

INCIDENCIA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA ZONA DE SATURACIÓN DE LAS FIBRAS SOBRE EL EFECTO DE ALGUNOS IGNÍFUGOS, CONCENTRACIONES Y MÉTODOS DE IGNIFUGACIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA

Palabras clave: Contenido de humedad, zona de saturación de las fibras, ignífugos, propiedades mecánicas.

Key words: Moisture content, fibre saturation area, fireproofing agents, mechanical properties.

Sandra Liliana Castañeda Garzón²
William Klinger Brahan³
Jhon Jairo Sánchez Correa²

RESUMEN

Con el fin de solucionar algunos interrogantes que surgieron a partir de experiencias anteriores en el área de la tecnología de la madera, esta investigación tiene como objetivo establecer las correlaciones entre los efectos que puedan generar las sustancias ignífugas y los métodos de aplicación sobre las propiedades mecánicas de la madera así como el efecto del contenido de humedad en la zona de saturación de las fibras. Se identificó tanto el grado de incidencia de los tratamientos de ignifugación, como el comportamiento de especies pertenecientes al mismo o diferente grupo según la humedad de saturación (Klinger 1994b), notando que la respuesta de las mismas está condicionada por el método de ignifugación empleado. Se encontró que las especies *Simarouba amara* y *Brosimum utile* pertenecientes al mismo grupo de CHzsf (B) presentan comportamientos similares ante la aplicación de ignífugos, contrario

a *Virola reidii* y *Castilla elastica* (grupo C) que difieren en cuanto a la incidencia de los mismos en la resistencia mecánica. Las especies *Spondias mombin* y *Hernandia didymantha* presentan comportamientos análogos a pesar de pertenecer a dos grupos diferentes (grupos A y D). Los valores de resistencia mecánica hallados permitieron ratificar la teoría según la cual, a mayor contenido de humedad en la zona de saturación de fibras es menor la resistencia a esfuerzos mecánicos (Delgado 1975). No obstante, la especie *Spondias mombin*, presentó los menores valores de resistencia. Finalmente, se observó que tanto el ignífugo, como la concentración y el método de ignifugación inciden de manera diferencial en la resistencia mecánica de las especies, aumentándola o disminuyéndola significativamente. Es indiscutible que la respuesta está condicionada por el grupo de CHzsf al cual pertenezca.

- 1 Investigación financiada por el Centro de Investigaciones y Desarrollo científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas
- 2 Ingenieros Forestales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Auxiliares de Investigación del área de Tecnología de Maderas, con intereses en otras áreas profesionales como Silvicultura y Entomología Forestal respectivamente. Actualmente se desempeñan como Consultores del Sistema SICA-AFIC y SICA-GEO para La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia salimathice@hotmail.com, jeanbap563@hotmail.com.
- 3 Ingeniero Forestal M.Sc. en Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Director del Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico. Docente Investigador Asociado a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Director del grupo de investigación en Procesos y Productos del Bosque-PROPROBOS: wklinger@iiap.com

ABSTRACT

In order to solve some of the problems arisen from previous experiences in wood technology, this research have proposed to correlate the effects generated by fireproofing agents, its application methods and the mechanical properties of wood, as well as the incidence of the moisture content on the fibre saturation area. We identified that both, the level of incidence of fireproofing treatments and the response of the species belonging to the same or different saturation moisture group depend on the fireproofing treatment used. Results have shown that *Simarouba amara* and *Brosimum utile*, both belonging to the same CHzsf (B) group, exhibit similar responses to the application of fireproofing agents, in contrast to *Virola reidii* and *Castilla elastica*. These species differ in the mechanical properties. Although the species *Spondias mombin* and *Hernandia didymantha* belong to different groups (A & D), they have shown similar behaviours. The strength resistance values supported the theory that the higher moisture content on the fibre saturation area, the lower mechanical strength. Finally, the fireproofing agent, its concentration and the fireproofing treatment affect differently the species mechanical strength, either reducing or increasing it, in a statistically significant manner. Undoubtedly, the answer is conditioned by the CHzsf group.

INTRODUCCIÓN

La dinámica poblacional, la cultura y la necesidad de suplir las necesidades primarias de vivienda, han permitido que las comunidades del Pacífico colombiano, identificadas con los recursos naturales que se encuentran en esta región, empleen tradicionalmente la madera como elemento estructural y la derivación de sus subproductos como fuente de otros recursos económicos y soporte de vida. Así, los avances tecnológicos y el interés de diversas

instituciones que han dedicado sus esfuerzos a la búsqueda de respuestas a innumerables interrogantes existentes en el comportamiento mecánico y de preservación de la madera, han motivado el fomento de la investigación con la intención de maximizar los recursos y mejorar la calidad de los productos que se obtienen de los mismos.

El conocimiento adquirido a través del tiempo ha demostrado que la madera es un material de construcción que conserva por mayor tiempo sus propiedades estructurales frente a la acción del fuego si se le compara con otros materiales usados corrientemente en estructuras, sin embargo, es un material combustible por lo que se hace absolutamente inocultable su desventaja en este sentido. Las investigaciones desarrolladas por el Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal de la Universidad Distrital han logrado importantes avances en la disminución de la combustibilidad de algunas maderas con la aplicación de sustancias ignífugas. Pero así como la aplicación de estas sustancias pueden retardar la acción del fuego, también podrían tener incidencia sobre las propiedades mecánicas de la madera.

Al respecto de los efectos que pueden tener los tratamientos ignífugos sobre las propiedades mecánicas de la madera existen pocos registros, pues desde el punto de vista teórico, las variaciones en la resistencia se atribuyen principalmente a la especie, tamaño, contenido de humedad de las piezas, medio de impregnación (temperatura y presión) y la duración del periodo de presión, más no al tipo de sales aplicadas (Hunt G. 1962). De otra parte y de acuerdo a las investigaciones desarrolladas en el laboratorio de Tecnología de Maderas de la Universidad Distrital de Bogotá, se ha determinado la importancia de considerar como variable el contenido de humedad en la zona de saturación de las fibras (CHzsf) en el comportamiento de la madera al ser tratada con sales

ignífugos, “puesto que la variación de este contenido en las diferentes especies puede influir sobre las propiedades físicas y mecánicas” (Klinger 1994b). Siendo esta la motivación del presente estudio.

Los antecedentes muestran el logro de muy buenos resultados en la reducción de la combustibilidad de algunas maderas con la aplicación de cloruro de zinc y sulfato de amonio, razón por la cual se emplearon como tratamientos. Con el objetivo de evaluar la incidencia de cada tratamiento sobre la resistencia mecánica de la madera en cuanto a las propiedades de cizallamiento, compresión paralela, compresión perpendicular y flexión estática; además de la influencia que puede tener el contenido de humedad en la zona de saturación de las fibras sobre los resultados obtenidos. Los ensayos y el manejo estadístico de los datos se hacen con respeto absoluto por las normas existentes en la literatura panamericana y colombiana.

Con base en lo anterior, y de acuerdo con los criterios de importancia ecológica y económica que tienen en el país y en especial en el Pacífico Colombiano, la amplia utilización en productos maderables, y lo más importante, su representación en los diferentes grupos según contenido de humedad en la zona de saturación de las fibras propuestos por Klinger (1994); las especies forestales *Simarouba amara* Aublet (palo perico), *Virola reidii* Little (nuánamo), *Brosimum utile* (Kunth) Pittier (lechero), *Hernandia didymantha* Donn.Sm. (bonso), *Castilla elastica* Sessé (caucho negro) y *Spondias mombin* L. (hobo) fueron escogidas para ser empleadas.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

El proceso metodológico que siguió la investigación constó de una serie de etapas que dieron forma al marco general del mismo. Básicamente estas etapas se pueden denominar de la siguiente manera.

TOMA DE MUESTRAS Y ELABORACIÓN DE LA PROBETERÍA

El proceso se llevó a cabo con base en la Normas COPANT 458 y bajo los criterios del Manual de clasificación visual para madera estructural de la Junta de Acuerdo de Cartagena (JUNAC) (1984), obteniendo finalmente según la disponibilidad de material y los requerimientos específicos probetas de de 2.5*2.5*10 cm (compresión paralela), 5*5*15 cm (compresión perpendicular), 2.5*2.5*15 cm (flexión), 5*5*6.5cm (cizallamiento) y 5*5*10 cm (densidad). Para trabajar con 20 probetas por ensayo/ especie y tratamiento.

