

EFEECTO DE LA PRESIÓN DE PENSADO Y LA ADICIÓN DE LIGNINA KRAFT EN LA PRODUCCIÓN DE TABLEROS AGLOMERADOS AUTOENLAZADOS A PARTIR DE *Gynerium sagittatum* PRETRATADA CON VAPOR

EFFECTS OF PRESSING PRESSURE AND KRAFT LIGNIN ADDITION IN THE PRODUCTION OF BINDERLESS FIBERBOARD FROM STEAM EXPLODED *Gynerium sagittatum*

Giovanna Diossa¹, Jorge A. Velásquez^{1,*}, Germán C. Quintana¹, Viviana Gómez¹

RESUMEN

El *Gynerium sagittatum* es una gramínea que presenta gran adaptabilidad ecológica lo cual la hace una fuente lignocelulósica ideal para la fabricación de tableros aglomerados sin aditivos sintéticos. Se evalúa el efecto de la presión de prensado y de la adición de lignina kraft purificada sobre las propiedades fisicomecánicas de tableros de fibras de *Gynerium sagittatum* de alta densidad. La materia prima es pretratada en un reactor de *steam explosion* a severidad 4,1 y la temperatura de prensado se fija en 217°C. Se varía la presión de prensado entre 2 y 15 MPa. Se determina que la presión de prensado más apropiada para obtener tableros de buena calidad es 2 MPa obteniendo valores para el módulo de elasticidad de 6000 MPa, módulo de ruptura de 47 MPa, enlace interno de 1,50 MPa, absorción de agua durante 24 horas de 25% e hinchamiento en espesor durante 24 horas del 15%.

Partiendo de estas condiciones de operación, se evalúa la inclusión de lignina entre 0 y 30%. Se determina que el aumento de lignina no afecta significativamente el desempeño mecánico de los tableros, pero sí su estabilidad dimensional, dando como resultado una absorción de agua durante 24 horas de 19% e hinchamiento en espesor durante 24 horas del 8,5%, a un valor óptimo de 20% de inclusión de lignina.

Palabras claves: Adhesivos naturales, fibras naturales, productos forestales, propiedades físico-mecánicas, tableros de alta densidad.

ABSTRACT

Gynerium sagittatum is a grass that has great ecological adaptability, which makes it an ideal lignocellulosic source for the manufacture of fiberboards. The effects of pressing pressure and the addition of kraft lignin on the physicomecanical properties of high density fiberboards of *Gynerium sagittatum* are evaluated. The raw material is pretreated in a steam explosion reactor at severity 4,1. The pressing temperature is set at 217°C. The pressing pressure is varied between 2 and 15 MPa. The most appropriate pressing pressure to obtain a good quality boards is 2 MPa. The values of properties at optimal conditions are: modulus of elasticity 6000 MPa, modulus of rupture 47 MPa, internal bond 1,50 MPa 24 h water absorption 25% and 24 h thickness swelling 15%.

Based on these operating conditions, the inclusion of lignin between 0 and 30% is evaluated. The addition of lignin does not significantly affect the mechanical performance of the fiberboards but improve its dimensional stability. The obtained values for 24 h water absorption and 24 h thickness

¹Grupo Pulpa y Papel, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

*Corresponding autor: jorge.velasquezj@upb.edu.co

Received: 18.09.2016 Accepted: 30.08.2017

swelling are 19% and 8,5% respectively, at a 20% of lignin addition.

Keywords: Forest products, high density fiberboard, natural adhesives, natural fibers, physico-mechanical properties.

INTRODUCCIÓN

Los tableros de fibras son un material de construcción que tiene alta resistencia y propiedades aislantes. En vía seca se fabrican mediante la aplicación de presión en caliente con la adición de adhesivos a las fibras lignocelulósicas, estos enlazantes son de origen sintético y están regidos por estrictas legislaciones ambientales (Poblete and Vargas 2006). Estos tableros presentan baja estabilidad dimensional en presencia de alta humedad, lo cual limita su uso o implica la adición de mayor cantidades de adhesivos (Poblete and Burgos 2010, Rangel *et al.* 2017, Suchsland and Woodson 1987).

En la actualidad se han realizado estudios para elaborar tableros a base de desechos biomásicos ricos en fibras (Zhang *et al.* 2015) modificando químicamente sus componentes y remplazando la adición de adhesivos por macromoléculas de origen natural (de Campos and Rocco-Lahr 2004). Uno de los tratamientos más exitosos consiste en someter el material a un proceso de tratamiento con vapor (steam explosión), el cual modifica fisicoquímicamente los materiales lignocelulósicos, segregando las fibras, despolimerizando y condensando la lignina e hidrolizando las hemicelulosas (Stelte 2013) mejorando la formación y la estabilidad dimensional del tablero sin necesidad de adhesivos exógenos (Zhang *et al.* 2015).

La inclusión de lignina ha sido otra modificación que se ha evaluado recientemente en la fabricación de tableros aglomerados sin aditivos sintéticos, esto debido a su naturaleza química y su función natural dentro de la planta. Los mejores resultados se han obtenido con adición de lignina kraft que ha sido evaluada como sustituto de las resinas urea/formaldehído (Anglès *et al.* 2001, Mancera *et al.* 2011).

