



Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Forestal



**“Durabilidad de madera termotratada de *Gmelina arborea* (Roxb. ex Sm) y
Tectona grandis (L.f.) en Costa Rica**

**Trabajo final de graduación para optar por el título de Ingeniería Forestal con
grado académico de Licenciatura**

Lucía Isabel Fallas Valverde

Cartago, Noviembre 2015

Resumen

La madera es un material biológico compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina, ha sido utilizada a lo largo de los años para usos exteriores e interiores. Sin embargo, es susceptible a la degradación, por lo que se han buscado diferentes técnicas para mejorar su resistencia a la biodegradación, como el termo-tratamiento. En este estudio, se evaluó la durabilidad de la madera termo-tratada de *Tectona grandis* L.f. (teca) y *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm (melina) a cinco diferentes temperaturas, por medio de ensayos acelerados de laboratorio y la exposición al suelo. La madera termo-tratada bajo cinco condiciones de temperatura distintas, fue sometida a la colonización de dos hongos (*Lenzites acuta* y *Tramete versicolor*) durante 16 semanas. Además, se establecieron de pruebas de deterioro en campo, en un tiempo de exposición de 300 días estudiando las propiedades de resistencia mecánica de la madera tratada térmicamente, analizando el módulo de elasticidad, módulo de ruptura y módulo de elasticidad dinámico, bajo dos condiciones ambientales diferentes. A partir de los resultados de este estudio, se concluye que la madera termo-tratada presenta mayor resistencia conforme aumenta la temperatura de tratamiento; mejorando además, las propiedades de resistencia mecánica de la madera en las especies forestales estudiadas. Asimismo, la temperatura de termo-tratamiento a los 200°C, es la que presenta mejores resultados en cuanto a propiedades mecánicas y en resistencia contra la degradación de los agentes abióticos para ambas especies.

Palabras claves: biodeterioro, termo-tratamiento de la madera *Lenzites acuta*, *Trametes versicolor*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*.

Abstract

Wood is a biological material composed of cellulose, hemicellulose and lignin. It has been used through the years in outdoors and indoors. However, it is susceptible to degradation, for that reason some techniques have been developed to improve their resistance to biodegradation, such as thermal- treatment. This research assessed the durability of heat-treated wood of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* under five different temperatures of heat treatment, the evaluation was done by accelerated laboratory tests and exposure to soil test.

Wood heat treated under five different temperatures of heat treatment was evaluated by an accelerated laboratory test of natural decay, using two wood decay fungi (*Lenzites acuta* and *Trametes versicolor*) for 16 weeks and by a field test with stakes under an exposure time of 300 days, the main objective of this was to study the properties of mechanical resistance of thermally treated wood, analyzing the modulus of elasticity, modulus of rupture and dynamic modulus of elasticity, in two different environmental conditions. We concluded that the heat-treated wood had a higher resistance with increasing treatment temperature; this improved the strength properties of wood in the forest species studied. Finally it was concluded that the temperature of heat-treated at 200 °C, allowed the best results in terms of mechanical properties of wood and in resistance against abiotic degradation for both species.

Key Words: biodegradation, heat treatment of wood, *Lenzites acuta*, *Trametes versicolor*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*.

Esta tesis de graduación ha sido aceptada por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado académico de Licenciatura.

“Durabilidad de madera termo-tratada de *Gmelina arborea* (Roxb. ex Sm) y *Tectona grandis* (L.f.) en Costa Rica”

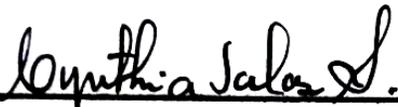
Miembros del Tribunal Evaluador



Alexander Berrocal Jiménez, Ph.D.
Director de tesis
Escuela de Ingeniería Forestal



Róger Moya Roque, Ph.D.
Lector de tesis
Escuela de Ingeniería Forestal



Cynthia Salas Garita, MSc.
Lector de tesis
Escuela de Ingeniería Forestal



Ing. Ignacio Rodríguez
Lector de tesis
Representante EthicalForestry S.A.



Lucía Isabel Fallas Valverde
Estudiante de Ingeniería Forestal

Dedicatoria

A Dios, a mis padres, hermanos, sobrinos y a Álvaro.

Agradecimientos

A mi familia, por el apoyo a lo largo de este proceso, por creer en mí y ser mi motor.

A Álvaro, por ser uno de mis pilares, por motivarme a seguir adelante y por enseñarme a ser siempre positiva.

A Alexander Berrocal, por ser mi guía en este proyecto.

A Róger Moya, por sus consejos y apoyo incondicional, por ser de los mejores profesores con los que he compartido.

A Cynthia Salas, por compartir sus conocimientos y ser un gran apoyo.

Al personal del CIF, en especial a Robert Cubero, por su apoyo y aprendizaje en esta etapa.

