

TRATAMIENTO QUÍMICO DE ACETILACIÓN EN MADERA DE *PINUS RADIATA* CHEMICAL ACETYLATION TREATMENT IN *RADIATA PINE WOOD*

R. Garay,¹ M. Henríquez²

RESUMEN

Al saturar la pared celular de la madera con anhídrido acético, se reemplazan los grupos hidroxilos libres de las macromoléculas celulosa y hemicelulosa. Con ello se logra rellenar los espacios moleculares con grupos acetilo y así evitar que éstos reaccionen con las moléculas de agua o con los complejos enzimáticos de los hongos de pudrición. Así, se produce la muerte de los hongos por falta de alimento. Con esta modificación química de la madera también se ha mejorado la estabilidad dimensional y la resistencia a agentes xilófagos. Bajo esta premisa, se evaluó el tratamiento químico de acetilación para la protección de madera de *Pinus radiata* D. Don. Se empleó una metodología en condiciones de laboratorio que permitió determinar el efecto de la acetilación sobre las propiedades de: contenido de humedad; densidad; absorción de agua; estabilidad dimensional y biodegradación por hongos en madera de *Pinus radiata* D. Don.

Se trabajó con dos tiempos de inmersión en anhídrido acético y dos tiempos en autoclave logrando ganancias en peso que fueron desde 6 a 20%. Se mejoraron algunas propiedades de la madera del *Pinus radiata* D. Don, tales como: a) la resistencia a la degradación producto de la acción de hongos de pudrición café, dado que las pérdidas de peso en las maderas acetiladas fueron desde 1.38% a 17.43% en comparación con la madera control que alcanzó un 64.94%, con el mismo hongo; b) Con un hongo de pudrición blanca se obtuvieron valores de pérdida de peso en madera acetilada que fueron entre 2.96% y 9.12% en comparación con madera no acetilada que exhibió sólo 17.9%, tras cuatro meses de exposición. Además, se mejoraron las propiedades de estabilidad dimensional y absorción de agua.

Palabras claves: Acetilación, degradación natural, estabilidad dimensional, *Pinus radiata*

ABSTRACT

When woody cell wall is saturated with acetic anhydride, the free hydroxyl groups present on cellulosic structures are replaced. Thus, the capillary spaces are filled with acetyl groups and this replacement avoids further reactions with water or enzymatic degradation provoked by rot fungi. So, the death of different fungi is produced by the lack of food. It has been observed too that this chemical modification has improved the dimensional stability and the resistance to xylophages agents. Under this premise, we conducted a research in order to test acetylation of *Pinus radiata* D. Don wood as a strategy for their protection. An experimental methodology was used under laboratory conditions

¹ Departamento de Ingeniería de la Madera y sus biomateriales, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. Santiago. Chile

² Ingeniero de la Madera, Departamento de Ingeniería de la Madera y sus biomateriales, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. mhenriquezavalos@gmail.com

Autor para correspondencia: rgaray@uchile.cl

Recibido: 16.03.2011 Aceptado: 29.10.2011

to determine the effect of the acetylation on some properties such as: water content; density, water uptake; dimensional stability and biodegradation provoked by rot fungi in *Pinus radiata* D. Don.

Two immersion times of pine wood on acetic anhydride and two times in autoclave were tested (30 and 60 minutes). Thus, observed weight gains ranged between 6 and 20%. We also noted the improvement of other properties such as: a) the resistance to the degradation provoked by brown rot fungi, because in treated wood the weight losses ranged between 1.38% and 17.43% in comparison to control samples which reached 64.94% when the same fungi strain was used; b) when a white rot fungi strain was tested, weight losses ranged between 2.96% and 9.12% for acetylated samples in comparison to untreated pieces which showed 17.9% after 4 months of incubation. Furthermore, the dimensional stability and water absorption capacity improved.

Keywords: Acetylation, dimensional stability, natural decay, oriented strand board, *Pinus radiata*

INTRODUCCIÓN

La madera como principal recurso renovable forma parte de las constantes transformaciones que ocurren dentro de un ecosistema, por lo tanto su biodegradación es un fenómeno que se debe considerar para decidir sus condiciones de uso (Rowell 2005). Como es un material higroscópico, es capaz de adaptarse a variados ambientes, en ocasiones sus propiedades físicas se afectan más allá de lo admisible en condiciones severas de exposición (Garay 2009c). Presenta numerosas ventajas como material de construcción, tales como: excelentes características de habitabilidad y resistencia sísmica; calidez; rapidez de construcción; fácil transporte; buena aislación térmica, trabajabilidad y adhesividad; además de poseer menores costos.

