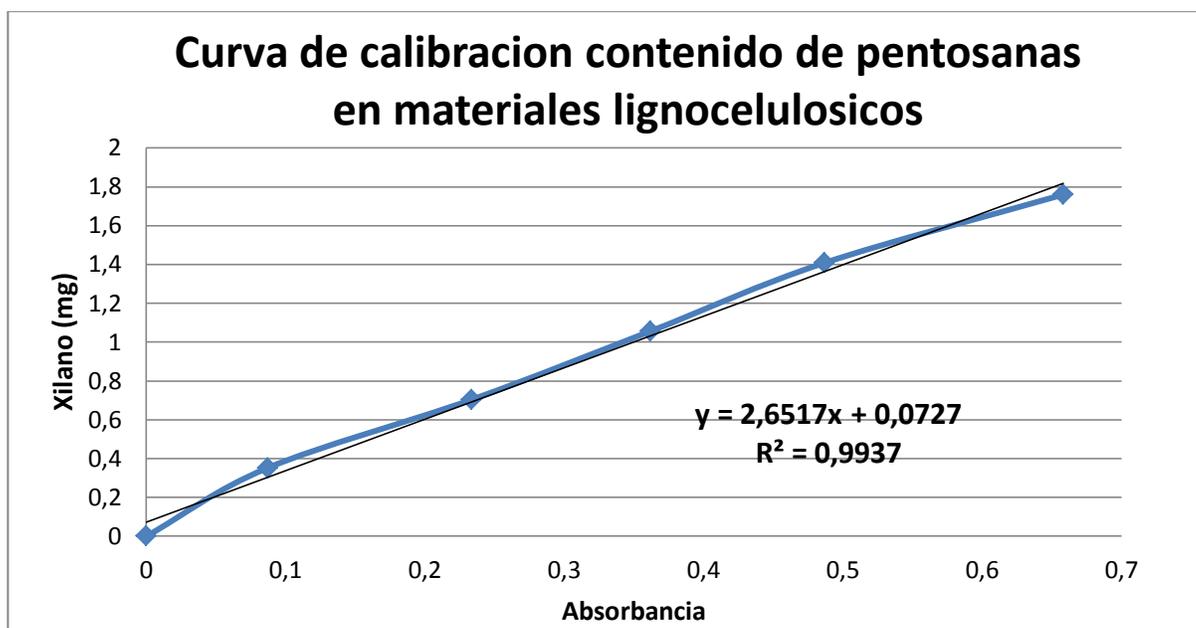


Figura 1. Curva de calibración para cálculo de pentosanas en madera.

$$mgXilano = 2,6517 * absorbancia + 0.0727$$

ANEXO B. Propiedades mecánicas de los tableros. MOR y MOE

La determinación del módulo de ruptura y del módulo de elasticidad se realiza mediante un ensayo de flexo-tracción siguiendo las normas UNE EN 31094 (60) y EN 323 (61; 53) para tableros de fibras, donde se aplica una carga en el centro de una probeta rectangular que está apoyada en sus extremos.

El módulo de elasticidad se calcula utilizando la secante de la curva carga de deformación en el primer tercio, ya que dentro de esta zona los tableros tienen un comportamiento lineal. El valor calculado se denomina módulo aparente, ya que este método de ensayo incluye tanto la influencia del esfuerzo cortante como la flexión y no se cumplen estrictamente las hipótesis anunciadas anteriormente. La tensión de ruptura se ve afectada por las mismas limitaciones, especialmente por la falta de linealidad que se observa en la parte final del ensayo.

La determinación del módulo de elasticidad y la tensión de ruptura se realiza a través de la teoría elemental de vigas. El dispositivo de ensayo consta de un soporte con dos cilindros paralelos que hacen de punto de apoyo, los cuales tienen una longitud superior al ancho de las probetas y un diámetro de 15 ± 0.5 mm; la distancia entre los dos puntos de apoyo se puede ajustar dependiendo de las dimensiones de la probeta. El dispositivo de ensayo consta de un cabezal de carga cilíndrico con la misma longitud que los puntos de apoyo y con un diámetro de 15 ± 0.5 mm el cual está colocado paralelamente y equidistante de éstos.

Los instrumentos utilizados en la medida de las deformaciones que se producen en la mitad de la probeta tienen una precisión de 0.1 mm y el sistema de medida de la carga aplicada en las probetas proporciona una precisión de 1% del valor medido.

Las probetas son rectangulares de 50 mm x 150 mm, acondicionadas según requiere la norma. Antes de realizar la prueba se miden el ancho y el espesor de la probeta, con este último se determina la distancia entre los dos puntos de apoyo la cual será 20 veces el espesor nominal del tablero ± 1 mm. Las probetas se apoyan con su eje longitudinal perpendicular a los ejes de los cilindros de apoyo. La carga se aplica en el centro de la probeta. La velocidad de deformación ha de ser constante durante la realización del ensayo y se debe alcanzar la carga máxima en 60 ± 30 s.

Se mide la deformación en el centro de la probeta, concretamente sobre el cabezal de carga, con una precisión de 0.1 mm y se registran los valores correspondientes a la deformación y la carga en el 10% y el 40% de la carga máxima. También se registra la carga máxima.

- El módulo de elasticidad (MOE) en MPa se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$MOE = \frac{[l_1^3(F_2 - F_1)]}{[4bt^3(a_2 - a_1)]}$$

Dónde:

L1: Distancia entre los ejes de apoyo, en mm

b: Anchura de la probeta, en mm

t: Espesor de la probeta, en mm

F2: 40% de la carga máxima, en N

F1: 10% de la carga máxima, en N

a2: Deformación obtenida a F2, en mm

a1: Deformación obtenida a F1, en mm

- La resistencia a la flexión (MOR) en MPa de cada probeta se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$MOR = \frac{3F_{max}L_1}{2bt^2}$$

Dónde:

F_{max}: Carga máxima, en N

l₁, b, t igual que en la formula anterior

ANEXO C Norma UNE 31794

El método se fundamenta en la determinación de la absorción de agua calculando el aumento en la masa y el hinchamiento en espesor de las probetas después de la inmersión total en agua por 24h±15min siguiendo la norma UNE 31794 (59).

Procedimiento

- Pesar las probetas de dimensiones 50x50mm con una precisión de 0,01gr y medir su espesor en el cruce de las diagonales de las esquinas de la probeta.
- Colocar las probetas verticalmente y separadas unas de otras en un recipiente con agua destilada con pH neutro y a una temperatura de 20°C. los tableros deben estar sumergidos unos 20mm por debajo de la superficie durante 24h±15min.
- Sacar las probetas del agua y colocarlas horizontalmente sobre hojas de celulosa de tal manera que se les retire el agua en exceso.
- Durante los 10min siguientes pesar las probetas y medir el espesor.

Cálculos

- Porcentaje de absorción de agua (WA)

$$\%WA = \frac{(m_1 - m_0)}{m_0} * 100$$

Dónde:

M1: Peso después de inmersión en agua

M0: Peso inicial de la probeta

- Porcentaje de hinchamiento en espesor (TS)

$$\%TS = \frac{(l_1 - l_0)}{l_0} * 100$$

Dónde:

L1: Espesor después de inmersión en agua

L0: Espesor inicial de la probeta