

INCIDENCIA DE LA IMPREGNACIÓN DE MADERA CON ALCOHOL POLIVINILICO Y POLIETILENGLICOL EN ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE PINO OOCARPA

INCIDENCE OF THE IMPREGNATION OF WOOD WITH POLY VINYL ALCOHOL AND POLYETHYLENE GLYCOL ON SOME PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF OOCARPA PINE

Jhon F. Herrera-Builes^{1,*}, Rubén A. Ananías², Jairo A. Osorio³

RESUMEN

La presente investigación se desarrolló con la madera *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. Var. *Ochoterenai* de plantación forestal de Colombia, especie que ha presentado inconvenientes importantes que han limitado su uso, debido a su inestabilidad dimensional y baja resistencia mecánica. Los tratamientos con impregnación de polímeros han permitido reducir las deformaciones, y mejorar las propiedades físicas y mecánicas. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la impregnación de polietilenglicol con peso molecular 600 y 1500, alcohol polivinílico y adición de zeolita, sobre la densidad, estabilidad dimensional, flexión estática y compresión paralela al grano. Las muestras se impregnaron con baño caliente a 95 °C, durante 8 horas, y luego impregnados a temperatura ambiente, por 16 horas. La evaluación de la madera se llevó a cabo bajo las Normas Técnicas Colombianas NTC 290, 663, 784 y otros estándares de la literatura. Los mejores resultados se obtuvieron con la impregnación de polietilenglicol 1500; la densidad aumentó entre el 21 % y 24 %; la eficiencia anti-hinchazón fue de 60 %; en flexión estática aumentó el módulo ruptura 20 %, el módulo de elasticidad 39 % en compresión paralela al grano aumentó 8 %. El tratamiento con polietilenglicol 600 proporcionó una menor eficacia anti-hinchazón (14 %), y menor mejora en densidad (8 %) y en las propiedades mecánicas (1 % a 7 %). La impregnación con polímeros evidenció madera con mayor estabilidad dimensional y mejores propiedades físicas y mecánicas

Palabras claves: Densidad, eficiencia anti-hinchazón, flexión estática, módulo de elasticidad, *Pinus oocarpa*, polímeros, tratamiento químico de madera.

ABSTRACT

This research was performed with *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. Var. *Ochoterenai* of Forest Plantation of Colombia, specie that have presented some important troubles that have limited its use, due to its dimensional instability and low mechanical resistance. Polymer impregnation treatments have reduced deformation and improved physical and mechanical properties of the wood. The aim of this research was evaluated the effect of polyethylene glycol impregnation with molecular weight 600 and 1500, polyvinyl alcohol and zeolite addition, on density, dimensional stability, static flexion and compression parallel to Grain. The samples were impregnated in hot bath at 95 °C for 8 hours, and then impregnated at room temperature for 16 hours. The assessment of the wood was carried out under the Colombian Technical Standards NTC 290, 663, 784 and

¹Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Forestales, Medellín, Colombia.

²Universidad del Bío-Bío, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Maderas, Concepción, Chile.

³Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y de Alimentos, Medellín, Colombia.

*Autor para correspondencia: jfherrer@unal.edu.co

Recibido: 23.04.2019 Aceptado: 18.02.2020

other standards. The best results were obtained with the impregnation of polyethylene glycol 1500 where the density increased between 21 % and 24 %; the anti-swelling efficiency was 60 %; in static flexion the modulus rupture increased 20 %, modulus of elasticity 39 % and compression parallel to grain increased 8 %. Treatment with polyethylene glycol 600 provided lower anti-swelling efficiency (14%), and lower improvement in density (8%), and in mechanical properties (1% to 7%). Impregnation with polymers evidenced wood with greater dimensional stability and better physical and mechanical properties.

Keywords: Density, anti-swelling efficiency, static flexion, modulus of elasticity, *Pinus oocarpa*, polymers, wood chemical treatments.

INTRODUCCIÓN

La madera de pino ocarpa que se investigó es de origen de plantación, se desarrolla en pisos térmicos templado y frío, con disponibilidad de 24000 hectáreas (Lamprecht 1990, Cipreses de Colombia 2017); debido a la disminución de la riqueza forestal, las plantaciones de especies de rápido crecimiento se han convertido en recursos forestales madereros importantes para la industria. Pero, por su inestabilidad dimensional, sus bajas propiedades mecánicas y poca resistencia a la descomposición frente agentes biológicos, limitan su utilización con fines estructurales (González y Honorato 2005, Unsal 2011, Mattos *et al.* 2015, Li *et al.* 2015, Dong *et al.* 2016).

Un tratamiento alternativo a los métodos de modificación química de la madera es la impregnación de polímeros, los cuales pueden reducir los fenómenos de la contracción e hinchazón de la madera y mejorar las propiedades físicas y mecánicas (Rowell 2006, Giridhar *et al.* 2017, Berube *et al.* 2017, Behr *et al.* 2017, Xiao *et al.* 2018, Gardner y Bozo 2018, Yang *et al.* 2018, Yu *et al.* 2018). Uno de los tratamientos es la impregnación de productos para el engrosamiento de la pared celular, donde los productos químicos son depositados dentro de la misma; se utilizan diferentes productos químicos, sales de sodio, bario y magnesio, azúcares, resinas sintéticas, y la alternativa de gran relevancia como es el polietilenglicol (PEG) material de origen sintético con características principales de biocompatibilidad, solubilidad en agua, no tóxico y bajo costo, el cual penetra en las paredes y lúmenes de la madera (Cooper *et al.* 1991, Lutz y Hoth 2006, Bardet *et al.* 2006, Kocabaş 2014, Kang *et al.* 2017).