El *Gynerium sagittatum* es una gramínea que presenta gran adaptabilidad ecológica lo cual la hace una fuente lignocelulósica ideal para la fabricación de tableros aglomerados sin aditivos sintéticos. En un trabajo previo (Diossa *et al.* 2014) se han optimizado los parámetros de fabricación a escala de laboratorio para obtener un tablero aglomerado de calidad comercial a partir de *Gynerium sagittatum* pretratado mediante *steam explosion*. Estos parámetros fueron: severidad (log Ro) 4,1 temperatura de prensado 217°C y presión de prensado 12 MPa. Las propiedades fisicomecánicas resultantes fueron 5691 MPa para el módulo de elasticidad (MOE); 35 MPa para el módulo de ruptura (MOR); 1,8 MPa para el enlace interno (IB); 8,57% para el hinchamiento en espesor (TS) y 25% para la absorción de agua (WA).

La presión de prensado tiene un papel importante ya que es la etapa de refinación del tablero que define el espesor y la densidad. Determinar cómo influye en las propiedades fisico-mecánicas de los tableros es de gran importancia para especificar una presión óptima que permita obtener el mejor tablero posible disminuyendo el consumo energético de esta etapa. En este trabajo se va a analizar el efecto sobre las propiedades fisicomecánicas, de la presión de prensado en un intervalo de 2 a 15 MPa así como el efecto del porcentaje de inclusión de lignina kraft exógena en la pulpa con porcentajes del 10 al 30 %.

MATERIALES Y MÉTODOS

Gynerium sagittatum

El *Gynerium sagittatum* fue obtenido de cultivos de Titiribí - Antioquia (Colombia). Para los ensayos el tiempo de maduración de la planta no fue un factor a considerar. 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 de longitud. Posteriormente el material se extiende y se deja secar al ambiente

por 24 horas. En la Tabla 1 se muestra la composición del material original y el pretratado con steam explosion a una severidad de 4,1 siguiendo las normas ASTM.

Tabla 1. Composición promedio para el *Gynerium sagittatum* con intervalo de confianza al 95 %.

Fracción	% Base seca <i>Gynerium sagittatum</i>	% Base seca <i>Gynerium sagittatum</i> log Ro=4,1
Humedad	8,88 ± 0,09	5,82 ± 0,23
Cenizas	2,18 ± 0,16	0,86 ± 0,14
Extraíbles Etanol/Tolueno	7,06 ± 0,22	21,64 ± 1,24
Extraíbles Acuosos	5,66 ± 0,68	2,12 ± 0,02
Lignina Klason	24,18 ± 1,08	33,27 ± 5,26
Holocelulosas	63,10 ± 1,98	42,97 ± 7,12
*Pentosas	24,16 ± 0,19	8,01 ± 0,08
Celulosa	38,95 ± 0,19	34,96 ± 0,08

*Las Pentosanas fueron determinadas con la norma TAPPI T223 cm-01 (Standard Specific Interest Group for this Test Method 2001).

Pretratamiento de la lignina

La lignina kraft fue suministrada por Lignotech Iberica S.A. Esta lignina fue purificada de acuerdo al método reportado por Lin (Lin 1992). Fue tratada con ácido sulfúrico al 1 % varias veces y lavada cuidadosamente con agua caliente para solubilizar los azúcares residuales. Después del lavado se dispone para secarse a temperatura ambiente para ser luego almacenada en bolsas plásticas para su uso como un adhesivo natural fenólico en los tableros aglomerados de *Gynerium sagittatum*. La Tabla 2 muestra la composición para las ligninas.

Tabla 2. Composición promedio para cada lignina con intervalo de confianza al 95 %.

Tipo de lignina	% Humedad	% Cenizas
Lignotech	13,47 ± 0,41	17,77 ± 1,43
Lignotech purificada	4,56 ± 0,06	2,58 ± 0,24

Pretratamiento con vapor (steam explosion)

Trozos de *Gynerium sagittatum* (100 gr base seca por lote) fueron pretratados con *steam explosion* en un reactor de 10 L, una descripción detallada del reactor se puede encontrar en la literatura (Quintana et al. 2009). Las muestras fueron pretratadas a una severidad de 4,1. La severidad es una variable que combina la temperatura del vapor y el tiempo de residencia (Overend et al. 1987) y se calcula mediante la ecuación (1).

$$Severidad = \log R_0 = \log \int_0^t e^{\left[\frac{T_{exp} - 100}{14,75} \right]} dt \quad (1)$$

Donde T_{exp} es la temperatura experimental en °C en el tiempo t en minutos. Esta condición de pretratamiento ha sido optimizada en estudios previos (Diossa et al. 2014). El material después de llegar a la severidad objetivo fue despresurizado en un recipiente de 100 L, lo que ayuda a desfibrar la pulpa. La pulpa fue filtrada y lavada con agua. En la Figura 1 se muestra la curva de calentamiento para lograr la severidad objetivo:

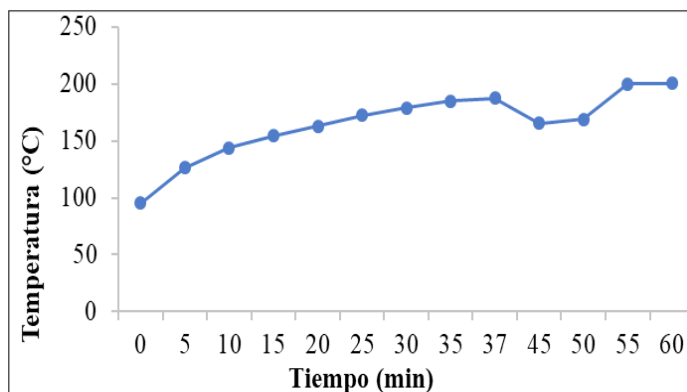


Figura 1. Curva de calentamiento para la Severidad 4,1.