CODIFICACIÓN DE LA PROBETERÍA

La probetería se codificó por símbolos así: número de especie / siglas del ensayo al que pertenece la probeta / número de la probeta / siglas del tratamiento que se le aplica. Así: (1CPP15) corresponde a la probeta número 15 del ensayo de compresión perpendicular de la especie forestal número 1 (*Simarouba amara* Aublet). Cuando al final del código de la probeta no se presenta una sigla de tratamiento se entiende como probeta correspondiente a las pruebas del tratamiento testigo. Los significados de las siglas se especifican en la Tabla 1.

Tabla 1. Codificación de la probetería

Símbolo	Nombre
1	Especie forestal <i>Simarouba amara</i> Aublet
2	Especie forestal <i>Virola reidii</i> Little
3	Especie forestal <i>Brosimum utile</i> (Kunth) Pittier
4	Especie forestal <i>Hernandia didymantha</i> Donn.Sm.
5	Especie forestal <i>Castilla elastica</i> Sessé
6	Especie forestal <i>Spondias mombin</i> L.
CII	Ensayo compresión paralela a la fibra
CPP	Ensayo compresión perpendicular a la fibra
CZP	Ensayo cizallamiento
F	Ensayo flexión estática
D	Prueba densidad

CLIMATIZACIÓN DE LAS PROBETAS Y DETERMINACIÓN DEL CHZSF

Posteriormente, las probetas se climatizaron en un “clima normal” ($20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$ y $65\% \pm 2\%$ HR) y se determinó la densidad y el contenido de humedad en zona de saturación de fibras (CHZsf) para cada especie (Mét. tradicional). En la máquina universal de ensayos del Laboratorio de Maderas de la Universidad Distrital, se realizaron los ensayos de resistencia mecánica para las probetas testigo, siguiendo el procedimiento particular según las Normas COPANT.

Los resultados se sistematizaron, se registraron los tipos de fallas que presentaron cada una de las probetas y se procedió a calcular la *Resistencia Unitaria Máxima* (RUM) o *Esfuerzo en el Límite Proporcional*, la *Resistencia en el Límite Proporcional* (RLP) y el Módulo de Elasticidad (MOE) por medio de las fórmulas propuestas por Hoheisel (1968).

IGNIFUGACIÓN Y REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA

El proceso de ignifugación se realizó a través de dos métodos (inmersión y presión), dos químicos ignífugantes (sulfato de amonio y cloruro de zinc) y dos concentraciones de cada químico (5% y 10%). Las probetas no correspondientes al tratamiento testigo (480 por tratamiento), fueron separadas en 8 distintos tratamientos (resultantes de la combinación) codificados como se observa en la Tabla 2. Para esto se empleó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial $2*2*2+1$ (donde el término +1 es el testigo absoluto) (Véase Anexo A).

En consecuencia la probeta 2CII21 T1C1IN, corresponde a la especie 2, réplica número 21 de las probetas elaboradas para evaluar el comportamiento a la comprensión paralela después de ser ignifugadas con cloruro de zinc bajo la concentración del 5%, mediante el método de inmersión.

Tabla 2. Codificación de probetería para el proceso de ignifugación

Código	Nombre
T1	Ignifugación con cloruro de zinc
T2	Ignifugación con sulfato de amonio
C1	Concentración uno (5%)
C2	Concentración dos (10%)
VP	Presión
IN	Inmersión

Luego se prepararon las soluciones ignífugas al 5% y al 10% para cada químico. El procedimiento de ignifugación a presión se realizó en una autoclave y el de inmersión en canecas con la solución ignífuga. Una vez ignifugadas las probetas se procedió a realizar los ensayos de resistencia mecánica, con las mismas condiciones técnicas que para las pruebas del tratamiento testigo, para las probetas de cada tratamiento (480 por cada uno de ellos). Así al finalizar, se tenía completo el universo de datos requeridos para los objetivos del proyecto y se procedió finalmente al compendio y análisis de la información obtenida.

Para cada ensayo de resistencia en cada tratamiento se obtuvo un valor de resistencia por probeta que fue ajustado a un contenido de humedad del 12%, lo anterior con el fin de homologar las resistencias y trabajarlas a un mismo contenido de humedad hipotético. Con los valores de resistencia ajustados se obtuvieron los tres parámetros estadísticos que determinaron la validez o rechazo de los ensayos.

PASOS DE ANÁLISIS Y DE RESULTADOS

Con el análisis descriptivo se evaluó la respuesta de las especies en cada prueba mecánica bajo la aplicación de los tratamientos de ignifugación empleados; determinando poste-

riormente el efecto ejercido en la resistencia mecánica y las respectivas correlaciones entre los mismos. El análisis estadístico se hizo por medio de los programas SPSS y MINITAB; con el fin de determinar el tratamiento más apropiado en el proceso de ignifugación, y obtener los diagramas de efectos principales e interacciones.

Una vez cumplidos los criterios estadísticos de homocedasticidad, normalidad y aleatoriedad, se realizó el análisis de varianza (ANAVA) para el diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial $2 \times 2 \times 2 + 1$, con una probabilidad del 95 %, estableciendo por medio del Test de Tukey el efecto de los tratamientos por especie sobre cada una de las propiedades mecánicas. Paralelamente se elaboraron las gráficas de efectos principales y de interacciones para identificar el efecto de cada uno de los factores y las combinaciones, sobre las propiedades mecánicas entre maderas de los mismos y diferentes grupos según el contenido de humedad en zona de saturación de las fibras. Los resultados se organizaron de acuerdo al desarrollo de cada uno de los objetivos planteados en la investigación, concluyendo acerca de los resultados y complementando la línea de investigación que se ha desarrollado en el área de tecnología de maderas de la Universidad Distrital.

RESULTADOS

La investigación tuvo como resultado el análisis de cada uno de los factores que inciden en el comportamiento mecánico de la madera de las especies de estudio, junto con la determinación de los tratamientos más efectivos al reducir la combustibilidad de la madera y hacerla más resistente a nivel estructural. Partiendo de lo particular a lo general, el contenido de humedad en la zona de saturación de las fibras obtenido por especie es el siguiente (Tabla 3):

Tabla 3. Grupo según el contenido de humedad en zona de saturación de fibras (CHzsf) para las especies en estudio.

Especie	CHzsf %	Grupo según el CHzsf
<i>Simarouba amara</i> Aublet	29.81	B
<i>Viola reidii</i> Little	38.99	C
<i>Brosimum utile</i> (Kunth) Pittier	28.88	B
<i>Hernandia didymantha</i> Donn.Sm.	44.12	D
<i>Castilla elastica</i> Sessé	30.12	C
<i>Spondias mombin</i> L.	19.59	A

Una vez realizados los ensayos de compresión paralela, compresión perpendicular, cizallamiento y flexión estática, los resultados obtenidos para cada propiedad mecánica (Tto Testigo y Ttos de ignifugación) se consignan en las Tablas 4 y 5).

Tabla 4. Resultado de las propiedades mecánicas de compresión paralela y perpendicular, cizallamiento y flexión de las especies de estudio (Tto Testigo).

Propiedad mecánica	<i>Simarouba amara</i> Aublet	<i>Viola reidii</i> Little	<i>Brosimum utile</i> (Kunth) Pittier	<i>Hernandia didymantha</i> Donn.Sm.	<i>Castilla elastica</i> Sessé	<i>Spondias mombin</i> L.
Compresión Paralela máximo (kg/cm ²)	400,65	399,70	531,22	221,04	354,94	283,90
Compresión Perpendicular máximo (kg/cm ²)	77,78	70,42	108,49	35,39	71,26	62,98
Cizalladura máxima (kg/cm ²)	77,23	65,79	70,21	20,17	25,14	36,55
Flexión máxima kg/cm ²	544,53	468,79	816,23	234,01	306,52	242,53

Tabla 5. Resistencia máxima – RUM (kg/cm²) por tratamientos de ignifugación.