Y el otro es la adición de monómeros, polímeros u oligoelementos como el caso del alcohol polivinílico (PVA), para el relleno de cavidades de células grandes de la madera que pueden condensarse y reticularse; para de esta manera modificar las propiedades de la madera y disminuir la contracción total o parcialmente (Krause *et al.* 2003, Hill 2006, Rowell 2006, Chiozza *et al.* 2018). Son varios los estudios con diferentes especies que han corroborado los aumentos de la estabilidad dimensional en la madera, mediante la impregnación de mezclas de agente hinchante de la pared celular de PEG 600 y PEG 1000 (Paz y Sanabria 2000, Jeremic *et al.* 2007, Bjurhager *et al.* 2010, Meints *et al.* 2018, Ermeydan 2018). El tratamiento con la impregnación de PVA como agente de reticulación en la red porosa de la madera y polimerización en su estructura, causa un aumento en las propiedades mecánicas de flexión estática y compresión paralela al grano (Devi *et al.* 2003, Yildiz *et al.* 2005, Cai *et al.* 2007, Li *et al.* 2010, Holloway *et al.* 2010, Zheng *et al.* 2014, Tan *et al.* 2015, Sun *et al.* 2016, Kwak *et al.* 2018, Ma *et al.* 2018, Solikhin *et al.* 2018, Gadhav *et al.* 2019), y una mejoría en la estabilidad dimensional (Alma *et al.* 1996, Sun *et al.* 2016, Olaniran *et al.* 2019).

El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento de algunas propiedades físicas (densidad seca al aire, densidad básica y eficiencia anti-hinchazón) y propiedades mecánicas (resistencia a la compresión paralela al grano, resistencia a la flexión y módulo de elasticidad en flexión) de la madera *Pinus oocarpa* después del tratamiento de impregnación con mezclas de PVA y PEG. Se espera que esta investigación contribuya al conocimiento de maderas de rápido crecimiento de origen de plantaciones forestales, para ser utilizadas como alternativas en materia prima estructural, y con ello hacer un aporte significativo al crecimiento del sector forestal de Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras de madera

La madera *Pinus oocarpa* que se investigó fue proporcionada por la Empresa de Cipreses de Colombia S.A., proviene de las plantaciones del núcleo ubicado en el municipio de Yolombó (Antioquia, república de Colombia) finca La Carolina, lote Las Nubes y rodal R2 (coordenadas 6°39'25.4"N 75°04'13.9"W). Se recolectaron treinta (30) árboles de 25 años de edad, con fuste útil de diámetro de 45 cm, de los cuales se tomaron las dos primeras trozas de 250 cm de largo, se cortó de cada troza un tablón central de 10 cm de espesor de madera de duramen; luego de cada tablón se cortaron listones de 6,0 cm x 6,0 cm x 250 cm eliminando la médula, de los cuales se obtuvieron las probetas necesarias para cada uno de los ensayos.

Para las propiedades físicas de densidad seca al aire y densidad básica y de estabilidad dimensional se utilizaron 500 muestras de 3,0 cm x 3,0 cm x 10 cm. Para las pruebas de propiedades mecánicas se dispuso de 500 muestras de 2,5 cm x 2,5 cm x 41 cm para los ensayos de flexión estática; y para el ensayo de compresión paralela otras 500 muestras de 5 cm x 5 cm x 20 cm. Se trató de que las muestras para estos ensayos estuvieran libres de nudos y defectos, con los anillos de crecimiento bien direccionados, enmarcando de forma clara las orientaciones radiales y tangenciales de la muestra.

Tratamiento de la madera

Para el tratamiento de la madera se utilizó alcohol polivinílico (PVA) (CH_2CHOH_n); polietilenglicol (PEG) ($\text{HO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$) de dos pesos moleculares PEG 600 y PEG 1500, proporcionados por la empresa Bell Chem Internacional SA (Medellín, Colombia); y zeolita proporcionado por la empresa Zeocol (Armenia, Colombia). La madera se sometió a diferentes tratamientos alternativos de impregnación con los agentes alcohol polivinílico (PVA) y polietilenglicol PEG de pesos moleculares 600 y 1500, los cuales se disolvieron en agua a concentraciones de 20 % y 40 % (p/v), así como la adición en algunos tratamientos de zeolita (mineral rico en sílice) al 3 % y al 7 %. Para comparación de los efectos de los tratamientos aplicados, se mantuvieron muestras sin tratar (control). En la Tabla 1 se presentan los grupos de tratamientos alternativos de impregnación. La madera se sumergió en agua a una temperatura de 95 °C, en un tanque metálico de laboratorio, con dimensiones de 60 cm x 60 cm x 60 cm, equipado con resistencia eléctrica y medidor de temperatura durante 8 horas, y luego se pasó rápidamente a otro tanque que contenía la mezcla impregnante a temperatura ambiente, y se dejó sumergido por 16 horas. Después de la impregnación las muestras se secaron al aire libre hasta 12 % de contenido de humedad.

Tabla 1: Grupos de tratamientos alternativos de impregnación de la madera de la especie forestal *Pinus oocarpa*.