Molienda

La pulpa pretratada se seca al ambiente y posteriormente se muele hasta pasar por malla de 4 mm en un molino de cuchillas a Retsch SM 100. Este procedimiento se realizó para incrementar el área de contacto entre las fibras (Velásquez *et al.* 2002).

Preparación de los tableros

El efecto de la presión de prensado se evalúa para el material pretratado a una severidad de 4,1 así como la influencia de la adición de lignina exógena a la mejor presión de prensado obtenida. Se siguió el siguiente procedimiento para cada serie de ensayos:

El material pretratado con *steam explosion* y molido, se secó al ambiente hasta una humedad alrededor del 7 %. Los tableros de prueba se prensaron usando una caja de formación de 150 mm de longitud y 50 mm de ancho. Se pesó la cantidad necesaria de pulpa molida para garantizar densidades aproximadas de 1100 kg/m³ y espesores de 3 mm. Se utilizó una prensa hidráulica de 30 toneladas con temporizador y control de temperatura la cual se precalienta antes de formar los tableros. La presión de prensado se varía entre 2 y 15 MPa, la temperatura de prensado se mantiene constante a 217 °C. Todos los tableros se prensan siguiendo el siguiente procedimiento de tres etapas (Anglès *et al.* 1999):

- El tablero se prensa durante 2 min a la presión deseada y a 217 °C.
- Se libera la presión y se deja respirar el tablero durante 1 min.
- El tablero se prensa de nuevo durante 2 min a la presión deseada y a 217 °C.

El material pretratado mediante *steam explosion* se mezcla con la lignina purificada para obtener composiciones de 10, 20 y 30 % en peso en lignina. Esto se hizo con el fin de evaluar el efecto de la inclusión de la lignina en el desempeño del tablero. La temperatura de prensado fue 217 °C, el procedimiento de prensado es el mismo descrito anteriormente. La presión de prensado se fija al valor óptimo hallado de los ensayos anteriores donde se buscó optimizar las propiedades de los tableros aglomerados.

Caracterización Físico Mecánica

Los tableros se caracterizan utilizando las respectivas normas estándar españolas y europeas (UNE-EN): para el hinchamiento en espesor (TS) y la absorción de agua (WA) según la norma BS EN 317:1993, para el módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) según la norma BS EN 310:1993 para el enlace interno según la norma BS EN 319: 1993 y para la densidad BS EN 323:1993. De acuerdo a las normas europeas los requerimientos estándar para estas propiedades en tableros de alta densidad son: densidad > 800kg/m³; MOR ≥ 40MPa; MOE ≥ 3000MPa; IB ≥ 0,7MPa; WA ≤ 30%

y $TS \leq 20\%$.

Diseño de Experimentos

Se propuso un ANOVA simple para estudiar la influencia de la presión de prensado, entre 2 y 15 MPa para un total de 5 puntos evaluados con 3 repeticiones. Las variables de respuesta fueron las propiedades físicas y mecánicas. El orden de los experimentos fue aleatorizado. Los resultados se analizan con STATGRAPHICS Centurion XVI.

La mejor presión de prensado fue determinada para los tableros de fibras sin aglomerantes de *Gynerium sagittatum* de acuerdo al ANOVA anterior. El efecto de la inclusión de lignina fue estudiado siguiendo un nuevo ANOVA con un solo factor (porcentaje de lignina) y cuatro niveles (0, 10, 20 y 30 %). Estos niveles de inclusión se seleccionan de acuerdo a la revisión de la literatura (Anglès et al. 2001, Anglès et al. 1999, Velásquez et al. 2003). Las variables de respuesta son las propiedades físicas y mecánicas de los tableros. Los resultados se analizan con STATGRAPHICS Centurion XVI.

Todas las hipótesis se probaron con un nivel de confianza del 95 %. En cada caso, los resultados de cada ANOVA fueron explicados por medio del gráfico de medias de la propiedad fisicomecánica de interés. Los gráficos de medias muestran un intervalo alrededor de cada media. Estos intervalos que se muestran se basan en el procedimiento de mínima diferencia significativa de Fisher (LSD). Se construyen de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se superponen 95 % de las veces. Cualquier par de intervalos que no se superpone verticalmente indica un par de medias con una diferencia estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 95 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Gynerium sagittatum

La Tabla 1 muestra la caracterización para el *Gynerium sagittatum* antes y después del pretratamiento con vapor a una severidad de 4,1. La condición de severidad seleccionada es el valor óptimo en estudios previos (Diossa et al. 2014), donde se logra un incremento del 36% en el contenido relativo de lignina y una disminución del 68% en el contenido relativo de pentosas, las cuales tienen una influencia significativa en la estabilidad dimensional de los tableros de fibras. Un incremento en la cantidad de lignina y una disminución en las pentosa incrementan la estabilidad dimensional del tablero (Stelte 2013).

ANOVA presión de prensado

Los resultados de las propiedades fisicomecánicas de los tableros de fibras se muestran en la Tabla 3. El factor experimental se evalúa en cinco niveles: 2; 5,25; 8,5; 11 y 15 MPa.

Tabla 3. Resultados propiedades físico mecánicas para el ANOVA para la presión de prensado.