Especie	Tto	1	4	5	8	9	2	3	6	7
	PM	Testigo	T1C1VP	T1C2VP	T2C1VP	T2C2VP	T1C1IN	T1C2IN	T2C1IN	T2C2IN
<i>Simarouba amara</i> Aublet	CII	400,65	242,33	371,93	354,67	295,30	393,71	447,04	388,94	276,14
<i>Virola reidii</i> Little		399,07	217,82	294,35	313,36	282,41	355,55	749,80	390,07	286,47
<i>Brosimum utile</i> (Kunth) Pittier		531,33	284,91	475,86	461,43	442,61	478,80	674,48	483,69	434,25
<i>Hernandia didymantha</i> Donn.Sm.		221,04	150,16	208,42	222,21	152,56	237,70	662,32	299,49	261,57
<i>Castilla elastica</i> Sessé		354,94	197,42	298,45	292,21	236,45	353,99	*	384,15	95,40
<i>Spondias mombin</i> L.		283,90	116,04	260,92	249,77	256,95	248,38	*	376,60	*
Promedio		365,15	201,45	318,32	315,61	277,71	344,69	633,41	387,16	270,77
<i>Simarouba amara</i> Aublet	CPP	77,78	*	*	73,81	*	*	*	*	*
<i>Virola reidii</i> Little		70,42	36,32	41,44	34,43	45,47	40,35	58,39	64,00	66,74
<i>Brosimum utile</i> (Kunth) Pittier		108,49	50,01	58,18	53,75	62,69	72,07	66,37	76,91	103,48
<i>Hernandia didymantha</i> Donn.Sm.		35,39	24,80	27,68	37,79	37,75	24,97	*	48,11	46,23
<i>Castilla elastica</i> Sessé		71,26	*	*	58,43	*	*	*	*	*
<i>Spondias mombin</i> L.		62,98	57,88	64,77	61,43	60,61	79,37	73,15	91,20	81,50
Promedio		71,05	42,25	48,02	53,28	51,63	54,19	65,97	70,06	74,49
<i>Simarouba amara</i> Aublet	CZP	77,23	61,22	74,27	54,14	58,73	66,62	67,34	68,39	66,41
<i>Virola reidii</i> Little		65,79	38,37	73,27	48,78	62,06	50,22	56,30	63,48	72,64
<i>Brosimum utile</i> (Kunth) Pittier		70,21	*	*	*	*	*	*	*	*
<i>Hernandia didymantha</i> Donn.Sm.		20,17	32,88	37,66	36,32	46,12	37,83	42,08	43,82	39,22
<i>Castilla elastica</i> Sessé		25,14	*	*	34,83	*	*	*	*	60,45
<i>Spondias mombin</i> L.		36,55	64,87	71,11	27,34	57,43	74,00	71,41	61,77	80,66
Promedio		49,18	49,34	64,08	40,28	56,08	57,17	59,28	59,37	63,88
<i>Simarouba amara</i> Aublet	F	544,53	292,09	307,00	321,14	501,14	226,36	212,19	290,17	314,06
<i>Virola reidii</i> Little		468,79	*	*	413,28	*	*	*	384,57	*
<i>Brosimum utile</i> (Kunth) Pittier		816,23	386,64	416,04	*	437,05	494,88	432,01	520,67	464,35
<i>Hernandia didymantha</i> Donn.Sm.		234,01	197,46	248,40	258,43	256,71	177,53	176,41	240,72	252,89
<i>Castilla elastica</i> Sessé		306,52	240,71	*	297,67	280,04	299,74	285,35	454,27	329,48
<i>Spondias mombin</i> L.		242,53	309,63	346,21	391,88	364,56	*	*	457,65	523,58
Promedio		435,44	285,31	329,41	336,48	367,90	299,63	276,49	391,34	376,87

* Ensayo no realizado

Como se nota en la Tabla 4, la respuesta de las especies en la resistencia mecánica (Tto testigo) permite ratificar la teoría según la cual, a mayor CHzsf es menor la resistencia a esfuerzos mecánicos⁴. Notando que como se esperaba (a excepción de la especie *Spondias mombin* L), la resistencia máxima es mayor en el orden, grupo B (*Simarouba amara* Aublet, *Brosimum utile* (Kunth) Pittier) grupo C (*Virola reiddii* Little, *Castilla elastica* Sessé) y grupo D (*Hernandia didymantha* Donn.Sm). Lo anterior deja ver que es necesario investigar el porqué del comportamiento de la especie *Spondias mombin* L, que a pesar de ser del grupo con menor CHzsf presenta uno de los menores valores en cuanto a su resistencia mecánica. Con el objetivo de identificar de manera preliminar (análisis descriptivo) la respuesta de las especies ante la aplicación de ignífugos, se recopilieron los resultados de *Resistencia Unitaria Máxima* (kg/cm²) “RUM” por propiedad mecánica (Ver Tabla 5), identificando el comportamiento de las especies y estableciendo relaciones, como se describe a continuación. Las conclusiones de la investigación se hacen con base en el análisis estadístico, como soporte científico de la misma.

Luego de realizar el análisis descriptivo de la resistencia por propiedad mecánica y por especie, se obtuvieron los perfiles en los que se percibe el comportamiento de las mismas y la efectividad de los tratamientos empleados sobre la resistencia mecánica de la madera (véanse las gráficas de análisis estadístico). Al hacerlo, se notó que para la propiedad de compresión paralela, los tratamientos T2C1IN y T2C2IN inciden positivamente sobre la resistencia mecánica, contrario a la incidencia que en general el tratamiento T1C1VP tiene sobre la misma; aunque las especies independientemente respondan de manera distinta. En

esta propiedad las especies *Simarouba amara*, *Brosimum utile* y *Castilla elastica* exhiben comportamientos similares en cuanto al grado de incidencia entre tratamientos, en tanto que la respuesta de las especies *Virola reiddii*, *Hernandia didymantha* y *Spondias mombin* difiere, al presentar un incremento en su resistencia bajo el tratamiento T2C2IN.

Referente a la propiedad de compresión perpendicular, las especies en general exhiben una tendencia similar, en la que los tratamientos de ignifugación por inmersión favorecen la resistencia mecánica de la madera, mientras que los de presión la disminuyen. En este caso el tratamiento testigo para las especies *Hernandia didymantha* y *Spondias mombin*, se ubica en un punto medio de comparación, mientras que para las especies *Simarouba amara* y *Virola reiddii* resulta ser el tratamiento más efectivo; considerando claro está las diferencias entre las especies.

En cuanto a la propiedad de cizallamiento, las especies *Simarouba amara*, *Virola reiddii*, *Hernandia didymantha* y *Spondias mombin*, difieren en la respuesta a los tratamientos debido a que el testigo (punto de comparación) afecta de manera distinta la resistencia de la madera. En esta propiedad algunos tratamientos a presión (T1C2VP y T2C2VP) incrementan los valores de resistencia, rompiendo con la tendencia que se presentaba, en la cual los tratamientos de inmersión eran los que proveían los más altos valores de tenacidad mecánica. De todas maneras existe una predisposición a responder mejor bajo tratamientos de ignifugación por inmersión que por presión.

Finalmente, en la propiedad de cizallamiento para las especies *Simarouba amara* y *Bro-*

4 Delgado (1975), afirma: “Casi todas las propiedades mecánicas y elásticas de la madera varían inversamente con el contenido de humedad por debajo de la zona de saturación de las fibras”.

Tabla 6. Cuadro resumen del comportamiento mecánico de las especies ante la aplicación de tratamientos ignífugos.