A Ethical Forestry, por aportar el material con que se realizó el proyecto.

A mis compañeros con los que compartí grandes momentos a lo largo de estos años.

A Sofía Quirós, Rocío Cortés, Natalia Fallas y Mario Quesada, por los consejos y apoyo que me brindaron, por enseñarme a no rendirme nunca.

A todos los profesores y compañeros que compartieron sus conocimientos en esta etapa y de alguna manera me enseñaron a ser mejor.

Índice general

Resumen	i
Abstract	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	v
Introducción	1
Objetivos específicos.....	4
Materiales y métodos	4
Procedencia y características del material utilizado	4
Proceso de termo-tratamiento.....	5
Evaluación del deterioro por medio del método acelerado en laboratorio	5
Evaluación del deterioro por el método de prueba de campo.....	8
Evaluación de la resistencia luego de la exposición en el suelo	9
Determinación del MOE, MOR y MOEd	11
Análisis estadístico	12
Resultados y análisis de resultados	12
Ensayo acelerado de laboratorio para evaluar el biodeterioro.....	12
Evaluación de la pérdida de peso luego de la exposición en el suelo.....	16
Evaluación de las propiedades mecánicas luego de la exposición en el suelo	17
Conclusiones	22
Referencias	24

Índice de figuras

Figura 1. Inoculación de los hongos y crecimiento del micelio en la superficie de las tablas alimentadoras.....	6
Figura 2. Exposición de las muestras de madera termo-tratada en el hongo y colonización de los hongos después de las 16 semanas de exposición.....	7
Figura 3. Prueba de campo para la madera termo-tratada y ensayo de flexión estática.....	10
Figura 4. Diferencia de pérdida de peso en las probetas de <i>Tectona grandis</i> expuestas a <i>Lenzites acuta</i> y <i>Trametes versicolor</i>	13
Figura 5. Promedio de pérdida de peso en probetas de <i>Gmelina arborea</i> expuesta a <i>Lenzites acuta</i> y <i>Trametes versicolor</i>	14
Figura 6. Porcentaje de pérdida de peso en las estacas de <i>T. grandis</i> (A) y <i>G. arborea</i> (B), expuestas a dos condiciones ambientales diferentes.....	16
Figura 7. Deflexión que presentan las estacas de teca expuestas en Cartago y Santa Rosa de Pocosol según la carga aplicada.....	21
Figura 8. Deflexión que presentan las estacas de melina expuestas en Cartago y en Santa Rosa de Pocosol según la carga aplicada.....	21

Índice de cuadros

Cuadro 1. Criterio de clasificación de la resistencia de la madera al ataque de hongos para una prueba acelerada de laboratorio (ASTM, 2003).....	8
Cuadro 2. Diferencia de las variables analizadas para las estacas de <i>Tectona grandis</i> expuestas a la intemperie en dos sitios diferentes.....	18
Cuadro 3. Diferencia de las variables analizadas para las estacas de <i>Gmelina arborea</i> expuestas a la intemperie en dos sitios diferentes.....	20

Introducción

La madera es un material biológico (Yilgör, y Kartal, 2009), compuesto por polímeros naturales renovables, utilizada tanto para usos interiores como exteriores. Este material está compuesto fundamentalmente, por polímeros de celulosa, hemicelulosa y lignina, siendo estos los responsables de las propiedades físicas y químicas de la madera (Pérez, Muñoz, de la Rubia y Martínez, 2002). Este biomaterial, se degrada continuamente por diferentes agentes bióticos y abióticos, que producen alteraciones de sus características y provocan rupturas en los polímeros que la componen (Garay, y Henriquez, 2012).

La durabilidad natural de la madera, se define como la resistencia intrínseca de la madera frente a degradaciones de los agentes que la destruyen, tales como hongos cromógenos y de pudrición, insectos xilófagos de ciclo completo (anóbidos, líctidos y cerambícidos), insectos sociales (termitas) y xilófagos marinos (Peraza, 2002). No obstante, la durabilidad se ve afectada por el biodeterioro, que es esencialmente el resultado de la progresiva digestión de la madera por hongos o insectos, que causan cambios continuos en su apariencia, propiedades químicas, físicas y mecánicas (Márquez, 2008). Además, el biodeterioro está asociado a otros tipos de agentes no bióticos como la radiación ultravioleta, la lluvia, el aire (oxígeno principalmente), sustancias químicas y el desgaste mecánico (Berrocal, 2008).