La madera está compuesta fundamentalmente por polímeros de celulosa, hemicelulosas y lignina, los cuales son responsables de su comportamiento físico y químico. Éstos se degradan continuamente por diferentes agentes abióticos y bióticos, produciendo inestabilidades dimensionales debido a la absorción y desorción de agua; por la radiación ultravioleta que provoca rupturas en los polímeros y por microorganismos. No obstante, es posible el empleo de variados procesos para mejorar las propiedades de la madera, de forma que puedan ser utilizadas en condiciones adversas. La modificación química de los polímeros de la pared celular de la madera, es un método efectivo que constantemente se está estudiando. El tratamiento que utiliza anhídrido acético, es uno de los más importantes debido a que sus resultados son consistentes. Este procedimiento se denomina acetilación y ya es practicado a escala comercial en Japón, Estados Unidos, Suecia, Dinamarca, Holanda, Inglaterra y Nueva Zelanda, tanto en la acetilación de madera sólida como en la de fibras de madera.

La madera, en condiciones desfavorables, puede ser dañada y destruida fácilmente por factores bióticos como hongos, insectos y horadores marinos, y/o por factores abióticos, como las condiciones ambientales (humedad relativa, lluvia, radiación UV, etc.). Los agentes bióticos pueden atacar de muchas maneras usando la madera para su alimentación y refugio (Islam *et al.* 2008). Éstos utilizan como alimento a los polímeros de la pared celular como celulosa, hemicelulosas y lignina, ya que contienen sistemas complejos y específicos de enzimas que logran producir degradaciones oxidativas e hidrólisis, transformando la madera en unidades asimilables. Los factores abióticos, o del medio, producen en las estructuras de la madera foto-oxidación por radiación ultravioleta y erosión a nivel superficial (efecto del viento y la lluvia), generando depolimerización o fragmentación de la lignina, con lo cual se facilita la acción de los organismos bióticos (Garay *et al.* 2009b). Así, es la propia naturaleza quien programa las estrategias para reciclar la madera de una manera oportuna,

debido a la ocurrencia de diferentes degradaciones biológicas, térmicas, fotoquímicas, químicas y mecánicas (Simonson y Rowell 2000, Rowell 2005). Por lo general las maderas de crecimiento rápido tienden a deteriorarse más prontamente, en virtud de las influencias biológicas y físicas que las afectan; en particular, la albura de la mayoría de las especies tiene una baja durabilidad. Además, la evolución del comportamiento que estos materiales presentan en el tiempo y las condiciones de protección superficial que requieren, es un tema que aún no está resuelto, debido a que las costumbres y los costos involucrados en soluciones habitacionales son distintas en países desarrollados y en vías de desarrollo (Garay 2006, Garay *et al.* 2009a, Garay y Henríquez 2010), lo que implica que a la hora de realizar una construcción se prefieran otros tipos de materiales estructurales, como el hormigón y el acero, basado no en criterios técnicos, sino culturales o económicos.

Para seleccionar tratamientos ideales de preservación para madera, es necesario precisar el destino de su uso y los requerimientos particulares de durabilidad para que pueda resistir la acción de los diferentes agentes degradadores, una vez puesta en el lugar de servicio. Es por esta razón, que existen diferentes tipos de tratamientos preservantes. Estos tratamientos buscan entregarle a este material un uso extendido y mejorar sus condiciones, mediante la aplicación de productos que actúen como protectores, tanto en la superficie como en sus estructuras internas (SAWPA 1988). Su efectividad depende de diferentes factores (Garay 2006, 2007, 2009c, 2009d, Garay *et al.* 2009a, Garay *et al.* 2009b), como por ejemplo la formulación química, para ser utilizados con agua o solventes derivados del petróleo. En ocasiones se utilizan cosolventes, tales como aminas o amoníaco para mantener uno o más de los ingredientes activos en la solución. Cada preservante tiene ventajas y desventajas que dependen del método de aplicación, el contenido de humedad, su retención y la profundidad de penetración, además de su distribución dentro de las estructuras de la madera. En este caso, la proporción de albura/duramen es un factor a considerar ya que, la albura de la mayoría de las especies comerciales es de más fácil penetración, siendo las especies no refractarias o más permeables las más receptivas a la impregnación en comparación a las especies de maderas refractarias (Groenier y Lebow 2006, Islam *et al.* 2008).