Especie forestal	Grupo según CHzsf	Propiedad mecánica	Tto más efectivo *	Tto menos efectivo **	Observaciones
<i>Simarouba amara</i> Aublet	B	Compresión paralela (CII)	T1C2IN	T1C1VP	<ul style="list-style-type: none"> En general, los valores más bajos de resistencia a se presentaron en las probetas sometidas a Ttos de presión en (NH₄)₂SO₄ pareciendo la [] no ser un factor decisivo en la resistencia de las maderas de este grupo La sp presenta un comportamiento similar al de la sp <i>Simarouba amara</i> La especie sufre cambios mas drásticos en mínimos y máximos de resistencia conservando efectividad similar en Ttos Presenta un aumento de resistencia muy alto para el tratamiento T1C2IN Los menores valores se presentan en Ttos con una [] del 10%; puede que en maderas de este grupo la concentración sea, al contrario de lo que sucedía en el grupo B, la variable determinante de sus propiedades mecánicas
<i>Brosimum utile</i> (Kunth) Pittier	B		T1C2IN	T1C1VP	
<i>Virola reidii</i> Little	C		T1C2IN	T1C1VP	
<i>Castilla elastica</i> Sessé	C	Compresión perpendicular (CPP)	T1C2IN	T2C2IN	<ul style="list-style-type: none"> Al igual que <i>Virola reidii</i>, la sp presenta los menores valores de resistencia en Ttos de ignifugación por inmersión, aunque con ligeras variaciones La sp como es lógico presenta los menores valores de resistencia Tiene como particularidad que el valor testigo es uno de los menores valores de resistencia Contrario a lo esperado, la sp no presenta los mayores valores de resistencia en las diferentes pruebas La sp presenta las reducciones más bajas en resistencia a la CPP principalmente en los Ttos en los cuales se aplicó el ignífugo por presión El mayor valor de resistencia corresponde al testigo, los de inmersión presentan las menores reducciones y los de presión las mayores. El Tto testigo tiene uno de los menores valores, es decir, la mayoría de Ttos afectan de forma positiva la resistencia de esta madera.
<i>Hernandia didymantha</i> Donn.Sm	D		T1C2IN	T1C1VP	
<i>Spondias mombin</i> L	A		T2C1IN	T1C1VP	
<i>Brosimum utile</i> (Kunth) Pittier	B	Cizallamiento (CZP)	T	T1C1VP	<ul style="list-style-type: none"> La sp presenta las reducciones más bajas en resistencia a la CPP principalmente en los Ttos en los cuales se aplicó el ignífugo por presión El mayor valor de resistencia corresponde al testigo, los de inmersión presentan las menores reducciones y los de presión las mayores. El Tto testigo tiene uno de los menores valores, es decir, la mayoría de Ttos afectan de forma positiva la resistencia de esta madera. La sp presenta bajos valores medios de resistencia a CPP Se nota el alto valor del Tto T1C2VP que se ubica después del testigo como el de mayor resistencia No hay ningún Tto que incremente la resistencia de la madera El Tto T1C2VP presenta el mayor valor de resistencia, solo que esta vez por encima del testigo La sp presenta los menores valores de resistencia al corte El valor de resistencia del Testigo es el menor de todos los Ttos La mayoría de Ttos aumenta su resistencia
<i>Virola reidii</i> Little	C		T	T2C1VP	
<i>Hernandia didymantha</i> Donn.Sm	D		T2C1IN	T1C1VP	
<i>Spondias mombin</i> L	A	Flexión (F)	T2C1IN	T1C1VP	<ul style="list-style-type: none"> Exceptuando el Tto T2C2IN, las mayores resistencias luego del testigo se lograron por Ttos aplicados mediante el método de presión, hecho que se contrapone a la tendencia general de estos resultados Alta favorabilidad del Tto T2C2VP Ninguno de los tratamientos aumenta los valores de resistencia Conserva la tendencia (Ttos de inmersión son más favorables) Muestra dos Ttos que incrementan su resistencia: T2C1IN y T2C2IN El testigo tiene uno de los valores más bajos de resistencia de todos los Ttos, lo que implica que la aplicación de la mayoría de éstos es favorable para la resistencia a esfuerzos mecánicos Los valores en general siguen siendo menores a los del resto de las especies La sp presenta uno de los valores más bajos para el caso de resistencia a la flexión estática A la sp le es completamente favorable la aplicación de cualquiera de estas sustancias ignífugas
<i>Simarouba amara</i> Aublet	B		T	T1C2IN	
<i>Brosimum utile</i> (Kunth) Pittier	B		T	T1C1VP	
<i>Castilla elastica</i> Sessé	C	Flexión (F)	T2C1IN	T1C1VP	<ul style="list-style-type: none"> Alta favorabilidad del Tto T2C2VP Ninguno de los tratamientos aumenta los valores de resistencia Conserva la tendencia (Ttos de inmersión son más favorables) Muestra dos Ttos que incrementan su resistencia: T2C1IN y T2C2IN El testigo tiene uno de los valores más bajos de resistencia de todos los Ttos, lo que implica que la aplicación de la mayoría de éstos es favorable para la resistencia a esfuerzos mecánicos Los valores en general siguen siendo menores a los del resto de las especies La sp presenta uno de los valores más bajos para el caso de resistencia a la flexión estática A la sp le es completamente favorable la aplicación de cualquiera de estas sustancias ignífugas
<i>Hernandia didymantha</i> Donn.Sm	D		T2C1VP	T1C2IN	
<i>Spondias mombin</i> L	A		T2C2IN	T	

* El Tto más efectivo hace referencia a aquel que favorece la resistencia mecánica de la madera (aumenta su valor).

** El Tto menos efectivo hace referencia a aquel que disminuye el valor de la resistencia mecánica de la madera.

simum utile no existe un tratamiento más efectivo que el testigo (madera sin tratar), en tanto que para las especies *Castilla elastica* y *Hernandia didymantha* este tratamiento se encuentra en puntos intermedios de comparación siendo para la primera los tratamientos por inmersión más efectivos en el incremento de su resistencia, y para la segunda lo contrario. En este caso, la especie *Spondias mombin* responde de manera muy diferente, ya que el testigo es el menos efectivo y cualquier tratamiento empleado resulta ser eficaz tanto para reducir la combustibilidad como para incrementar la resistencia de la madera. Debido al volumen de información y la respuesta por parte de cada una de las especies, las características más importantes del comportamiento de las mismas se encuentran relacionadas en la Tabla 6.

En el análisis estadístico realizado por medio de los programas SPSS y MINITAB, se establecieron las diferencias entre los tratamientos empleados, determinando cual es el más apropiado en el proceso de ignifugación, y se obtuvieron los diagramas de efectos principales e interacciones. Se concluyó finalmente sobre el grado de incidencia y efectividad de los tratamientos de ignifugación sobre las propiedades mecánicas de la madera estudiada. Lo anterior siguiendo una codificación específica (Véase Anexo B).

Debido a que por disponibilidad de material no todas las especies tienen resultados en todas las pruebas, fue necesario compensar los ensayos según el grupo de CHzsf al cual pertenece cada especie, para poder comparar finalmente la incidencia del mismo sobre los tratamientos de ignifugación en las propiedades mecánicas de la madera. Por esta razón en los resultados obtenidos se nota que existen especies que no aparecen en los análisis puntuales. En seguida se da respuesta en orden a cada uno de los objetivos planteados en la investigación.

EFFECTO DEL TIPO DE IGNÍFUGO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Al analizar los efectos que presenta el tipo de ignífugo (solución) en las propiedades mecánicas de las especies en estudio, se observa que la solución de cloruro de zinc ($ZnCl_2$) ejerce un efecto en las propiedades de compresión paralela y cizallamiento, mientras que el sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$) incide en la resistencia de las propiedades de compresión perpendicular y flexión. De manera que la aplicación de cualquiera de las dos sustancias incide en la resistencia mecánica y puede ser empleada sin restricción alguna.

Con base en lo anterior y a la respuesta ante la aplicación de dos ignífugos diferentes, la especie *Brosimum utile* es la que muestra los mayores valores de resistencia en las pruebas de compresión paralela, compresión perpendicular y flexión (474.15, 72.44 y 495.99 kg/cm²); contrario a lo que sucede con *Hernandia didymantha* que muestra en general los valores más bajos en las propiedades de estudio (268.39, 35.34, 37.35 y 226.95 kg/cm²).

EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE IGNÍFUGO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

El resultado estadístico obtenido deja ver que una concentración del 5% ejerce mayor efecto en la resistencia de la madera, aunque no difiera mucho de los resultados obtenidos con una concentración del 10%. La concentración que precede al tratamiento testigo es la del 5%, cuyos valores se encuentran por debajo del promedio para RUM en las todas las propiedades. Mientras que a una concentración del 10% los resultados de resistencia tienden a ubicarse por encima del promedio para RUM. Esto quiere decir que la concentración que favorece la resistencia de la madera es aquella que está por encima del promedio reportado en la investigación; en este caso es la del 10%.

De la misma manera que para el tipo de ignífugo (SIn), la especie que presenta los menores valores de resistencia máxima ante la aplicación de las dos concentraciones es *Hernandia didymantha* y la que mejor responde ante este factor es *Brosimum utile*, mostrando el mismo comportamiento con relación a la resistencia máxima por ensayo para las especies de estudio. En contraste, el perfil de los resultados en cuanto a la concentración de ignífugo empleada varía en las propiedades de compresión paralela y cizallamiento.

EFECTO DEL MÉTODO DE IGNIFUGACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA

Teniendo presente que la resistencia ofrecida por la madera ante la aplicación de dos tipos y concentraciones de ignífugo muestra diferencias entre los mismos; al someterla a dos métodos de ignifugación diferentes (inmersión y presión), se aprecia que el efecto es menor en inmersión para las cuatro propiedades.