Ensayo	Pp (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	IB (MPa)	WA (%)	TS (%)	Densidad (g/mL)
1	8,5	5540	34,75	1,28	18,26	15,21	1,15
2	11,75	7259	53,00	0,87	22,40	16,33	1,22
3	11,75	8366	44,97	1,03	18,46	15,57	1,24
4	2	5538	38,63	0,71	25,03	17,47	1,10
5	15	7301	62,80	0,68	17,17	17,41	1,25
6	15	7939	45,38	0,95	16,48	15,16	1,27
7	5,25	5950	49,86	1,80	20,70	12,41	1,15
8	5,25	9077	56,45	2,68	31,27	12,50	1,15
9	2	6094	53,70	1,90	22,39	17,53	1,09
10	5,25	5400	44,55	0,64	22,91	13,41	1,12
11	11,75	8665	56,42	0,82	24,56	11,03	1,23
12	8,5	7669	59,19	1,97	19,23	16,92	1,20
13	8,5	7990	60,52	0,73	19,82	8,73	1,20
14	2	6385	49,69	1,92	28,03	12,38	1,06
15	15	9847	53,46	0,31	21,55	15,38	1,31

Densidad

Se determina que la presión de prensado tiene una influencia estadísticamente significativa en la densidad como se muestra en la Figura 2a, donde para todos los niveles de presión de prensado los valores de densidad no se solapan lo que indica un aumento de la densidad con un aumento en la presión de prensado. Para los datos de densidad versus presión de prensado se ajusta una línea recta. Un gráfico de este ajuste se muestra en la Figura 3. Claramente a menor presión de prensado se tiene una menor densidad de los tableros. Esto se debe a que una mayor presión produce una disminución en la porosidad del tablero ya que las fibras tienen más puntos de unión. Se debe verificar que la menor densidad no afecte las propiedades fisicomecánicas, pues sería deseable un tablero a la menor presión de prensado posible ya que esto significaría una reducción en los costos de producción.

Módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR)

El MOE y el MOR son propiedades que indican el desempeño de las propiedades mecánicas de los tableros de fibras. En la gráfica de medias para estas propiedades en la Figura 2b y Figura 2c es evidente que no hay una diferencia estadísticamente significativa para el MOR frente a los diferentes niveles de presión de prensado evaluados y para el MOE, la cercanía de los intervalos LSD para los diferentes niveles de presión muestran que las diferencias que existen son muy pequeñas solapándose la mayoría de los intervalos. Esto indica que al variar la presión de prensado no se afectan las propiedades significativamente en el intervalo estudiado.

Otros estudios evidencian que la presión de prensado tiene un efecto sinérgico junto con la temperatura de prensado y el pretratamiento. Salvadó *et al.* (2003) observó la influencia de la presión en el desempeño de los tableros de fibras sin aglomerantes de *Miscanthus sinensis* pretratado con *steam explosion* y determinó que el valor óptimo de presión de prensado fue 12 MPa y la temperatura de prensado 220°C. Obtuvo valores de 7630 MPa y 61 MPa para el MOE y MOR respectivamente.

Otro caso es la investigación de Quintana *et al.* (2009), donde trabajó con una presión de prensado de 14 MPa y temperatura de prensado de 200°C para fabricar tableros de fibras sin aglomerantes a

partir de raquis de banano pretratada con *steam explosion*. Este trabajo reportó valores de MOE y MOR de 3361,95 MPa y 22,30 MPa respectivamente.

Teniendo en cuenta lo anterior, se determinó que la presión de prensado más adecuada para la fabricación de tableros de fibras sin aglomerantes de *Gynerium sagittatum* es 2 MPa, la cual es suficiente para dar buenas propiedades mecánicas a los tableros de fibras, además de reducir los costos de fabricación. Los valores obtenidos para el MOE y MOR para esta presión de prensado fueron 6000 MPa y 47 MPa, respectivamente. Estos valores superan los estándares y trabajando a presiones mucho más bajas que las reportadas por Salvadó y Quintana.