También para garantizar la durabilidad de la madera y sus derivados a largo plazo es que, generalmente, se recubre con pinturas decorativas opacas y semitransparentes (Deglise *et al.* 2005, Garay 2009c, 2009d). La aplicación de estos recubrimientos superficiales no es la única solución que lleva a resolver adecuadamente el tema de la protección física y estética de estos materiales, que es necesaria para su correcto funcionamiento (Garay *et al.* 2009b, Garay y Henríquez 2010). Estudios de la meteorización o envejecimiento acelerado de los sistemas de recubrimiento en la madera han demostrado que la protección no sólo depende del recubrimiento, sino también del sustrato y en particular, de la interfaz entre el material y el producto protector (Garay *et al.* 2009a, Garay *et al.* 2009b). Por lo tanto, la madera sin protección o con protección deficiente está sujeta a nivel macroscópico a decoloraciones, pérdida de brillo, rugosidad superficial y agrietamiento, y a nivel microscópico principalmente craquelación de los polímeros de lignina, causando finalmente un desgaste en las cadenas de celulosa (Deglise *et al.* 2005).

El tratamiento con anhídrido acético ha sido la reacción más estudiada, en cuanto a su efecto tanto en la madera como en fibras, hojuelas o chapas (González 2006). Este consiste en la sustitución de los grupos hidroxilos de la pared celular, los que permiten la liberación y absorción de agua, por acetilos de mayor peso molecular (González 2003).

Por lo tanto, la degradación provocada por las reacciones químicas (hidrólisis, oxidación, deshidratación y reducción) logran prevenirse, o al menos retardarse, al alterar químicamente las paredes celulares de las fibras de la madera con este compuesto, incidiendo principalmente en la estabilidad dimensional y biodegradabilidad (Rowell y Simonson 2004).

Se plantea esta investigación para evaluar el tratamiento químico de acetilación para la protección de madera de *Pinus radiata* D. Don, se pretende desarrollar un método experimental que permita la acetilación de la madera. Con lo cual se buscará determinar el efecto sobre las propiedades de densidad, estabilidad dimensional y la biodegradación por hongos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Se utilizaron bloques de madera de pino radiata proveniente de un solo proveedor para evitar variaciones intrínsecas de la especie debido a su procedencia. Los bloques fueron acondicionados y cortados en diferentes dimensiones para facilitar la posterior extracción de las probetas utilizadas en los distintos ensayos.

Se dispuso de 81 probetas de 2.5 x 2.5 x 10 cm para la determinación de las propiedades físicas, según la norma NCh. 176/1. Of. 1984 y NCh. 176/2. Of. 1986. Modificada en 1988. Para el ensayo de estabilidad dimensional se empleó la metodología descrita por Rowell y Youngs (1981).

Se contó con 138 probetas de 0.9 x 2.5 x 2.5cm, superficie de 21.5 cm², para evaluar la degradación natural de la madera, según la norma ASTM D 2017- 81. Para el ensayo de comportamiento frente al agua se utilizó el método Wicking tests (Zhang *et al.* 2007).

Para la acetilación de la madera, se utilizó anhídrido acético (C₄H₆O₃) provisto por la empresa J. T. Baker, de concentración 99.8% y peso molecular 102.09. Presenta un riesgo principal como corrosivo y nocivo además de un riesgo secundario como combustible y reactivo, conforme al código Winkler.

Para el ensayo de degradación de la madera se utilizaron dos hongos, uno de pudrición blanca y uno de pudrición café, *Pleurotus ostreatus* (Jaq. *Quél r.*) y *Poria monticola* Murr. *on Chir (L: F)* respectivamente. Ambas cepas pertenecen a la micoteca del Laboratorio de Biodeterioro y Preservación, del Departamento de Ingeniería en Madera y sus Biomateriales, de la Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile.

El equipo experimental para el tratamiento de acetilación consistió de un cilindro de impregnación, de 1 m de alto x 0.3 m de diámetro, un compresor, una autoclave (Baird y Tatlock Ltd. Chadwell Heath, Essex), estufa de secado (Memmert Karl Kolb, 854 schwabach; w-Germany) y una balanza digital (Adventure, Ohaus, con capacidad para 210g y precisión de 0.01g). Para los ensayos de biodeterioro se usó una cámara de incubación (Incubator 417-11, Lab-line Instrument, Inc.) y una campana de flujo laminar (Micro Flow/ Laminar Flow Workstation, Arquimed).

Método

El procedimiento aplicado para la acetilación de las muestras se desarrolló y adaptó en base a los antecedentes recopilados de investigaciones realizadas por Rowell y Youngs (1981), Rowell y Simonson (2004) y Rowell (2005, 2006). La evaluación de las propiedades se realizó en base a normativas vigentes, las cuales se detallan en cada ensayo especificado más adelante.