Notando que la resistencia máxima para el ensayo de compresión paralela es menor en el orden de especie *Brosimum utile*, *Virola reidii*, *Simarouba amara*, *Castilla elastica*, *Hernandia didymantha* y *Spondias mombin*; mientras que si se conserva el primer y último lugar con respecto a su resistencia máxima (*Brosimum utile* y *Hernandia didymantha*), las especies *Virola reidii*, *Castilla elastica* y *Spondias mombin* varían el valor promedio de resistencia en los ensayos de compresión perpendicular y flexión. La única propiedad en la cual los mayores valores los muestran las especies *Simarouba amara* y *Castilla elastica* es la de cizallamiento, en la cual el efecto de los factores tipo, concentración y método de ignifugación difieren notablemente.

EFECTO DE LA COMBINACIÓN ENTRE TIPO, CONCENTRACIÓN Y MÉTODO DE IGNIFUGACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA

Al desglosar el objetivo principal de la investigación en el análisis de la incidencia de cada uno de los factores de los tratamientos de ignifugación, se percibe que existen interacciones entre los mismos condicionando la resistencia de la madera. Con el objetivo de hacer evidente la respuesta de las especies ante la ignifugación por diferentes tratamientos, en la Figura 1 se muestra la interacción entre el tratamiento de ignifugación y la especie para la resistencia de la madera.

Al analizar las interacciones de los tratamientos de ignifugación en las especies se observa que la respuesta de estas es diferente al someterse a los esfuerzos mecánicos en mención.

Por medio del diagrama de interacciones se observa que la especie 4 (*Hernandia didymantha*) es la más afectada por la aplicación de los tratamientos, debido a que su resistencia dista mucho de la obtenida por otras. Sin embargo es interesante ver que los resultados son superiores a los obtenidos en la madera sin tratar. Aspecto que permite recomendar para esta especie la aplicación de cualquier tratamiento con el beneficio de hacerla tanto resistente al fuego como a los esfuerzos mecánicos.

Con respecto al comportamiento de las demás especies se observan variaciones en cuanto a la resistencia obtenida por propiedad. Es claro que por la naturaleza de los esfuerzos mecánicos cada especie responda de manera diferente.

Ahora bien, como el objetivo es determinar que tratamiento es el más efectivo en el proceso de ignifugación, a continuación se muestran los resultados de los ensayos mecánicos y la incidencia de los tratamientos en la resistencia máxima

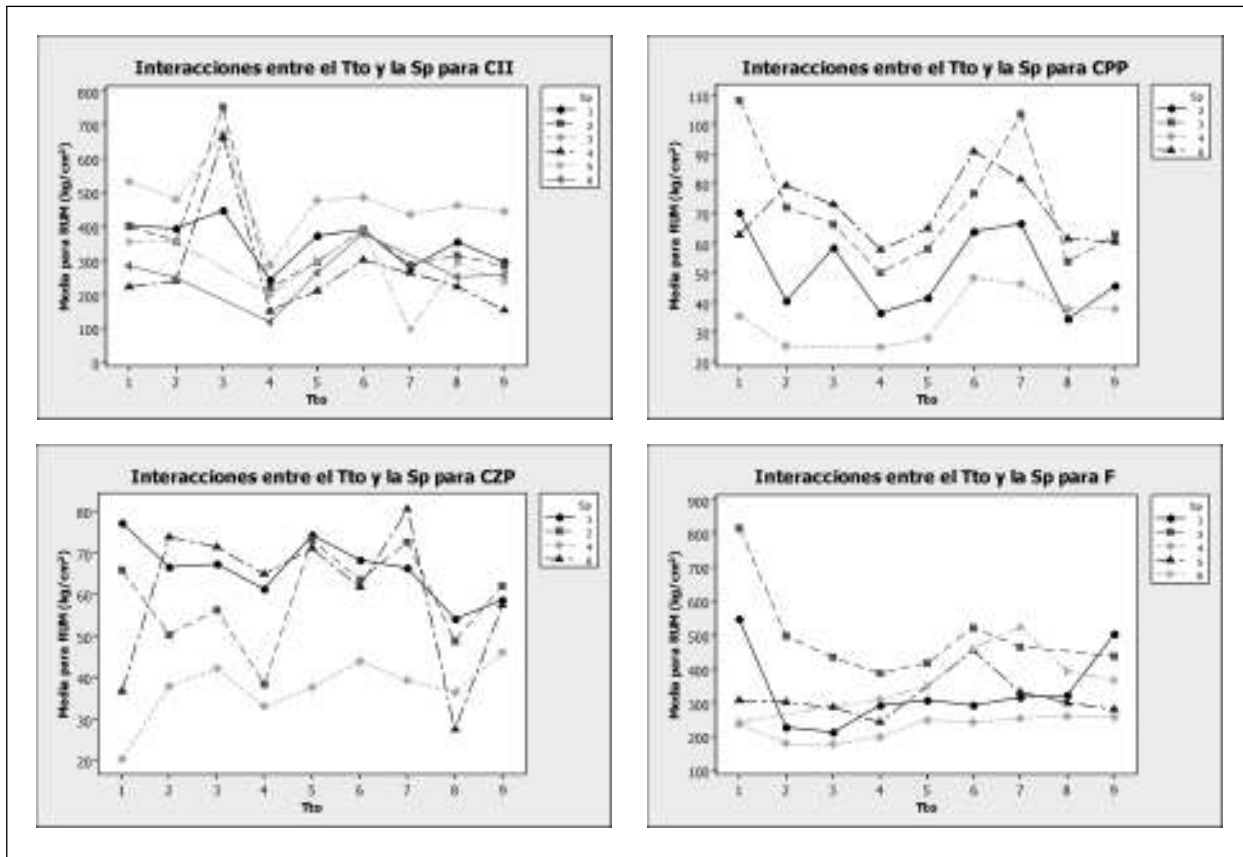


Figura 1. Interacciones entre el tratamiento de ignifugación y la especie en las propiedades mecánicas.

de la madera. En este caso es evidente que en general los tratamientos con cloruro de zinc (5%) y sulfato de amonio (5 y 10%) bajo el método de ignifugación por inmersión, son los que menos reducen la resistencia máxima. Mientras que el método de presión no resulta ser tan significativo como los anteriores (Tabla 7).

Después de realizar el análisis del efecto de cada uno de los factores en el proceso de ignifugación, y de notar al ignifugar bajo el método de inmersión a una concentración del 10%, el promedio de la resistencia máxima por especie experimenta una reducción con relación a la madera en condiciones normales. Sin embargo

Tabla 7. Tratamientos con menor efecto en la resistencia de la madera para las especies de estudio.

Especie	CII	CPP	CZP	F
1 <i>Simarouba amara</i> Aublet	T1C2IN	*	T1C2VP	T2C2VP
2 <i>Virola reidii</i> Little	T1C2IN	T2C2IN	T1C2VP	*
3 <i>Brosimum utile</i> (Kunth) Pittier	T1C2IN	T2C2IN	*	T2C1IN
4 <i>Hernandia didymantha</i> Donn.Sm.	T1C2IN	T2C1IN	T2C1IN	T2C2VP
5 <i>Castilla elastica</i> Sessé	T2C1IN	*	*	T2C1IN
6 <i>Spondias mombin</i> L.	T2C1IN	T2C1IN	T2C2IN	T2C2IN

* Prueba sin resultados

existe todavía un interrogante con respecto al tipo de ignífugo, pues tanto el cloruro de zinc como el sulfato de amonio influyen en proporciones semejantes en la resistencia de la madera sobre las propiedades estudiadas.

Después de analizar estadísticamente los resultados de resistencia obtenidos en las propiedades mecánicas para cada una de las especies, se observa que la respuesta de los tratamientos distan entre propiedades de la siguiente manera: para las propiedades de compresión perpendicular y cizallamiento el tratamiento más efectivo es el Tto 7 (T2C2IN: sulfato de amonio al 10% en inmersión), mientras que para compresión paralela y flexión son los tratamientos Ttos 3 y 6 (T1C2IN y T2C1IN, cluro de zinc al 10% y sulfato de amonio al 5% en inmersión). Apreciando que son los tratamientos de ignifugación que bajo el método de inmersión

en diferentes concentraciones y con diferentes tipos de ignífugos los que favorecen la resistencia máxima de las especies, al incrementar su valor por encima del obtenido en la madera en condiciones normales.