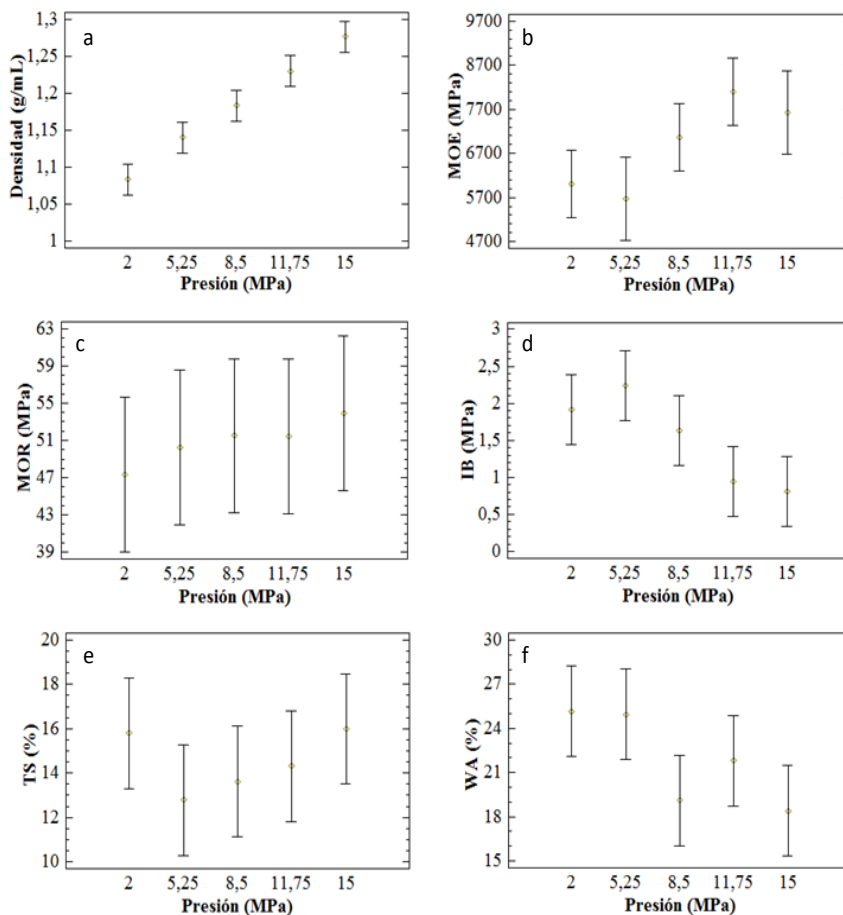


Figura 2. Medias e intervalos al 95 % de LSD para las propiedades físico-mecánicas en función de la presión de prensado: a. densidad, b. MOE, c. MOR, d. IB, e. TS, f. WA.

Enlace interno (IB)

La presión de prensado tiene influencia estadísticamente significativa sobre el IB, como se puede evidenciar en la Figura 2d. Se observan dos grupos claramente diferenciados a una presión de 8,5 MPa. Hay una disminución del IB a partir de 5,25 MPa lo que puede indicar que a mayores presiones se deterioran los enlaces intrafibrilares, este comportamiento se reportó anteriormente (Salvadó *et al.* 2003) con *Miscanthus sinensis*.

Partiendo del hecho de que las altas presiones disminuyen el IB, se determina que la presión de prensado adecuada es 2 MPa, el valor medio de esta propiedad es 1,51 MPa que es mayor que la fijada por la norma.

Absorción de agua (WA) e hinchamiento en espesor (TS)

La WA y TS son propiedades físicas que muestran la estabilidad dimensional de los tableros de fibras. Estas propiedades dan una idea de cómo los tableros se comportan en condiciones de alta humedad. Esto es de gran importancia por sus posibles usos en el exterior. Los gráficos para WA y TS se muestran en la Figura 2e y Figura 2f donde el solapamiento de los intervalos es confirmado en los rangos evaluados de presión de prensado, donde las medias no son estadísticamente diferentes para cada valor de presión.

Hashim *et al.* (2011) utilizó troncos de palma de aceite como materia prima para obtener tableros de fibras sin aglutinantes, obtuvo valores de 60 y 20% para WA y TS respectivamente con una temperatura de prensado de 200°C y presión de prensado de 5 MPa. Los tableros de fibras sin aglutinantes a partir de *Gynerium sagittatum* son una opción adecuada de materia prima ya que tienen un mejor desempeño de las propiedades evaluadas. Es posible trabajar a presiones de prensado más bajas, lo que disminuye los costes de fabricación. Se obtuvieron valores de 25 y 15% de WA y TS, respectivamente, que están dentro del intervalo requerido por la normativa vigente.

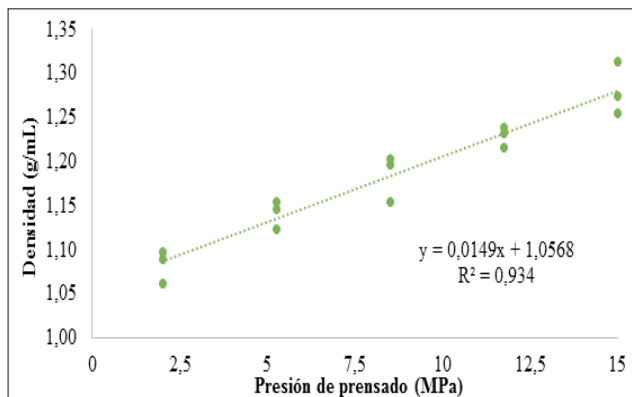


Figura 3. Ajuste lineal para la densidad en función de la presión de presado.

ANOVA Inclusión de lignina purificada

Los resultados del diseño de experimentos se muestran en la Tabla 4. Un análisis de varianza se llevó a cabo para cada una de las variables de respuesta. Todas las pruebas de hipótesis se llevaron a cabo en un nivel de confianza de 95%.

Tabla 4. Resultado Propiedades físico mecánicas del diseño de experimentos inclusión de lignina.

Ensayo	% Lignina Adicionada	MOE (MPa)	MOR (MPa)	IB(MPa)	WA (%)	TS (%)	Densidad (g/mL)
1	20	5276	41,65	2,12	18,34	3,43	1,13
2	0	5743	47,67	0,96	35,76	16,55	1,14
3	10	5705	47,79	1,91	28,37	9,32	1,07
4	30	7116	47,75	0,43	18,09	4,68	1,18
5	20	5754	35,73	1,36	14,86	1,27	1,19
6	0	5227	39,63	1,42	39,81	19,80	1,12
7	0	5440	44,22	1,38	31,97	17,12	1,14
8	10	5571	47,17	1,65	31,30	10,61	1,10
9	10	4823	32,45	2,80	37,57	18,73	1,09
10	30	5635	39,98	0,82	17,54	0,14	1,17
11	20	6358	44,87	1,22	25,41	21,18	1,14
12	30	5983	33,18	1,72	23,32	0,65	1,14

Pretratamiento de la lignina

La lignina utilizada para evaluar las sustituciones parciales con la pulpa pretratada de tableros aglomerados fue purificada y en la Tabla 2 se evidencia que el porcentaje de cenizas (material inorgánico) disminuyó un 85% lo que indica que se retiraron las trazas de sales y azúcares (hemicelulosas) que podría presentar. Es importante eliminar el material inorgánico de la lignina ya que son cargas que no reaccionan además de ser higroscópicas (Betancur *et al.* 2009) lo que afecta el desempeño de la lignina en esta aplicación.