El contenido de humedad de la madera se ajustó a 4%, usando una estufa a 103 ± 2°C, según la norma Chilena NCh. 176/1. Of. 1984. Las probetas fueron pesadas antes del inicio del tratamiento de acetilación. El tratamiento con anhídrido acético se realizó en un cilindro de acero para impregnación, en cuyo interior se colocó un tubo de PVC, para evitar la corrosión de los metales. Las probetas

se dispusieron dentro del tubo y se les aplicó una presión de 6.5 kg/cm². De esta forma, se introdujo el anhídrido acético dentro de la madera, lo que se vio favorecido por el bajo porcentaje de humedad que contenía. Se probaron dos tiempos de tratamiento, 30 y 60 minutos (I1 e I2 respectivamente). Luego se sacaron del cilindro de impregnación y se estilaron para retirar el remanente de producto. A continuación, las probetas se introdujeron en un recipiente hermético dentro de una autoclave que operó a 120 °C y 1 atmósfera de presión. Se consideraron dos tiempos de tratamiento de 1 y 3 horas (A1 y A2 respectivamente), así se provocó el reemplazo de los grupos hidroxilos y la posterior fijación de los grupos acetilos, dentro de las estructuras de la pared celular de la madera. Para ambos tiempos se utilizaron probetas provenientes de I1 e I2. Por lo tanto, se obtuvieron cuatro grupos de tratamientos, con dos repeticiones (Tabla 1). Al terminar esta etapa, las probetas se pesaron y se llevaron a estufa a 80 ± 2°C por 24 horas, de esta forma se eliminaron posibles remanentes del producto y los hidroxilos libres que puedan haber permanecido en la superficie de las probetas. Por último, se procedió a pesar cada una de ellas para determinar la ganancia en peso provocada por la modificación química de la madera.

Tabla 1. Agrupación de acuerdo a tratamiento

Tiempo de tratamiento		Autoclave	
		3 horas	1 hora
Inmersión	30min	[I1 / A1] _A	[I1 / A2] _B
	60min	[I2 / A1] _C	[I2 / A2] _D

Para todas las propiedades evaluadas se consideraron 10 probetas como muestras testigos sin tratamiento, contra las cuales se realizaron las comparaciones.

Wicking Test, comportamiento frente al agua en madera de *Pinus radiata* (D. Don). Este método consistió en medir, la capacidad de absorción del agua por capilaridad de la madera en probetas tratadas y no tratadas con anhídrido acético. Se utilizaron 10 muestras por tratamiento de 2.5 x 2.5x1 cm. Estas, fueron sumergidas a 1 mm de profundidad en un vaso precipitado con 150 ml de agua durante 5 horas. Luego en una balanza analítica de 0.01g de precisión se midió la pérdida de peso del agua contenida en el vaso, lo cual equivale a la absorción que experimentaron las probetas durante el ensayo (Zhang *et al.* 2007).

Densidad de la madera. Se determinó el peso y volumen de la probeta con una precisión de 0,01 g. Se utilizaron 10 probetas de 10x2x2 cm, con dos repeticiones por tratamiento (Norma Chilena Nch. 176/2. Of. 86 Mod. 1988).

Contenido de Humedad de la madera. Se determinó la pérdida de peso de la probeta cuando se seca hasta peso constante. Se utilizaron 10 probetas de 10x2x2 cm, con dos repeticiones por tratamiento (Norma Chilena Nch. 176/1. Of. 84).

Ganancia en peso. Se determinó la ganancia porcentual en peso (GP%) de la madera por efecto del tratamiento de modificación química con anhídrido acético. Se midió el peso anhidro de la madera antes del tratamiento y se comparó después con el peso de las probetas secadas en estufa hasta peso constante.

Estabilidad dimensional de la madera. La estabilidad dimensional de la madera acetilada fue determinada mediante la estimación del coeficiente de hinchamiento volumétrico (S) y por la eficiencia frente al hinchamiento (ASE). Para esto, se utilizaron 10 probetas 10x2x2 cm, con dos repeticiones por tratamiento. Éstas fueron sumergidas en agua destilada dentro de un vaso de precipitado y se colocaron en un desecador, en donde se les aplicó vacío durante 30 minutos. Luego se sumergieron en agua destilada por 1 hora y se volvió a aplicar vacío por 30 minutos más. Posteriormente, se dejaron sumergidas nuevamente sin vacío, pero en esta ocasión por 24 horas. Se les determinó peso y volumen, se secaron en estufa hasta peso y volumen constante, siguiendo la metodología sugerida por Rowell y Youngs (1981).

Este procedimiento se aplicó tanto para madera acetilada como para madera sin acetilar. Finalmente, se determinó la eficiencia frente al hinchamiento (ASE) mediante la comparación del coeficiente de hinchamiento de la madera no tratada y el de la madera acetilada.

Ensayo de biodegradación de la madera. El método normalizado y utilizado para el ensayo acelerado de resistencia a la descomposición natural de las maderas, está descrito en la norma ASTM D2017-81 (Reapproved 1994), el que permite estimar la capacidad de una especie de madera para resistir la acción de un determinado hongo a través de la pérdida de peso (%), clasificándola de acuerdo a clases de resistencia en: muy resistente, resistente, moderadamente resistente y ligeramente resistente o no resistente.