Igualmente se puede observar que en en general los tratamientos de ignifugación por presión reducen notablemente la resistencia de la madera y como respuesta general en las propiedades de estudio son los tratamientos Tto 4, 5, 8 y 9 (T1C1VP, T1C2VP, T2C1VP y T2C2VP; cloruro de zinc y sulfato de amonio al 5 y 10% en presión) los que disminuyen la resistencia de manera notoria; presentando incluso valores por debajo del promedio de RUM para cada propiedad mecánica. En la Figura 2 se observa el comportamiento de las especies ante la aplicación de los diferentes tratamientos de ignifugación para cada propiedad mecánica.

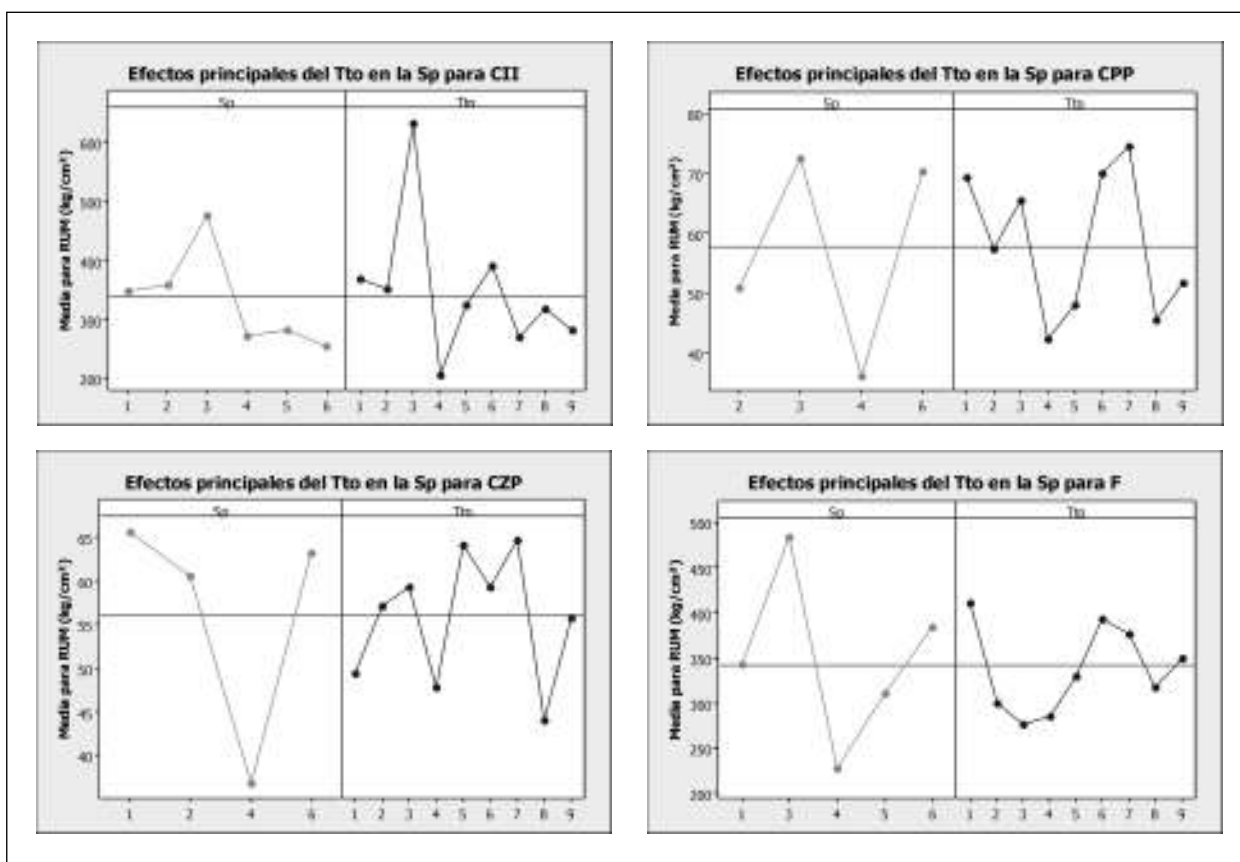


Figura 2. Efectos principales del tratamiento de ignifugación en la especie para las propiedades mecánicas.

En el análisis estadístico realizado se obtuvieron diferencias significativas en todas las propiedades (sig: 0.000) al 95% de probabilidad. Determinando por medio del Test de Tukey que los tratamientos más efectivos son el Tto 7 (T2C2IN) con una resistencia máxima de 74.49 kg/cm² en compresión perpendicular y el Tto 6 (T2C1IN) con una resistencia de 391.34 kg/cm² en flexión.

EFFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA ZONA DE SATURACIÓN DE LAS FIBRAS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA

Al estudiar el comportamiento del grupo según CHzsf ante la aplicación de los tratamientos de ignifugación, se observa que los grupos 2, 3 y 4 independientemente de la propiedad mecánica

y el tratamiento al que se haga referencia, tienen comportamientos similares en cuanto a su resistencia máxima. Siendo característica para algunos grupos la reducción de la resistencia a mayor contenido de humedad en la zona de saturación de las fibras (Figura 3).

Como se nota en la Tabla 8, aún cuando los tratamientos de presión tienen menor efecto en algunas de las propiedades mecánicas, los tratamientos de cloruro de zinc (5%) y sulfato de amonio (5 y 10%) bajo el método de ignifugación por inmersión, son los que menos reducen la resistencia máxima de la madera.

Acerca del efecto del contenido de humedad en la zona de saturación de las fibras, se tiene lo siguiente. En su orden para las propiedades de compresión paralela, compresión perpendicular, cizallamiento y flexión, los tratamientos

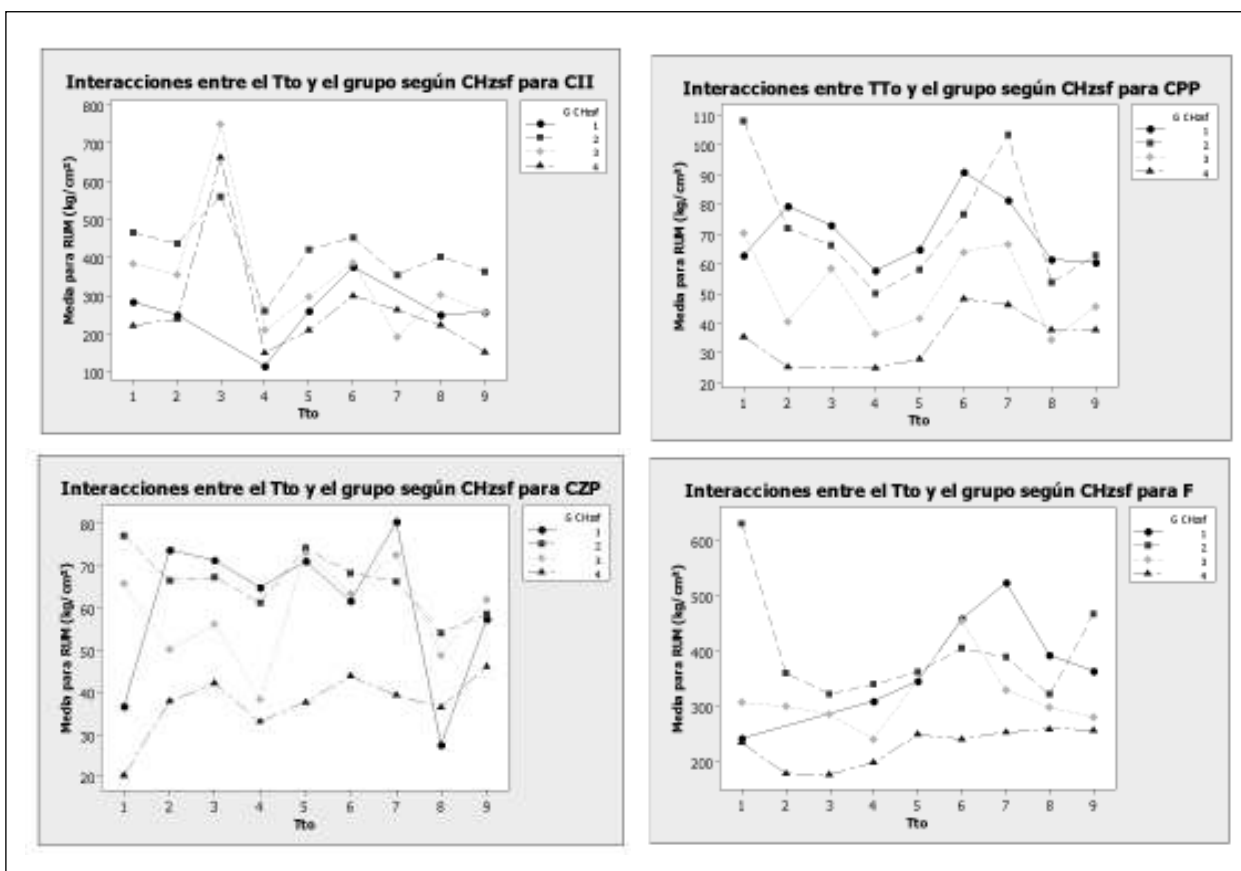


Figura 3. Interacciones entre el tratamiento de ignifugación y el grupo según CHzsf para las propiedades mecánicas.