Grupos	PEG		PVA (%)	Zeolita (%)	Número de probetas ensayadas
	Peso molecular	(%)			
Control	0	0	0	0	60
Tratamiento 1	600	20	20	0	60
Tratamiento 2	600	20	40	0	60
Tratamiento 3	600	40	20	0	60
Tratamiento 4	600	40	40	0	60
Tratamiento 5	1500	20	20	0	60
Tratamiento 6	1500	20	40	0	60
Tratamiento 7	1500	40	20	0	60
Tratamiento 8	1500	40	40	0	60
Tratamiento 9	600	20	20	3	60
Tratamiento 10	600	20	40	3	60
Tratamiento 11	600	40	20	3	60
Tratamiento 12	600	40	40	3	60
Tratamiento 13	600	20	20	7	60
Tratamiento 14	600	20	40	7	60
Tratamiento 15	600	40	20	7	60
Tratamiento 16	600	40	40	7	60
Tratamiento 17	1500	20	20	3	60
Tratamiento 18	1500	20	40	3	60
Tratamiento 19	1500	40	20	3	60
Tratamiento 20	1500	40	40	3	60
Tratamiento 21	1500	20	20	7	60
Tratamiento 22	1500	20	40	7	60
Tratamiento 23	1500	40	20	7	60
Tratamiento 24	1500	40	40	7	60

Propiedades físicas

La madera *Pinus oocarpa* tratada con los métodos alternativos a la modificación química, mediante la impregnación de polímeros como el grupo control, fue sometida a los ensayos de densidad siguiendo los lineamientos de la Norma Técnica Colombiana NTC 290 (NTC 2006). La estabilidad dimensional, se realizó siguiendo los lineamientos del ensayo de Rowell y Youngs (1981); en un ciclo completo el cual consistió en pasar la madera de estado seco a húmedo y luego húmedo a seco y sucesivamente hasta completar 3 ciclos. El secado se llevó a cabo en horno a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante, el ciclo de húmedo se realizó mediante remojo de las probetas durante 24 horas, midiendo el cambio de dimensiones de las muestras; se estimó el coeficiente de hinchamiento volumétrico (S) y la eficiencia anti-hinchazón (ASE, antiswell efficiency) se consideró luego de los tres ciclos como una medida de la estabilidad dimensional de la madera. Para calcular ASE se utilizaron las siguientes Ecuacion 1 y Ecuacion 2:

$$S\% = 100\left(\frac{V_2 - V_1}{V_1}\right) \quad (1)$$

Donde, V_2 es el volumen de las probetas saturadas y V_1 volumen de las probetas secas al horno.

$$ASE\% = 100\left(\frac{S_s - S_m}{S_s}\right) \quad (2)$$

Donde, S_s es el coeficiente S promedio de las probetas sin modificar y S_m coeficiente promedio de las probetas modificadas.

Propiedades mecánicas

La madera *Pinus oocarpa*, tratada con los métodos alternativos como el grupo control, se sometió a pruebas a flexión estática siguiendo los lineamientos de la Norma Técnica Colombiana NTC 663 (NTC 2006), y la compresión paralela al grano bajo la Norma Técnica Colombiana NTC 784 (NTC 2006). La determinación de las propiedades mecánicas se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Productos Forestales, de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, en una máquina universal Tinius Olsen (Willow Grove Pensilvania, USA) con capacidad de 15 toneladas, accesorios para cada ensayo y la madera en condición seca al aire (contenido de humedad cercano al 12 %).

Análisis estadístico

Se realizó un diseño experimental completamente al azar, con veinticinco (25) tratamientos y veinte (20) repeticiones por tratamiento. Se realizó análisis de varianza (ANOVA) para cada variable. Finalmente, se utilizaron pruebas de comparación de rangos múltiples para determinar cuáles medias eran significativamente diferentes de otras. La información se procesó teniendo como base la metodología descrita por Gómez (1989).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas

Densidad de la madera

En la Tabla 2 se observa un resumen de las densidades obtenidas en la madera *Pinus oocarpa*, tratada con los métodos alternativos, como grupo control.

Los mayores aumentos de densidad (seca al aire y básica), se presentaron con la aplicación de los tratamientos con mezclas de los agentes impregnantes de polietilenglicol (PEG) con peso molecular de 1500 y alcohol polivinílico (PVA) para las concentraciones de 20 % y 40 %, y con la adición de zeolita (7%); sin

presentar diferencias significativas entre ellos. El valor más alto de mejora de densidad seca al aire fue de 24 % y para la densidad básica de 15 %. Estos resultados están en concordancia con los aumentos de densidad en otras maderas impregnadas con polímeros (Alma *et al.* 1996, Ohmae *et al.* 2002, Bjurhager *et al.* 2010). El aumento de la densidad de la madera *Pinus oocarpa*, se debe al reemplazo del agua por parte de los polímeros en las paredes celulares y en los lúmenes.

Tabla 2: Densidades obtenidas en la madera de la especie forestal *Pinus oocarpa*, tratada con los métodos alternativos.