Para este experimento se utilizaron 10 bloques de 2.5x2.5x0.9 cm, con dos repeticiones por tratamiento, además de 16 muestras de referencia de las mismas dimensiones, las que fueron expuestas a la acción de dos hongos: *Pleurotus ostreatus* (Jaq.) Quérl.) (Pudrición blanca); y *Poria monticola* Murr. on Chir (L: F) (Pudrición café). Estos hongos fueron cultivados en placas petri con medio agar-malta a pH 6. Se dispuso de 15ml de mezcla por placa, y fueron incubados por 5 semanas de manera que el micelio cubriera toda la superficie de la placa. Las probetas luego se introdujeron en un frasco de 500cc, en donde se había preparado un suelo con una mezcla 40% de tierra de hoja reforzada comercial y un 60% de tierra de hoja proveniente del vivero de la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, perteneciente a la Universidad de Chile y mantenido en una cámara de incubación por un período de 14 semanas.

El ensayo de degradación de la madera continuó hasta que las probetas alcanzaron aproximadamente un 60% de pérdida de peso, valor fijado por la norma para poner término al experimento.

El diseño estadístico empleado en esta experiencia corresponde a un modelo bifactorial completamente aleatorio de efectos fijos, DCA de 2 factores, tiempo de impregnación y tiempo de autoclavado (Montgomery 1991). El software empleado corresponde a Statgraphics 3.

RESULTADOS

En la tabla 2 se observa un resumen de las propiedades que presentó la madera de *Pinus radiata* D. Don en todos los ensayos realizados en esta investigación, como el tamaño de las probetas empleadas es distinto, dependiendo del ensayo, se presentan agrupados de acuerdo a las dimensiones de las probetas.

Tabla 2. Propiedades evaluadas en madera de *Pinus radiata* D. Don. (Promedio/desv.es.)

Propiedades de la Madera	Tratamientos [inmersión bajo presión /autoclave]				
	Testigo	30min / 3h	30min / 1h	60min / 3h	60min / 1h
<u>Probetas de 2,5 x 2,5 x 10cm.</u>					
Ganancia en Peso [%]	---	17.41 _{/3.79}	19.82 _{/5.31}	17.69 _{/3.94}	17.11 _{/3.90}
Contenido de Humedad [%]	10.31 _{/0.3}	7.76 _{/0.69}	7.14 _{/0.64}	6.03 _{/0.40}	6.51 _{/0.44}
Densidad Anhidra [kg/m ³]	525.53 _{/20.80}	570.10 _{/22.21}	583.08 _{/32.46}	554.31 _{/18.54}	555.87 _{/16.53}
<u>Estabilidad Dimensional:</u>					
Coef. Hinchamiento Volumétrico[%]	17.01 _{/2.67}	12.97 _{/2.93}	13.12 _{/3.67}	32.91 _{/5.62}	35.62 _{/8.55}
ASE [%]	---	23.70 _{/17.23}	22.84 _{/21.58}	-93.55 _{/33.02}	-109.97 _{/50.25}
<u>Probetas de 2.5 x 2.5 x 0.9cm.</u>					
Ganancia en Peso [%]	---	17.73 _{/8.80}	21.53 _{/6.99}	20.53 _{/11.20}	8.94 _{/1.42}
Wicking Test [%] (aumento en peso luego de 5h de ensayo)	51.91	46.28	46.26	43.78	53.36
<u>Degradación Natural:</u>					
Pérdida de Peso [%] (<i>Poria monticola</i> Murr. On Chir. (L: F))	64.94 _{/0.52}	15.38 _{/12.16}	6.38 _{/3.58}	1.38 _{/1.83}	17.43 _{/15.23}
Pérdida de Peso [%] (<i>Pleurotus ostreatus</i> (Jaq. Quel r.))	17.90 _{/7.04}	2.96 _{/2.34}	5.85 _{/0.90}	5.39 _{/4.04}	9.12 _{/4.14}
Clase de Resistencia a:					
<i>Poria monticola</i> Murr. On Chir. (L: F)	Muy poco resistente	Resistente	Muy Resistente	Muy Resistente	Resistente
<i>Pleurotus ostreatus</i> (Jaq. Quel r.)	Resistente	Muy Resistente	Muy Resistente	Muy Resistente	Muy Resistente

Además en la tabla 3 se presenta un resumen de la significancia estadística de los factores e interacciones para las propiedades evaluadas.