Densidad

Hay una relación estadísticamente significativa entre la densidad y el porcentaje de inclusión de lignina purificada como se puede ver en la Figura 4a. Se observa que no se solapan entre algunos de los puntos evaluados lo que nos indica un cambio significativo en esta propiedad. Lo primero a destacar es la disminución de la densidad con la sustitución de 10% de lignina purificada en el tablero, este comportamiento puede deberse a la misma sustitución y a las características morfológicas de la misma lignina la cual al ser un polvillo y no está compuesta por fibras afecta directamente la densidad de estos tableros.

Para compensar este cambio en la densidad se observa en la Figura 4a que fue necesario realizar una sustitución del 20% de lignina, también se observa que al llegar al 30% de sustitución de pulpa por lignina la densidad aumenta levemente. También hay que tener en cuenta que estos cambios de densidad entre puntos no son amplios ya que la mayor diferencia de densidad en promedio es de 0,12 g/mL.

Módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR)

Las gráficas para MOR y MOE se muestran en la Figura 4b y Figura 4c. Para el MOR y MOE se puede observar que todos los intervalos LSD se solapan, indicando que no hay una diferencia estadísticamente significativa de estas propiedades en los diferentes niveles de presión. Aún así los valores obtenidos son superiores a los reportados como límites aceptables en las normas.

En la literatura se reporta (Mancera *et al.* 2012) una evaluación de la incorporación de lignina purificada a tableros de fibras producidos a partir de residuos agrícolas (*Vitis vinífera*), se evidencia un aumento en las propiedades físicas con el aumento de la lignina incluida en la formación de los

tableros, obteniendo valores superiores a 6000 MPa para el MOE y 50 MPa para el MOR. Aunque en el caso del *Gynerium sagittatum* la adición de lignina no haya mejorado el MOR y el MOE, los tableros obtenidos tienen propiedades similares a las reportadas para *Vitis vinifera*.

Enlace interno (IB)

El porcentaje de adición de lignina purificada no tiene una influencia estadísticamente significativa sobre el IB, como se puede evidenciar en la Figura 4d en donde los intervalos LSD se solapan para los diferentes niveles evaluados. El valor promedio obtenido para el IB es 1,48 MPa, este valor es superior a los valores aceptables para los tableros de alta densidad (0,75MPa).

Nasir *et al.* (2013) evaluó la inclusión de lignina Organosolv en fibras pretratadas enzimáticamente obteniendo propiedades físicas similares a las obtenidas con tableros de fibras comerciales preparados con resinas comerciales. El autor reporta un IB de 0,75 MPa para una adición del 15% de lignina.

Westin *et al.* (2001) trabajo adicionando lignina kraft a astillas de madera para la formación en húmedo de tableros de fibras. Evaluó el potencial de la lignina como un aditivo, donde evidenció una mejora en las propiedades físicas y dimensionales de los tableros prensados en caliente. Obtuvo valores de 0,8 MPa para el IB.

A pesar de que la lignina no tiene influencia en el IB de los tableros hechos con *Gynerium sagittatum*, los valores obtenidos para esta propiedad son claramente superiores a los reportados para otras materias primas con la inclusión de lignina.

Absorción de agua (WA) e Hinchamiento en espesor (TS)

Las gráficas para WA y TS se muestran en la Figura 4e y Figura 4f. Para la WA se puede observar que hay un intervalo donde no se solapa verticalmente las medias de los niveles a analizar este es entre 10 y 20% de inclusión de lignina, se puede decir que a partir de este valor se presenta una diferencia estadísticamente significativa en el comportamiento de esta propiedad con la adición de lignina. En la Figura 4e se observa que se disminuye la WA con la incorporación de lignina. La incorporación de 20% de lignina resulta en una disminución del 10% en la WA.

Los tableros aglomerados al ser fabricados a partir de materiales lignocelulósicos absorben agua debido a la formación de puentes de hidrogeno entre el agua y los grupos presentes en la celulosa y poliosas presentes en el material (Rowell *et al.* 1976). El carácter no polar de la lignina crea una capa hidrofóbica la cual repele los enlaces de puentes de hidrógeno reduciendo la absorción de agua.

El hinchamiento en espesor ocurre cuando la pared del material lignocelulósico se llena de agua. En la Figura 4f se aprecia claramente que solo entre 10 y 20% de inclusión de lignina hay una diferencia estadísticamente significativa lo cual se traduce en la disminución de TS con el aumento de la inclusión de lignina. Una inclusión del 20% de lignina es la apropiada para mejorar el hinchamiento en espesor de los tableros lo que indica que esta proporción mejora las propiedades físicas del tablero igual que la absorción de agua.