Condiciones	Densidad seca al aire (kg/m ³)	Densidad básica (kg/m ³)
Control sin tratamiento	630,47 ± 57,67 a	521,30 ± 47,93 a
Tratamiento 1	689,54 ± 35,30 b	559,91 ± 20,21 abcd
Tratamiento 2	688,76 ± 21,84 b	563,37 ± 6,33 bcd
Tratamiento 3	684,36 ± 33,10 b	561,65 ± 19,49 bcd
Tratamiento 4	687,74 ± 25,26 b	562,15 ± 21,02 bcd
Tratamiento 5	687,16 ± 5,28 b	562,98 ± 10,56 bcd
Tratamiento 6	691,15 ± 5,58 b	575,14 ± 14,79 bcd
Tratamiento 7	703,76 ± 7,08 b	580,41 ± 10,45 bcd
Tratamiento 8	709,85 ± 5,19 b	583,01 ± 9,47 bcd
Tratamiento 9	689,91 ± 3,44 b	559,08 ± 15,64 abcd
Tratamiento 10	689,28 ± 31,54 b	560,67 ± 8,34 bcd
Tratamiento 11	687,02 ± 4,25 b	561,47 ± 18,43 bcd
Tratamiento 12	687,92 ± 25,20 b	560,59 ± 4,58 bcd
Tratamiento 13	684,11 ± 7,38 b	557,66 ± 4,65 abc
Tratamiento 14	685,75 ± 5,53 b	556,11 ± 3,76 ab
Tratamiento 15	685,52 ± 1,66 b	556,63 ± 3,89 ab
Tratamiento 16	686,92 ± 2,68 b	556,81 ± 3,77 ab
Tratamiento 17	763,57 ± 12,36 c	597,45 ± 14,71 ef
Tratamiento 18	762,64 ± 12,07 c	596,99 ± 14,51 ef
Tratamiento 19	763,34 ± 11,92 c	597,85 ± 13,80 ef
Tratamiento 20	762,86 ± 9,25 c	596,37 ± 13,15 ef
Tratamiento 21	765,98 ± 2,95 c	597,31 ± 11,16 ef
Tratamiento 22	766,13 ± 8,21 c	597,43 ± 10,09 ef
Tratamiento 23	766,43 ± 8,32 c	598,78 ± 9,87 ef
Tratamiento 24	766,63 ± 8,29 c	601,69 ± 16,43 f

En el cuerpo de la tabla se muestran los valores promedio ± Intervalo de confianza al 95% de veinte probetas por tratamiento. Las letras iguales en las columnas indican la no diferencia significativas entre tratamientos, de acuerdo a la prueba de Rangos Múltiples de Tukey ($P \leq 0,05$)

Estabilidad dimensional

En la Tabla 3 se presentan los valores promedio de eficiencia anti-hinchazón (ASE) obtenidos en la madera *Pinus oocarpa*, tratada con los métodos alternativos.

Los mayores valores se obtuvieron con los tratamientos de impregnación de PEG con peso molecular de 1500, tanto para las concentraciones de 20 % y 40 %, y PVA para concentraciones de 20 % y 40 %, y con la adición de zeolita en las concentraciones de 3 % y 7 %. La eficiencia anti-hinchazón ASE radial fue del 56 % al 59 %; sin presentar diferencias significativas entre ellos, pero sí con los demás tratamientos. En relación con las mayores eficiencias anti-hinchazón ASE tangencial, se lograron con los tratamientos de impregnación de PEG con peso molecular de 1500 al 40 % de concentración, y con PVA tanto para las concentraciones de 20 % y 40 %, y adición de zeolita al 7 % de concentración; no presentando diferencia significativa entre ellos, pero con diferencia significativa con los demás tratamientos. Los anteriores resultados son iguales a los obtenidos para otras maderas (Alma *et al.* 1996, Paz y Sanabria 2000, Ohmae *et al.* 2002, Sun *et al.* 2016, Meints *et al.* 2018). Estas mejoras se deben atribuir principalmente a los efectos de los polímeros en la reticulación y aumento del engrosamiento de la pared celular, por lo que se reducen las tensiones intercelulares y se obtienen menos contracciones y dilataciones en la madera.

Tabla 3: Eficiencia anti-hinchazón (ASE) obtenidas en la madera de la especie forestal *Pinus oocarpa*, tratada con los métodos alternativos.

Condiciones	ASE Radial (%)	ASE Tangencial (%)
Control sin tratamiento	-----	-----
Tratamiento 1	24,88 ± 2,06 a	8,51 ± 0,84 a
Tratamiento 2	25,78 ± 1,15 ab	9,99 ± 1,57 abc
Tratamiento 3	25,98 ± 1,81 ab	10,64 ± 1,19 abc
Tratamiento 4	25,68 ± 3,28 ab	9,29 ± 0,97 ab
Tratamiento 5	30,41 ± 2,38 cd	9,92 ± 0,78 abc
Tratamiento 6	29,05 ± 1,64 bc	10,95 ± 2,52 bc
Tratamiento 7	29,80 ± 2,29 c	10,89 ± 1,28 bc
Tratamiento 8	29,07 ± 0,74 bc	11,80 ± 0,62 c
Tratamiento 9	34,67 ± 1,60 ef	9,87 ± 0,60 abc
Tratamiento 10	34,78 ± 1,64 ef	8,99 ± 0,78 ab
Tratamiento 11	34,00 ± 2,27 de	9,55 ± 0,65 abc
Tratamiento 12	34,56 ± 1,90 ef	10,40 ± 0,65 abc
Tratamiento 13	34,77 ± 1,65 ef	11,35 ± 0,66 bc
Tratamiento 14	35,00 ± 0,94 ef	11,33 ± 0,58 bc
Tratamiento 15	36,40 ± 0,87 ef	14,42 ± 0,48 d
Tratamiento 16	38,21 ± 0,23 f	11,63 ± 0,44 c
Tratamiento 17	55,55 ± 0,19 g	46,23 ± 0,31 e
Tratamiento 18	56,81 ± 0,03 g	46,01 ± 0,10 e
Tratamiento 19	57,72 ± 0,15 g	46,49 ± 0,06 e
Tratamiento 20	57,15 ± 0,22 g	46,15 ± 0,08 e
Tratamiento 21	57,62 ± 0,11 g	49,56 ± 0,40 f
Tratamiento 22	58,00 ± 0,08 g	51,62 ± 0,11 f
Tratamiento 23	58,07 ± 0,21 g	59,88 ± 0,16 g
Tratamiento 24	58,81 ± 0,20 g	60,73 ± 0,14 g