Tabla 3. Significancia estadística de los factores analizados para madera de *Pinus radiata* D. Don

Propiedades madera acetilada de <i>Pinus radiata</i> D. Don.	Factores Coeficiente f/P-valor		
	Inmersión [X]	Autoclave [Y]	Interacción [XY]
<u>Probeta de 2.5 x 2.5 x 10cm</u>			
Contenido de Humedad [%]	27.4/0.00	0.09/0.77	5.92/0.025
Densidad Anhidra [kg/m ³]	126.2/0.00	0.09/0.77	1.06/0.308
<u>Estabilidad dimensional:</u>			
Coef. Hinchamiento volumétrico [%]	170.7/0.00	0.77/0.39	0.62/0.43
ASE [%]	170.7/0.00	0.77/0.39	0,62/0.43
<u>Probeta de 2.5 x 2.5 x 0.9cm.</u>			
Wicking Test [aumento en peso luego de 5hrs. de ensayo]	1.32/0.26	3.09/0.82	0.22/0.63
<u>Degradación natural:</u>			
Pérdida de peso [%] (<i>Poria monticola</i> Murr. on Chir (L: F))	0.15/0.7	0.38/0.86	11.1/0.03
Pérdida de peso [%] (<i>Pleurotus ostreatus</i> (Jaq. Qué l r.))	5.72/0.03	7.71/0.01	0.12/0.73

Para determinar la efectividad del tratamiento de acetilación, se comprobó el porcentaje de ganancia en peso que se produce en la madera de *Pinus radiata* D. Don. En este sentido, la variabilidad que se observó se atribuye a la utilización de dos dimensiones iniciales, consideradas en la metodología para objeto de facilitar el proceso de acetilación. Por lo tanto se obtienen dos grupos de ganancias en peso, las que van desde un 17 a 19% (para probetas de 15 x 6.5 x 2 cm) y los que alcanzan valores aproximados entre 9 a 21% (en probetas de 20 x 0.9 x 9 cm). A menores espesores se observaron mayores ganancias de peso.

Al comparar los resultados con los obtenidos por Rowell (2005) para madera de *Pinus radiata* D. Don, quien investigó tiempos de reacción desde 60 a 360 minutos, se observa que existe similitud en los valores de ganancia en peso para 60 minutos de tiempo de reacción en fase líquida, ya que obtiene un 17.2%, mientras que en la presente investigación se obtuvieron valores en el rango de 17 a 21%, tanto para 30 como para 60 minutos.

Por su parte, Beckers *et al.* (2003), lograron ganancias en peso en *Pinus sylvestris* (Scots pine), *Picea abies* (Norway spruce) y *Fagus sylvatica* (Beech) entre 16 y 20%, lo que también es concordante con la ganancia en peso obtenida para *Pinus radiata* D. Don en esta investigación.

En contenido de humedad, se observan diferencias significativas al comparar la madera acetilada, con la madera sin tratamiento, por lo que se comprueba el efecto hidrofóbico que le infiere el tratamiento de acetilación a la madera. En este sentido, Rowell (2005) para madera de *Pinus radiata* D. Don con una humedad relativa del 30% y a una temperatura de 27°C, alcanza un 2.4% de contenido de humedad para madera acetilada, con 20.4% de ganancia en peso, en comparación a un contenido de humedad de 5%, que obtiene con la madera testigo. Estos resultados son similares a los encontrados en el presente estudio. Por su parte, Bongers *et al.* (2005), obtiene para madera de *Pinus radiata* D. Don, un contenido de humedad de 5.2%, para madera con un 20% de ganancia en peso.

La densidad de la madera logra reflejar también, el efecto de la acetilación, ya que al aumentar el peso de las probetas, consecuentemente, aumenta la densidad. Bongers *et al.* (2005), obtiene para madera de *Pinus radiata* D. Don una densidad anhidra de 492 kg/m³ en madera acetilada, mientras que la madera testigo registró una densidad de 411 kg/m³. De acuerdo a los resultados informados por la empresa Titan Wood Limited (2007), la densidad de la madera de *Pinus radiata* D. Don acetilada es de 543 kg/m³ y 440 kg/m³ en madera testigo. La madera utilizada por la presente investigación presenta una mayor densidad (Tabla 2) tanto en maderas testigos como acetilada, sin embargo se refleja el mismo comportamiento, en cuanto al aumento de densidad.

La variabilidad dimensional de la madera de *Pinus radiata* D. Don, se midió por medio de la eficiencia frente al hinchamiento (ASE %), en este caso, los resultados que se obtienen son menores a lo que obtiene Rowell (2006), cuyo resultado de eficiencia frente al hinchamiento fue de 70.3%, para una ganancia en peso de 20.5%, en relación a la madera no tratada, lo que indica que cerca de $\frac{3}{4}$ del volumen de la madera de *Pinus radiata* D. Don acetilada no produce variación volumétrica, con lo que obtiene un consistente comportamiento frente a la acción del agua. En un trabajo de Tarkow y Stamm (1955), se obtienen diferentes eficiencias frente al hinchamiento para las especies *Picea sitchensis* (Sitka Spruce), *Betula alleghaniensis* (Yellow Birch) y *Acer saccharum* (Sugar Maple), cuyas eficiencias frente al hinchamiento fueron 71, 72 y 73% respectivamente, similar a lo que obtiene Rowell (2006), para madera de *Pinus radiata* D. Don.