Tabla 8. Tratamientos con menor efecto en la resistencia de la madera para el grupo según CHzsf.

Grupo según CHzsf		CII	CPP	CZP	F
1	A	T2C1IN	T2C1IN	T2C2IN	T2C2IN
2	B	T1C2IN	T2C2IN	T1C2VP	T2C2VP
3	C	T1C2IN	T2C2IN	T2C2IN	T2C1IN
4	D	T1C2IN	T2C1IN	T1C2VP	T2C2VP

más efectivos son el Tto 3 (T1C2IN: cloruro de zinc al 10% en inmersión) el tratamiento Tto 7 (T2C2IN: sulfato de amonio al 10% en inmersión) (Comp. Perpendicular y cizallamiento) y el tratamiento Tto 6 (T2C1IN: sulfato de amonio al 5% en inmersión) con una significación de 0.000 a una probabilidad del 95%; resultados verificados por medio del Test de Tukey.

Con respecto al grupo según CHzsf, es el grupo número dos el que muestra los valores más altos con una resistencia aproximada de 400 kg/cm² para compresión paralela y flexión, y de 70 kg/cm² para compresión perpendicular y cizallamiento, seguido por los grupos 3, 4 y 1 con valores inferiores que oscilan de 200 a 380 kg/cm² y 30 a 60 kg/cm².

En los diagramas de efectos principales se puede observar que en contenidos de humedad en zona de saturación de las fibras mayores al 20%, en general, el proceso de ignifugación por inmersión en cloruro de zinc y sulfato de amonio a una concentración del 10%, favorece la resistencia de la madera incrementando sus valores por encima de los obtenidos en la madera bajo condiciones normales (Figura 4).

CONCLUSIONES

Por medio del análisis exploratorio de los datos se pudo observar la incidencia de los tratamientos en la resistencia máxima para cada una de las propiedades, obteniendo así puntos claves de comparación en cuanto a la reduc-

ción o incremento de la misma con respecto a la resistencia que presenta la madera sin tratar. Identificando no solamente el orden en que los tratamientos inciden en las propiedades, sino también cómo se comportan las especies en el mismo y en diferente grupo según CHzsf; notamos que la respuesta de las mismas está condicionada fuertemente por el método de ignifugación empleado.

Se observa que la madera de las especies *Simarouba amara* y *Brosimum utile* presenta una tendencia similar en el comportamiento al someterse a tratamientos de ignifugación, coincidiendo en que al pertenecer al mismo grupo según el CHzsf la respuesta esperada sea parecida. Contrario a las especies *Virola reidii* y *Castilla elastica*, que a pesar del pertenecer al mismo grupo según el CHzsf difieren en su comportamiento. Pero, sucede algo que es necesario estudiar con más detenimiento, las especies *Hernandia didymantha* y *Spondias mombin* aunque son de grupos diferentes y su contenido de humedad en zona de saturación de las fibras es opuesto (44.12 y 19.59%) exhiben tendencias análogas; puesto que la amplitud entre el valor máximo y mínimo de resistencia obtenida no es tan notorio como en las demás especies. En general existe un tratamiento con incidencia evidente pero cuyo valor no dista mucho de los demás.

Los valores de resistencia mecánica hallados en las pruebas testigo (madera sin tratar) permiten ratificar la teoría según la cual, a mayor

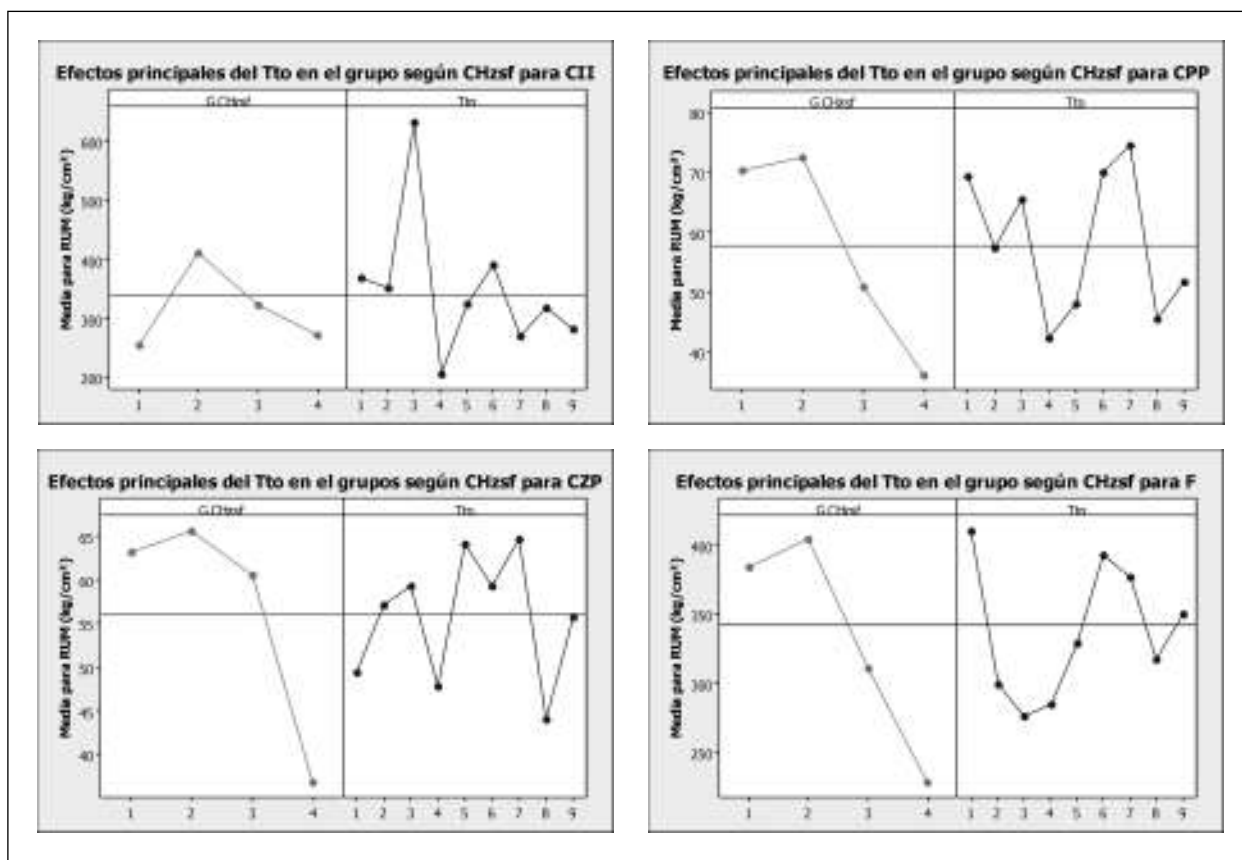


Figura 4. Efectos principales de los tratamientos de ignifugación en el grupo según CHZsf para las propiedades mecánicas.

contenido de humedad en la zona de saturación de fibras es menor la resistencia a esfuerzos mecánicos. Notando que como se esperaba (a excepción de la especie *Spondias mombin* L) la resistencia máxima es mayor en su orden, en el grupo B (*Simarouba amara* Aublet, *Brosimum utile* (Kunth) Pittier) grupo C (*Virola reidii* Little, *Castilla elastica* Sessé) y grupo D (*Hernandia didymantha* Donn.Sm). Lo anterior deja ver que es necesario investigar el porqué del comportamiento de la especie *Spondias mombin* L, que a pesar de ser del grupo con menor CHZsf presenta uno de los menores valores en cuanto a su resistencia mecánica.