En el cuerpo de la tabla se muestran los valores promedio ± Intervalo de confianza al 95% de veinte probetas por tratamiento. Las letras iguales en las columnas indican la no diferencia significativas entre tratamientos, de acuerdo a la prueba de Rangos Múltiples de Tukey ($P < 0,05$).

Propiedades mecánicas

Los resultados obtenidos en los ensayos de flexión estática y compresión paralela al grano en la madera *Pinus oocarpa*, tratada con los métodos alternativos, se presentan en la Tabla 4.

El aumento máximo en el módulo ruptura de flexión estática del 20 %, se presentó después de la impregnación de PEG con peso molecular de 1500 y PVA al 40 % de concentración y adición de zeolita al 7 % de concentración, lo cual es debido a la mejora de la densidad que se produce con este tratamiento; presentando diferencia significativa con los demás tratamientos. Para el módulo de elasticidad de flexión estática, se presentan los mayores aumentos del 31 %, y para compresión paralela al grano los mayores aumentos fueron del 7 % y 8 %; los cuales se obtuvieron mediante la aplicación de los tratamientos de impregnación de polietilenglicol (PEG) con peso molecular de 1500 y con alcohol polivinílico (PVA) tanto para las concentraciones de 20 % y 40 %, y con la adición de zeolita en las concentraciones de 3 % y 7 %; sin diferencias significativas, pero sí con los demás tratamientos.

En relación con estos resultados obtenidos en el módulo ruptura de flexión estática, exceden a los valores reportados para otras maderas blandas (Yildiz *et al.* 2005, Cai *et al.* 2007, Holloway *et al.* 2010, Luo *et al.* 2013, Sun *et al.* 2016). En relación a los resultados del módulo de elasticidad de flexión estática, son mayores a los informados para otras maderas blandas (Yildiz *et al.* 2005, Cai *et al.* 2007, Holloway *et al.* 2010, Luo *et al.* 2013, Olaniran *et al.* 2019). Los resultados obtenidos de la mejora en compresión paralela al grano, fueron iguales a las encontradas del 7 % y 8 % para otras maderas blandas (Yildiz *et al.* 2005, Luo *et al.* 2013, Sun *et al.* 2016). El aumento de las propiedades mecánicas, se debe principalmente al hecho de la reticulación de los polímeros dentro de las paredes celulares de la madera, con interacción intermolecular con la lignina.

Tabla 4: Flexión estática y compresión paralela al grano obtenidas en la madera de la especie forestal *Pinus oocarpa*, tratada con los métodos alternativos.

Condiciones	Flexión estática		Compresión paralela
	Módulo ruptura (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Módulo ruptura (MPa)
Control sin tratamiento	83,88 ± 9,17 a	11,37 ± 1,63 a	31,65 ± 3,25 a
Tratamiento 1	86,16 ± 1,37 a	12,24 ± 1,28 a	32,18 ± 0,36 ab
Tratamiento 2	85,72 ± 1,70 a	12,09 ± 1,38 a	32,06 ± 0,25 a
Tratamiento 3	85,32 ± 1,14 a	11,91 ± 0,53 a	31,92 ± 0,19 a
Tratamiento 4	85,40 ± 0,81 a	11,97 ± 1,29 a	32,00 ± 0,13 a
Tratamiento 5	86,89 ± 2,28 a	13,20 ± 1,56 b	32,36 ± 0,29 ab
Tratamiento 6	87,06 ± 2,36 a	13,38 ± 1,41 b	32,93 ± 0,13 c
Tratamiento 7	87,38 ± 2,53 a	14,07 ± 1,49 b	33,14 ± 0,14 c
Tratamiento 8	87,61 ± 0,70 a	13,65 ± 0,94 b	33,15 ± 0,10 c
Tratamiento 9	86,20 ± 0,94 a	12,08 ± 0,82 a	31,84 ± 0,24 a
Tratamiento 10	85,54 ± 1,19 a	11,85 ± 0,77 a	31,85 ± 0,19 a
Tratamiento 11	85,40 ± 1,26 a	11,94 ± 0,63 a	31,85 ± 0,21 a
Tratamiento 12	85,44 ± 0,65 a	11,87 ± 0,87 a	31,87 ± 0,20 a
Tratamiento 13	85,38 ± 1,20 a	11,86 ± 0,78 a	31,86 ± 0,22 a
Tratamiento 14	85,28 ± 0,86 a	11,83 ± 1,01 a	31,83 ± 0,21 a
Tratamiento 15	85,30 ± 0,71 a	11,81 ± 0,68 a	31,79 ± 0,25 a
Tratamiento 16	85,41 ± 0,55 a	11,83 ± 0,37 a	31,83 ± 0,10 a
Tratamiento 17	88,46 ± 0,41 a	14,89 ± 2,00 c	33,95 ± 0,14 d
Tratamiento 18	88,39 ± 0,37 a	14,81 ± 1,40 c	33,82 ± 0,33 d
Tratamiento 19	88,39 ± 0,38 a	14,83 ± 1,37 c	33,98 ± 0,26 d
Tratamiento 20	88,42 ± 0,38 a	14,85 ± 1,35 c	33,88 ± 0,16 d
Tratamiento 21	95,07 ± 1,76 b	14,86 ± 1,17 c	34,09 ± 0,15 d
Tratamiento 22	95,82 ± 0,77 b	14,91 ± 1,41 c	34,03 ± 0,27 d
Tratamiento 23	96,44 ± 0,62 bc	14,90 ± 1,14 c	34,11 ± 0,11 d
Tratamiento 24	100,43 ± 0,81 c	14,88 ± 1,15 c	34,21 ± 0,13 d