En la degradación natural de la madera de *Pinus radiata* D. Don, se midió la resistencia frente a la acción de hongos de pudrición café y blanca, los resultados demuestran consistencia con los obtenidos por otros autores, ya que las maderas acetiladas frente a la madera sin tratamiento registra valores más bajos en pérdida de peso. Rowell (2006), obtiene para madera de *Pinus radiata* D. Don

pérdidas de peso provocada por un hongo de pudrición café de 1.7% y para hongo de pudrición blanca observa un 1.1%, para madera acetilada con un 17.8% de ganancia en peso. Los resultados que alcanza este autor, referente a la pérdida de peso son ligeramente más bajos que los que se alcanzan en la presente investigación, pero igualmente se logran reducciones importantes de pérdida de peso en las maderas acetiladas.

CONCLUSIONES

Se concluye que el tratamiento de acetilación aplicado a madera de pino radiata causa efectivamente un mejoramiento de las propiedades evaluadas en este estudio. Para resaltar tales diferencias se concluye que el tratamiento más efectivo fue 30min de inmersión en anhídrido acético y 1 hora de autoclave, por lo que las conclusiones se presentan en base a esos resultados.

El contenido de humedad presentó una variación desde 10.3% para el testigo a 7.14% en madera acetilada y la absorción de agua, en el ensayo wicking test, varió de 51.9% en testigo a 46.26% en madera acetilada.

En variabilidad dimensional, se lograron menores niveles de hinchamiento volumétrico, de 17% en testigo pasó a 13.12% en madera de pino radiata acetilada. Por su parte, la densidad de la madera se vio influenciada por la ganancia en peso desde 525 kg/m³ en testigo pasó a 583 kg/m³ en madera acetilada.

En la evaluación de la degradación natural se concluyó que aumenta la resistencia a la degradación natural frente al ataque de los hongos estudiados. En probetas testigos la pérdida de peso por *Poria monticola* Murr. on *Chir (L: F)* (Pudrición café), fue de 64.94%, mientras que en la madera acetilada alcanzó a 6.38% solamente. Para *Pleurotus ostreatus* (Jaq.) *Quél r.* (Pudrición blanca), en madera no acetilada la pérdida de peso llegó a 17.9% y en madera acetilada sólo fue de 5.85%.

La propiedad más directa para evaluar la efectividad del tratamiento de acetilación es la ganancia en peso, en este estudio se obtuvieron valores similares a la informada en la bibliografía (alrededor de 20%), siendo mayor en madera de dimensiones menores, 19,8% para probetas de 2.2x2.2x10 cm y 21.53% para probetas de 2.2x2.5x0.9 cm.

BIBLIOGRAFIA

ASTM, **American Society for Testing and Material. 1994.** Standard Method of Accelerated Laboratory Test of Natural Decay Resistance of Woods. In: ASTM Annual book of Standards American, Vol. 04.10 Wood. Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA. D 2017- 81 (Reapproved 1994), pp 324-328.

Beckers, E.P.J.; Militz, H.; Sander, C.; Veenendaal, W. 2003. Analysis of acetylated wood by electron Microscopy. *Wood Sci. Technol.* 37(1): 39-46

Bongers, F.; Jorissen, A.; Homan, W.; Kattenbroek, B. 2005. The influence of acetylation of Radiata pine in structural sizes on its strength properties. European Conference on Wood Modification. Gottingen, Germany. p.112.

Deglise, X.; George, B.; Merlin, A.; Suttie, E.; 2005. Photodegradation and photostabilisation of wood- the state of the art. *Polymer Degradation and Stability* 88 (2): 268-274.

Garay, R. 2006. Recubrimientos superficiales para tableros de uso exterior. Revista Protecma. Esinal ediciones. CIDEMCO España. Febrero 2006 29: 16-22.

Garay, R. 2007. Impregnantes tipo lasur para la protección de la madera y tableros. Abril 2007. *Agro-Ciencia* 23(1): 25-36, 2007. ISSN 0716-1689. ISSN 0718-3216. Universidad de Concepción. Concepción. Chile.

Garay R.; Poblete H.; Karsulovic J. 2009a. Evaluation of oriented strandboard and plywood subjected to severe relative humidity and temperature conditions. *Forest Prod. J.* 59(3): 84-90.