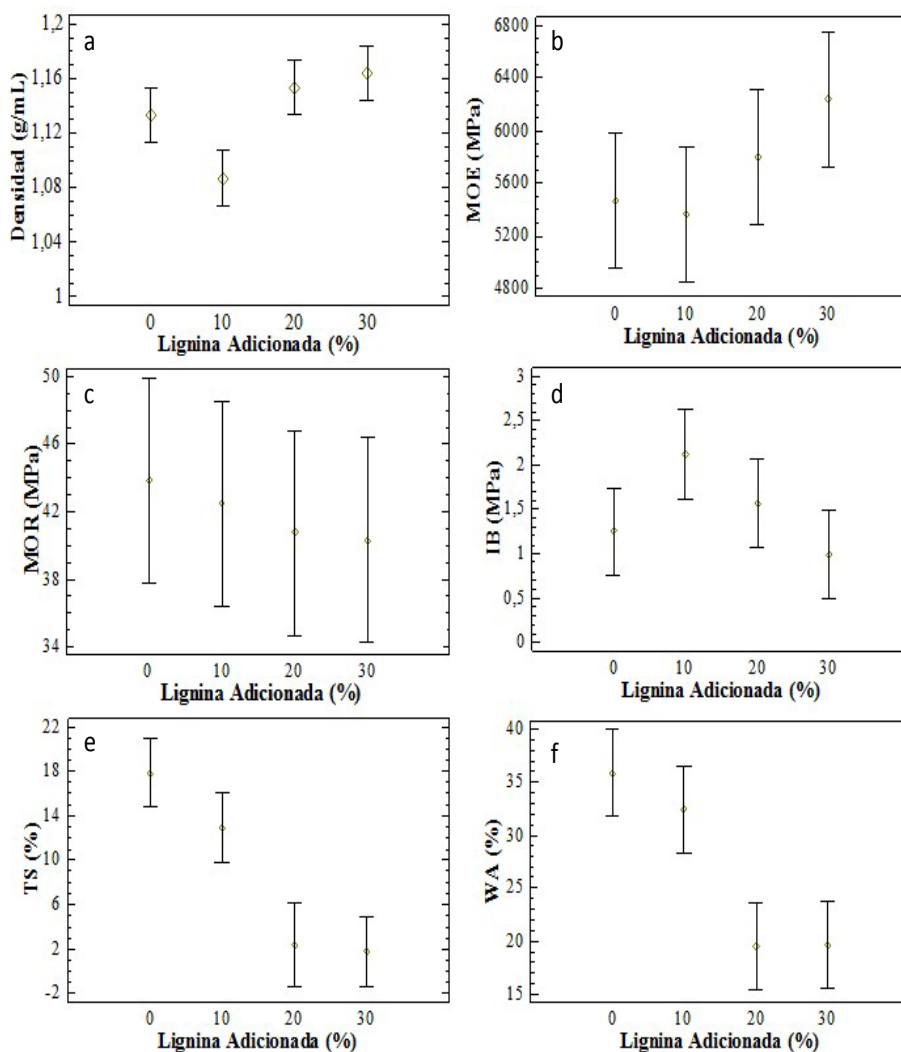


Figura 4. Medias e intervalos al 95,0 % de LSD para las propiedades físico-mecánicas en función de la inclusión de lignina: a. densidad, b. MOE, c. MOR, d. IB, e. TS, f. WA.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron las condiciones óptimas para la presión de prensado en la fabricación de un tablero de fibras de calidad comercial sin aglomerante a partir de *Gynerium sagittatum*. La presión de prensado encontrada fue 2 MPa lo que resulta en una densidad menor sin afectar el rendimiento de las propiedades físicas y mecánicas del tablero.

Aunque el análisis ANOVA muestra que no existe un efecto estadísticamente significativo de la presión sobre la WA, el criterio de decisión está muy cerca del límite de decisión por lo cual se recomienda hacer más experimentación para confirmar estos resultados. Por otra parte, para el efecto de la presión sobre el MOE, el análisis ANOVA indica que sí existe un efecto significativo, en este caso también el criterio de decisión está muy cerca del límite y se recomienda hacer más experimentación

para confirmar los resultados.

Se investigó el efecto de la adición de lignina a las pulpas pretratadas de *Gynerium sagittatum* para determinar el efecto en las propiedades fisicomecánicas de los tableros y determinar la viabilidad del uso de lignina kraft como una alternativa a los adhesivos sintéticos para tableros aglomerados. Se determinó que los tableros preparados con inclusión de lignina no presentaron un cambio significativo en sus propiedades mecánicas MOE, MOR e IB sin embargo si jugó un papel fundamental en las propiedades que definen la estabilidad dimensional del tablero WA y TS donde con una inclusión del 20% se logró una disminución de aproximadamente 10% en ambas propiedades dando como resultado un tablero con buenas propiedades mecánicas y mejor resistencia a condiciones húmedas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Pontificia Bolivariana (Medellín-Colombia) y al programa joven investigador de COLCIENCIAS convocatoria 567 por el apoyo financiero. El grupo de investigación Pulpa y Papel de la Facultad de Ingeniería Química por proporcionar las facilidades para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

Anglès, M.; Ferrando, F.; Farriol, X.; Salvadó, J. 2001. Suitability of steam exploded residual softwood for the production of binderless panels. Effect of the pre-treatment severity and lignin addition. *Biomass and Bioenergy* 21(3):211-224.

Anglès, M.N.; Reguant, J.; Montane, D.; Ferrando, F.; Farriol, X.; Salvado, J. 1999. Binderless composites from pretreated residual softwood. *Journal of Applied Polymer Science* 73(12):2485-2491.