En el cuerpo de la tabla se muestran los valores promedio ± Intervalo de confianza al 95% de veinte probetas por tratamiento. Las letras iguales en las columnas indican la no diferencia significativas entre tratamientos, de acuerdo a la prueba de Rangos Múltiples de Tukey ($P \leq 0,05$).

CONCLUSIONES

La madera plantada *Pinus oocarpa* se sometió a diferentes tratamientos de impregnación de mezclas de PVA y PEG y se evaluó el efecto en algunas propiedades físicas y mecánicas. De acuerdo con la estabilidad dimensional mejorada, el aumento de las densidades seca al aire y básica, así como los aumentos de las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión paralela al grano, resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad en la flexión, la madera *Pinus oocarpa* se puede utilizar como alternativa a las maderas convencionales para diversas aplicaciones en las que no tenía uso anteriormente, después de los tratamientos de impregnación de PVA y PEG. Por lo tanto, la impregnación con polímeros proporciona un método alternativo a la modificación química, ofreciendo una nueva generación de materia prima de madera de alto valor agregado, con mayor estabilidad dimensional y mejores propiedades físicas y mecánicas, sin utilizar productos químicos contaminantes y sin riesgos a la salud humana y animal.

AGRADECIMIENTOS

A la Empresa de Cipreses de Colombia S.A. por la donación del material vegetal, al Laboratorio de Productos Forestales “Héctor Anaya López” de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, y a su personal por su apoyo y colaboración.

REFERENCIAS

Alma, M.; Hafi, Z.; Maldas, D. 1996. Dimensional stability of several wood species treated with vinyl monomers and polyethylene glycol-1000. *Int J Polym Mater* 32(1-4): 93–99. <https://dx.doi.org/10.1080/00914039608029385>.

Bardet, M.; Gerbaud, G.; Tran, Q.; Hediger, S. 2006. Study of interactions between polyethylene glycol and archaeological wood components by C-13 high-resolution solid-state CPMAS NMR. *J Archaeol Sci* 34(10): 1670–1676. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2006.12.005>.

Behr, G.; Bollmus, S.; Gellerich, A.; Militz, H. 2017. Improvement of mechanical properties of thermally modified hardwood through melamine treatment. *Wood Mater Sci Eng* 13(5): 262–270. <https://dx.doi.org/10.1080/17480272.2017.1313313>.

Berube, M.; Schorr, D.; Ball, R.; Landry, V.; Blanchet, P. 2017. Determination of In Situ Esterification Parameters of Citric Acid-Glycerol Based Polymers for Wood Impregnation. *J Polym Environ* 26(3): 970–979. <https://dx.doi.org/10.1007/s10924-017-1011-8>.

Bjurhager, I.; Ljungdahl, J.; Wallstrom, L.; Gamstedt, E.; Berglund, L. 2010. Towards improved understanding of PEG impregnated waterlogged archaeological wood: A model study on recent oak. *Holzfor-schung* 64(2): 243–250. <https://dx.doi.org/10.1515/hf.2010.024>.

Cai, X.; Riedl, B.; Zhang, S.Y.; Wan, H. 2007. Formation and properties of nanocomposites made up from solid wood, melamine-urea-formaldehyde, and clay. *Holzfor-schung* 61(2): 148–154. <https://dx.doi.org/10.1515/HF.2007.027>.

Chiozza, F.; Santoni, I.; Pizzo, B. 2018. Discoloration of poly(vinyl acetate) (PVAc) gluelines in wood assemblies. *Polym Degrad Stabil* 157: 90–99. <https://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.10.003>.

Cipreses de Colombia S.A. 2017. Resumen público plan de manejo forestal. Medellín, Colombia. <http://nucleosdemadera.com/wp-content/uploads/2017/10/RESUMEN-P%C3%9ABLICO-PLAN-DE-MANEJO-2017.pdf>.

Cooper, P.; Ung, Y.; Holzschere, A. 1991. Diffusion into and bulking of the wood cell wall with polyethylene glycols (PEG). In Proceedings IRG Annual Meeting, IRG/WP/3660. The International Research Group on Wood Protection: Stockholm, Sweden.