Garay, R.; Rallo, M.; Carmona, R.; Araya, J. 2009b. Characterization of anatomical, chemical, and biodegradable properties of fibers from corn, wheat, and rice residues; *Chilean Journal of Agricultural Research* 69(3): 406-415.

Garay, R. 2009c. Efectos de dos protectores superficiales en las propiedades de tableros de madera después de 1 año de exposición a la intemperie. *Información Tecnológica* 20(4): 123-130.

Garay, R. 2009d. Propiedades de tableros estructurales contrachapados y OSB intemperizados durante dos años. *Agro-Ciencia* 25(1): 20-32.

Garay, R.; Henríquez, M. 2010. Comportamiento al fuego de tableros y madera de pino radiata d. Don con y sin pintura retardante de llama. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 12(1): 11-24.

González, M. A. 2003. Investigación en madera tratada. [en línea] *Revista AITIM, Asociación de Investigación Técnica de la Madera. Boletín de información Técnica* N° 224, julio-agosto [en línea] <<http://infomadera.net/images/13679.pdf>> [consulta: 20 de octubre 2007].

González M. A. 2006. Acetilación, sustitutivo de biocidas. [en línea] *Revista AITIM, Asociación de Investigación Técnica de la Madera. Boletín de información técnica*, N° 240. marzo-abril [en línea] <<http://infomadera.net/images/23458.pdf>> [consulta: 08 de agosto 2007].

Groenier, J.; Lebow, S. 2006. Preservative- Treated Wood and Alternative Products in the Forest Service. USDA Forest Service, Technology and Development Program Missoula, MT. TE42G01, 44p.

INN, Instituto Nacional de Normalización. 1984. Madera-parte 1: Determinación del contenido de humedad. Nch. 176/1. Of. 1984.

INN, Instituto Nacional de Normalización. 1988. Madera-parte 2: Determinación de la densidad. NCh. 176/2. Of. 1986. Modificada en 1988.

Islam, M. N.; Ando, K.; Hattori, N.; Yamauchi, H.; Kobayashi, Y. 2008. Comparative Study Between Full Cell and Passive Impregnation Method of Wood Preservation for Laser Incised Douglas fir lumber. *Wood Sci Technol.* 42(4): 343-350.

Montgomery, D. 1991. *Diseño y Análisis de experimentos*. 3º Edición. Ed. Iberoamericana. México DF. México. 589 p.

Rowell, R. M.; Youngs, R. L. 1981. Dimensional Stabilization of Wood in Use. USDA Forest Service. Research Note FPL-0243. Forest Products Laboratory. Madison, WI, 8 pp.

Rowell, M. R.; Simonson, R. 2004. Latest Advancements in the Acetylation of Wood Fibers to Improve Performance of Wood Composites. En: 7th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium: 31 de October al 2 de November. Nanjing, China, College of Wood Science and Technology and the Wood-based Panel Research Institute, Nanjing Forestry University, Nanjing. Vol.1, 12p.

Rowell, R. M. 2005. *Chemical Modification of Wood*. Handbook of wood chemistry and wood composites. USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, and Department of Biological Systems Engineering, University of Wisconsin. Madison, WI, 2005: pp. 381-420.

Rowell, R. M. 2006. Chemical Modification of wood: A short review. *Wood Material Science and Engineering* 1 (1): 29-33. United States Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, and University of Wisconsin, WI.

SAWPA, 1988. South African Wood Preservers Associations. Understanding Timber Preservation. A guide to timber and its treatment against biological degradation. Timber Preservers Association of Australia, Darlinghurst, N.S.W, 1988. [en línea] < <http://www.sawpa.org.za/> > [consulta: 09 de mayo 2008].

Simonson, R.; Rowell, R. M. 2000. A new process for the continuous acetylation of lignocellulosic fiber. In: Proceedings of the 5th Pacific Rim bio-based composites symposium; 2000 December 10-13; Canberra, Australia. Canberra, Australia: Department of Forestry, The Australian National University, 190-196.

Tarkow, H.; Stamm, A. J. 1955. Acetylated Wood, Information Reviewed and Reaffirmed, November. This report is one of a series issued in cooperation with the air force-navy-civil subcommittee on aircraft design criteria under the supervision of the aircraft committee of the munitions board, United States department of agriculture forest service Forest Products Laboratory. Madison 5, Wisconsin in Cooperation with the University of Wisconsin. Rept. No.1593.

Titan Wood Research Report 200705. 2007. Research Overview Accoya™, the strength within. Titan Wood, Arnhem, the Netherlands. (d.d. 30 mayo 2007). Version I. pp.1-18.

Zhang, Y.; Jin, J.; Wang, S. 2007. Effects of Resin and Wax on the Water Uptake Behavior of Wood Strands. The Society of Wood Science and Technology. *Wood and Fiber Science* 39(2): 271-278.