Betancur, M.; Bonelli, P. R.; Velásquez, J.A.; Cukierman, A. L. 2009. Potentiality of lignin from the Kraft pulping process for removal of trace nickel from wastewater: effect of demineralisation. *Bioresource Technology* 100(3):1130-1137.

British Standards Institution. BSI. 1993. Particleboards and fibreboards- Determination of swelling in thickness after immersion in water. BS EN 317:1993.

British Standards Institution. BSI. 1993. Particleboards and fibreboards - Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. BS EN 319: 1993.

British Standards Institution. BSI. 1993. Wood-based panels - Determination of density. BS EN 323:1993.

British Standards Institution. BSI. 1993. Wood-based panels - Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. BS EN 310:1993.

De Campos, C.I.; Rocco-Lahr, F.A. 2004. Caracterización del MDF producido a partir de Eucalipto y adhesivo Poliuretano natural. *Maderas- Cienc Tecnol* 6(1): 73-84.

Diossa, G.; Velásquez, J.; Quintana, G. 2014. Binderless fiberboards from *Gynerium Sagittatum*. *Revista Investigaciones Aplicadas* 8(2): 101-112.

Hashim, R.; Said, N.; Lamaming, J.; Baskaran, M.; Sulaiman, O.; Sato, M.; Sugimoto, T. 2011. Influence of press temperature on the properties of binderless particleboard made from oil palm trunk. *Materials and Design* 32(5): 2520-2525.

- Lin, S.Y. 1992.** Commercial spent pulping liquors. In *Methods in lignin chemistry*. pp. 75-80. Springer.
- Mancera, C.; El Mansouri, N.E.; Pelach, M.A.; Francese, F.; Salvado, J. 2012.** Feasibility of incorporating treated lignins in fiberboards made from agricultural waste. *Waste Management* 32(10): 1962-1967.
- Mancera, C.; El Mansouri, N.E.; Vilaseca, F.; Ferrando, F.; Salvado, J. 2011.** The effect of lignin as a natural adhesive on the physico-mechanical properties of vitis vinifera fiberboards. *BioResources* 6: 2851-2860.
- Nasir, M.; Gupta, A.; Beg, M. D. H.; Chua, G. K.; Kumar, A. 2013.** Fabrication of medium density fibreboard from enzyme treated rubber wood (*Hevea brasiliensis*) fibre and modified organosolv lignin. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 44: 99-104.
- Overend, R. P.; Chornet, E.; Gascoigne, J.A. 1987.** Fractionation of Lignocellulosics by Steam-Aqueous Pretreatments [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 321: 523-536.
- Poblete, H.; Burgos O, R. 2010.** *Eucalyptus nitens* como materia prima para tableros de partículas. *Maderas-Cienc Tecnol* 12(1): 25-35.
- Poblete, H.; Vargas, R. 2006.** Relacion entre densidad y propiedades de tableros HDF producidos por un proceso seco. *Maderas-Cienc Tecnol* 8(3): 169-182.
- Quintana, G.; Velásquez, J.; Betancourt, S.; Gañán, P. 2009.** Binderless fiberboard from steam exploded banana bunch. *Industrial Crops and Products* 29: 60-66.
- Rangel, L.; Moreno, P.; Trejo, S.; Valero, S. 2017.** Propiedades de tableros aglomerados de partículas fabricados con madera de *Eucalyptus urophylla*. *Maderas-Cienc Tecnol* 19(3):373 - 386.
- Rowell, R. M.; Gutzmer, D. I.; Sachs, I. B.; Kinney, R. E. 1976.** Effects of alkylene oxide treatments on dimensional stability of wood. *Wood Science* 9(1): 51-54.
- Salvadó, J.; Velásquez, J.; Ferrando, F. 2003.** Binderless fiberboard from steam exploded Miscanthus Sinensis: Optimization of pressing and pretreatment conditions. *Wood Science and Technology* 37: 279-286.
- Standard Specific Interest Group for this Test Method. 2001.** Pentosans in wood and pulp. *Connect*, 1-5.
- Stelte, W. 2013.** Steam explosion for biomass pre-treatment. Resultat Kontrakt (RK) Report. *Danish Technological Institute*. p. 15. Denmark.
- Suchsland, O.; Woodson, G. E. 1990.** *Fiberboard Manufacturing Practices in the United States*. Forest Products Research Society. pp. 263. United States of America. ISBN 0-935018-50-6.
- Velásquez, J.; Ferrando, F.; Salvadó, J. 2003.** Effects of kraft lignin addition in the production of binderless fiberboard from steam exploded Miscanthus sinensis. *Industrial Crops and Products* 18(1): 17-23.
- Velásquez, J. A.; Ferrando, F.; Salvadó, J. 2002.** Binderless fiberboard from steam exploded Miscanthus sinensis : The effect of a grinding process. *Holz Als Roh- Und Werkstoff* 60: 297-302.
- Westin, M.; Simonson, R.; Östman, B. 2001.** Kraft lignin wood fiberboards - The effect of kraft lignin addition to wood chips or board pulp prior to fiberboard production. *Holz Als Roh- Und Werkstoff* 58(6): 393-400.

Zhang, D.; Zhang, A.; Xue, L. 2015. A review of preparation of binderless fiberboards and its self-bonding mechanism. *Wood Science and Technology* 49(4): 661-679.