Devi, R.; Ali, I.; Maji, T. 2003. Chemical modification of rubber wood with styrene in combination with a crosslinker: effect on dimensional stability and strength property. *Bioresour Technol* 88(3): 185–188. [https://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00003-8](https://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00003-8).

Dong, X.; Zhuo, X.; Liu, C. 2016. Improvement of decay resistance of wood by in-situ hybridization of reactive monomers and nano-SiO₂ within wood. *Applied Environmental Biotechnology* 1(2): 56–62. <http://dx.doi.org/10.18063/AEB.2016.02.008>.

Ermeydan, M. 2018. Modification of spruce wood by UV-crosslinked PEG hydrogels inside wood cell walls. *React Funct Polym* 131: 100–106. <https://dx.doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2018.07.013>.

Gadhve, R.; Mahanwar, P.; Gadekar, P. 2019. Cross-linking of polyvinyl alcohol/starch blends by epoxy silane for improvement in thermal and mechanical properties. *BioResources* 14(2): 3833–3843. <https://dx.doi.org/10.15376/biores.14.2.3833-3843>.

Gardner, D.; Bozo, A. 2018. Ten-year field study of wood plastic composites in Santiago, Chile: biological, mechanical and physical property performance. *Maderas-Cienc Tecnol* 20(2): 257–266. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005002901>.

Giridhar, B.; Pandey, K.; Prasad, B.; Bisht, S.; Vagdevi, H. 2017. Dimensional stabilization of wood by chemical modification using isopropenyl acetate. *Maderas-Cienc Tecnol* 19(1): 15–20. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2017005000002>.

Gómez, H. 1989. *Estadística experimental con aplicaciones a las ciencias agrícolas*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín, Colombia.

González, M.; Honorato, J. 2005. Resistencia a la pudrición y estabilidad dimensional de la madera acetilada con y sin catalizador. *Madera y Bosques* 11(1): 49–61. <https://dx.doi.org/10.21829/myb.2005.1111261>.

Hill, C. 2006. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley & Sons, Ltd.,

West Sussex, England, pp 149–173.

Holloway, J.; Lowman, A.; Palmese, G. 2010. Mechanical evaluation of poly (vinyl alcohol)-based fibrous composites as biomaterials for meniscal tissue replacement. *Acta Biomater* 6(12): 4716–4724. <https://dx.doi.org/10.1016/j.actbio.2010.06.025>.

Jeremic, D.; Cooper, P.; Brodersen, P. 2007. Penetration of poly (ethylene glycol) into wood cell walls of red pine. *Holzforschung* 61(3): 272–278. <https://dx.doi.org/10.1515/HF.2007.068>.

Kang, H.; Lee, W.; Jang, S.; Kang, C. 2017. Polyethylene Glycol Treatment of Han-Ok Round Wood Components to Prevent Surface Checking. *BioResources* 12(2): 4229–4238. https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_12_2_4229_Kang_Polyethylene_Glycol_Treatment_Round_Wood.

Kocabaş, U. 2014. The Yenikapı Byzantine-Era Shipwrecks, Istanbul, Turkey: a preliminary report and inventory of the 27 wrecks studied by Istanbul University. *Int J Naut Archaeol* 44(1): 5–38. <https://dx.doi.org/10.1111/1095-9270.12084>.

Krause, A.; Jones, D.; Van derZee, M.; Miltitz, H. 2003. Interlace treatment—wood modification with N-methylol compounds. In Proceedings of the first European conference on wood modification. Ghent, Belgium.

Kwak, H.; Woo, H.; Kim, E.; H., Lee, K. 2018. Water-resistant Lignin/Poly(vinyl alcohol) Blend Fibers for Removal of Hexavalent Chromium. *Fiber Polym* 19(6): 1175–1183. <https://dx.doi.org/10.1007/s12221-018-8052-z>.

Lamprecht, H. 1990. *Silvicultura en los Trópicos: los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas; posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido*. Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn, Germany. 335p.

Li, Y.; Wang, B.; Fu, Q.; Liu, Y.; Dong, X. 2010. Performance of wood-polymer composite prepared by in situ synthesis of terpolymer within wood. *Appl Mech Mater* 34: 1165–1169. <https://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.34-35.1165>.

Li, W.; Wang, H.; Ren, D.; Yu, Y.; Yu, Y. 2015. Wood modification with furfuryl alcohol catalysed by a new composite acidic catalyst. *Wood Sci Technol* 49(4): 845–856. <https://dx.doi.org/10.1007/s00226-015-0721-0>.

Luo, S.; Cao, J.; Wang, X. 2013. Investigation of the Interfacial Compatibility of PEG and Thermally Modified Wood Flour/Polypropylene Composites Using the Stress Relaxation Approach. *BioResources* 8(2): 2064–2073. <https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/3468>.

Lutz, J.; Hoth, A. 2006. Preparation of ideal PEG analogues with a tunable thermosensitivity by controlled radical copolymerization of 2-(2-methoxyethoxy) ethyl methacrylate and oligo (ethylene glycol) methacrylate. *Macromolecules* 39: 893–896. <https://dx.doi.org/10.1021/ma0517042>.

Ma, H.; Yang, F.; Tang, L.; Feng Y. 2018. Effect of polyvinyl alcohol treatment on mechanical properties of bamboo/polylactic acid composites. *BioResources* 13(2): 2578–2591. https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_13_2_2578_Yang_Polyvinyl_Alcohol_Treatment_Bamboo.