Tanto el cloruro de zinc como el sulfato de amonio inciden de manera similar en la resistencia que ofrece la madera, ejerciendo un menor efecto en las propiedades de compresión

paralela y cizallamiento, y compresión perpendicular y flexión, respectivamente. En tanto que la concentración incide de manera diferente en las propiedades mecánicas, puesto que la resistencia máxima se disminuye al emplear una concentración del 5%, mientras que al emplear una concentración del 10% la respuesta es inversa; lo anterior para las propiedades de compresión paralela, compresión perpendicular y flexión. Resultados que contradicen lo propuesto por el Departamento de los Estados Unidos (1955) al afirmar que el cloruro de zinc y algunas sales compuestas en soluciones del 2 al 5% son inactivas, pero en concentraciones mayores debilita considerablemente la madera.

Referente al método de ignifugación, igualmente se observa que uno de los dos métodos

es el que ejerce un efecto positivo en la resistencia máxima (método de ignifugación por inmersión) al incrementar incluso sus valores sobre los ofrecidos por la madera en condiciones normales. Esto en el caso de las propiedades de compresión paralela, compresión perpendicular y cizallamiento.

Resultado que, contrario a lo que se esperaba, en cuanto al incremento en la resistencia de la madera al someterla al proceso de ignifugación, permite recomendar la aplicación de diferentes tratamientos con el beneficio de obtener tanto resistencia al fuego como a los esfuerzos mecánicos.

La reducción de la resistencia de la madera ante la aplicación de ignífugos bajo el método de presión, permite corroborar lo dicho por Umit et al. (2004) y Barnes et al. (2005) al afirmar que la adición de calor durante el tratamiento debilita las fuerzas internas de las fibras, razón por la cual la madera pierde solidez y sus propiedades mecánicas se ven notablemente afectadas.

Existe una interacción notable entre los factores tipo de ignífugo, concentración y método de ignifugación, que determina el comportamiento mecánico de las especies en mención; siendo en general el método de inmersión en cloruro de zinc y sulfato de amonio, a una concentración del 10%, el que provee los mejores resultados de resistencia mecánica e incrementa incluso sus valores sobre los obtenidos en la madera sin tratar.

Cuando se identifican los efectos principales entre los factores, se puede observar que en contenidos de humedad en zona de saturación de las fibras mayores al 20%, en general, el proceso de ignifugación por inmersión en cloruro de zinc y sulfato de amonio a una concentración del 10%, favorece la resistencia de la madera al no deteriorar su valor y proveer

incluso una mayor tenacidad en las propiedades en mención. En este caso es notorio que la especie *Brosimum utile* presenta valores de resistencia media superiores a los de la especie *Virola reidii*, lo que confirma la teoría según la cual, a mayor contenido de humedad en zona de saturación de fibras menores resistencias a esfuerzos mecánicos.

Concluimos entonces que existe una estrecha relación entre el contenido de humedad en zona de saturación de las fibras y el comportamiento mecánico de la madera. Corroborando lo dicho por Klinger, *et al.* (1998), al precisar que el efecto de la aplicación de ignífugos en la madera está en función del grupo al que pertenezca de acuerdo a su contenido de humedad en la zona de saturación de las fibras, siendo este el criterio de clasificación y agrupamiento de la madera más adecuado cuando se trata de predecir el comportamiento combustible de la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barnes, H. M. & R. J. Murphy 2005.** Effect of vapor boron treatment on some properties of wood strand and fiber composites. Universidad Estatal de Mississippi, Centro de Investigaciones Forestales y de Vida Silvestre. Mississippi, Estados Unidos. Publicado en *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing Journal*.
- COPANT - Comisión Panamericana de Normas Técnicas.** Pan American Standard Comisión. 1972. NTC 463, 464. 466, 555.
- Delgado, M. G. 1975.** Propiedades de la madera. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Mérida, Venezuela.
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. 1955.** Wood Book. Washington, Estados Unidos.

- Hoheisel, H. 1968.** Estipulaciones para los ensayos de propiedades físicas y mecánicas de la madera. Instituto Latinoamericano de Investigación y Capacitación. Mérida, Venezuela.
- Hunt, G. M. & G. Garratt 1962.** Preservación de la madera. Salvat Editores S. A. Madrid, Barcelona.
- JUNAC.** Junta del Acuerdo de Cartagena. 1984. Manual de clasificación visual para madera estructural. Lima, Perú.
- Klinger, B. W., C. Alvarez & L. Cardoso 1998.** Incidencia del método de aplicación de ignífugos en el comportamiento ante el fuego de cinco maderas colombianas. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad del medio Ambiente y Recursos Naturales. Ingeniería Forestal. Bogotá.
- Klinger, B. W. 1994a.** Propiedades mecánicas y aplicaciones estructurales de la madera. Parte I. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Ingeniería Forestal. Bogotá.
- Klinger, B. W. 1994b.** Una revisión conceptual a los contenidos de humedad de equilibrio y en la zona de saturación de las fibras. Implicaciones y tendencias. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad del medio ambiente y recursos naturales. Ingeniería Forestal. Bogotá.
- Umit, C. Y., A. Temiz, E. Derya & S. Yildiz 2004.** Effects of the wood preservatives on mechanical properties of yellow pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. Universidad Técnica de Karadeniz, Facultad de Forestal, Departamento de Ingeniería de Industria Forestal. Trabzon, Turquía. Publicado en *Building and Environment Journal*.

ANEXO A

Estructura factorial del diseño experimental

Testigo	T2C11N (NH ₄) ₂ SO ₄ - 5% Inmersión				T2C21N (NH ₄) ₂ SO ₄ - 10% Inmersión				T2C1VP (NH ₄) ₂ SO ₄ - 5% Autoclave				T2C2VP (NH ₄) ₂ SO ₄ - 10% Autoclave											
	Sp	CPP	CII	CZP	F	CPP	CII	CZP	F	CPP	CII	CZP	F	CPP	CII	CZP	F	CPP	CII	CZP	F			
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Sp	T2C11N ZNCL ₂ - 5% Inmersión				T2C21N ZNCL ₂ - 10% Inmersión				T2C1VP ZNCL ₂ - 5% Autoclave				T2C2VP ZNCL ₂ - 10% Autoclave							
	CPP	CII	CZP	F	CPP	CII	CZP	F	CPP	CII	CZP	F	CPP	CII	CZP	F				
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x Unidad experimental.

Donde cada tratamiento resultante es la combinación entre los factores solución (tipo de ignífugo), concentración y método de ignifugación.

Solución	Concentración []	Método
(NH ₄) ₂ SO ₄	5%	Inmersión
ZNCL ₂	10%	Presión (Autoclave)

ANEXO B

Codificación de factores para el análisis estadístico

Sp	Especie forestal	Grupo estructural (CHzsf)		
1	<i>Simarouba amara</i> Aublet	1	A	10 - 20%
2	<i>Virola reidii</i> Little	2	B	20 - 30%
3	<i>Brosimum utile</i> (Kunth) Pittier	3	C	30 - 40%
4	<i>Hernandia didymantha</i> Donn.Sm.	4	D	> 40%
5	<i>Castilla elastica</i> Sessé			
6	<i>Spondias mombin</i> L.			

	Propiedades mecánicas			
1	Compresión paralela (CII)	Mét	1	Testigo (T)
2	Compresión perpendicular (CPP)	(Método de	2	Inmersión
3	Cizallamiento (CZP)	Ignifugación)	3	Presión
4	Flexión (F)	Sln (Solución)	1	Testigo (T)
			2	ZnCl ₂
			3	NH ₄ (SO ₄) ₂
		Conc	1	0%
		(Concentración)	2	5%
			3	10%

Tto	Sln	Conc	Mét		Codificación de la probetería
T	1	1	1	1	Sp 1 a 6
T1C1IN	2	2	2	2	Prop. Mecánica CII, CPP, CZP, F
T1C2IN	3	2	3	2	T1 ZNCL ₂
T1C1VP	4	2	2	3	T2 (NH ₄) ₂ SO ₄
T1C2VP	5	2	3	3	C1 5%
T2C1IN	6	3	2	2	C2 10%
T2C2IN	7	3	3	2	IN Inmersión
T2C1VP	8	3	2	3	VP Presión
T2C2VP	9	3	3	3	