Mattos, B.; Henrique, P.; Esteves, W.; Lazzarotto, M.; Gatto, D. 2015. Thermal tools in the evaluation of decayed and weathered wood polymer composites prepared by in situ polymerization. *J Therm Anal Calorim* 121(3): 1263–1271. <https://dx.doi.org/10.1007/s10973-015-4647-4>.

Meints, T.; Hansmann, C.; Gindl-Altmatter, W. 2018. Suitability of Different Variants of Polyethylene Glycol Impregnation for the Dimensional Stabilization of Oak Wood. *Polymers* 10(1): 81–93. <https://dx.doi.org/10.3390/polym10010081>.

Norma Técnica Colombiana. NTC. 2006. NTC 290: Maderas. Determinación de densidad. Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), Bogotá D.C., Colombia. <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC290.pdf>.

Norma Técnica Colombiana. NTC. 2006. NTC 663: Maderas. Determinación de la resistencia a la flexión. Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), Bogotá D.C., Colombia. <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC663.pdf>.

Norma Técnica Colombiana. NTC. 2006. NTC 784: Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión axial o paralela al grano. Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), Bogotá D.C., Colombia. <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC784.pdf>.

Ohmae, K.; Minato, K.; Norimoro, M. 2002. The analysis of dimensional changes due to chemical treatments and water soaking for hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) wood. *Holzforschung* 56(1): 98–102. <https://dx.doi.org/10.1515/HF.2002.016>.

Olaniran, S.; Michen, B.; Mora, D.; Wittel, F.; Bachtiar, E.; Burgert, I.; Rüggeberg, M. 2019. Mechanical behaviour of chemically modified Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.): Experimental mechanical studies on spruce wood after methacrylation and in situ polymerization of styrene. *Wood Sci Technol* 53(2): 425–445. <https://dx.doi.org/10.1007/s00226-019-01080-5>.

Paz, J.; Sanabria, E. 2000. Dimensional Stabilization of *Aspidosperma quebracho-blanco* with polyethylene glycol. In XXI IUFRO World Congress. Vol. 3, Malaysia. pp 236–237.

Rowell, R. 2006. Chemical modification of wood: a short review. *Wood Mater Sci Eng* 1(1): 29–33. <https://dx.doi.org/10.1080/17480270600670923>.

Rowell, R.; Youngs, R. 1981. *Dimensional stabilization of wood in use*. United States Department of Agriculture, USDA. Forest Products Laboratory, USA. Research note FPL-0243: 1–8. <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrn/fplrn243.pdf>.

Solikhin, A.; Hadi, Y.; Massijaya, M.; Nikmatin, S.; Suzuki, S.; Kojima, Y., Kobori, H. 2018. Properties of Poly (Vinyl Alcohol)/Chitosan Nanocomposite Films Reinforced with Oil Palm Empty Fruit Bunch Amorphous Lignocellulose Nanofibers. *J Polym Environ* 26(8): 3316–3333. <https://dx.doi.org/10.1007/s10924-018-1215-6>.

Sun, W.; Shen, H.; Cao, J. 2016. Modification of wood by glutaraldehyde and poly (vinyl alcohol). *Mater Des* 96: 392–400. <https://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.044>.

Tan, B.; Ching, Y.; Gan, S.; Ramesh, S.; Shaifulazuar, R. 2015. Biodegradable mulches based on poly (vinyl alcohol), kenaf fiber, and urea. *BioResources* 10(3): 5532–5543. https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_10_3_5532_Tan_Biodegradable_Mulches_Kenaf_Fiber_Urea.

Unsal, O.; Candan, Z.; Korkut, S. 2011. Wettability and roughness characteristics of modified wood boards using a hot-press. *Ind Crops Prod* 34(3): 1455–1457. <https://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.04.024>.

Xiao, Z.; Chen, H.; Mai, C.; Militz, H.; Xie, Y. 2018. Coating performance on glutaraldehyde-modified wood. *J For Res* 30(1): 353–361. <https://dx.doi.org/10.1007/s11676-018-0620-y>.

Yang, M.; Chen, X.; Lin, H.; Han, C.; Zhang, S. 2018. A simple fabrication of superhydrophobic wood surface by natural rosin based compound via impregnation at room temperature. *Eur J Wood Wood Prod* 76(5): 1417–1425. <https://dx.doi.org/10.1007/s00107-018-1319-7>.

Yildiz, Ü.; Yildiz, S.; Gezer, E. 2005. Mechanical properties and decay resistance of wood-polymer composites prepared from fast growing species in Turkey. *Bioresour Technol* 96(9): 1003–1011. <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.010>.

Yu, L.; Zhang, Y.; Zhu, L.; Ma, X. 2018. Effects of nano-SiO₂/Polyethylene glycol on the dimensional stability modified ACQ treated southern pine. *Wood Res* 63(5): 763–770. <http://www.woodresearch.sk/wr/201805/03.pdf>.

Zheng, Q.; Cai, Z.; Gong, S. 2014. Green synthesis of polyvinyl alcohol (PVA)-cellulose nanofibril (CNF) hybrid aerogels and their use as superabsorbents. *J Mater Chem A* 2(9): 3110–3118. <https://dx.doi.org/10.1039/C3TA14642A>.