Algunos hongos que degradan la madera; tienen la capacidad de alimentarse de celulosa y otros lo hacen de lignina. Los hongos que degradan la celulosa se conocen como hongos de pudrición café y los hongos capaces de degradar la lignina son conocidos como hongos de pudrición blanca. En ambos tipos de pudrición la degradación de la madera se da por las enzimas que producen los hongos, las cuales son específicas para cada tipo de pudrición y en el caso que se presenten las condiciones, estos hongos desarrollan cuerpos fructíferos, los cuales son visibles en

la madera que presenta un alto grado de biodeterioro (Cenci, Cocchi, Petrini, Sena, Siniscalco y Vescovi, 2011).

Los hongos de pudrición blanca se caracterizan por presentar fuerte erosión de la pared celular desde el lumen hacia la lámina media y exhibiendo adelgazamiento de la pared celular (Encinas y Mora, 2003). Por otra parte, los hongos de pudrición café, poseen enzimas hidrolíticas que actúan sobre la celulosa y hemicelulosa, además se caracterizan por ser muy específicas (Alexopoulos, 1952).

El biodeterioro en la madera puede ser evaluado por medio de ensayos acelerados de laboratorio, donde se controlan las condiciones ambientales y se crea un entorno óptimo para el desarrollo de los hongos (Mohali y Castro, 2005). Sin embargo, también se puede evaluar por medio del establecimiento de pruebas de campo o cementerios de estacas, en el cual se entierran estacas de madera en el suelo y son expuestas a las condiciones ambientales de un sitio específico (Honorato, Vázquez y Zamudio, 2001).

Por otra parte, las especies más utilizadas en plantaciones forestales de Costa Rica son *Tectona grandis* L. f. (teca) y *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm (melina), ambas especies pertenecen a la familia *Lamiaceae*, la madera de albura de teca presenta una durabilidad natural de moderada a baja (Moya, R, Muñoz, F y Berrocal, A, 2010); mientras que la madera de melina se clasifica como moderadamente resistente (Moya y Leandro, 2010). Lo que convierte que estas especies sean de bajo potencial para utilizar en condiciones susceptibles a la degradación.

Para el caso de la madera de teca, varios estudios muestran que la durabilidad natural del duramen de la madera está relacionada con la edad. La madera de duramen de árboles jóvenes presenta una durabilidad natural moderada, en tanto que la madera de árboles viejos presenta una alta resistencia al ataque de hongos e insectos, además posee buena estabilidad dimensional, mientras que la albura de

esta especie presenta una durabilidad natural de moderada a baja (Fonseca, 2004; Moya, Muñoz, y Berrocal, 2010).

Por su parte, Moya y Leandro (2010) afirman que la madera de melina no protegida de la lluvia o de la humedad puede ser atacada por hongos de tipo cromógenos, xilófagos, mohos y los que producen mancha negra, modificando la coloración de la misma; en el caso de hongos cromógenos y mohos el ataque es superficial, mientras que los xilófagos alcanzan cierta profundidad, dependiendo del tiempo de ataque, debido a esto se considera una madera de moderadamente resistente a resistente a la pudrición.

Las desventajas que tiene la madera al presentar inestabilidad dimensional debido a su comportamiento higroscópico, además de su vulnerabilidad al ataque de hongos; estas características pueden ser modificadas utilizando procesos de termo-tratamiento. La madera tratada térmicamente mejora su capacidad para resistir biológicamente la presencia de hongos de pudrición y otros microorganismos (Salca, y Hiziroglu, 2014), al mismo tiempo mejora la estabilidad dimensional.

El tratamiento térmico o termo-tratamiento, es un proceso que se aplica a escala industrial, donde se utilizan temperaturas que varían de 150°C a 230°C y son eliminados ciertos componentes de la madera (contenido de volátiles) y ocurren otras pequeñas modificaciones a nivel de celulosa, hemicelulosa y lignina (Johanson, Fhyr and Rasmuson, 1997; Pang, 1998. citado por Younsi, Kocaeffe, Poncsak; Kocaeffe y Gastonguay, 2010). Estas modificaciones o pérdidas de componentes en la madera termo-tratada mejorara algunas características de la misma, tales como su durabilidad y estabilidad dimensional (Turner, Rousset, Rémond y Perré, 2010).

El presente estudio tiene como propósito evaluar el proceso de tratamiento térmico a cinco diferentes temperaturas en madera de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* proveniente de plantaciones forestales de Costa Rica, por medio de pruebas

aceleradas de laboratorio con un hongo de pudrición café y otro de pudrición blanca (*Lenzites acuta* y *Trametes versicolor*, respectivamente) y por la pérdida de resistencia mecánica de la madera proveniente de los tratamientos luego de 300 días de exposición en un cementerio de estacas en dos sitios diferentes.

Objetivos específicos

- Determinar por medio de un ensayo acelerado de laboratorio (suelo-bloque) el efecto de diferentes condiciones de tratamiento térmico sobre la resistencia de la madera al ataque de los hongos xilófagos *Lenzites acuta* y *Trametes versicolor*.
- Evaluar la resistencia mecánica de madera termo-tratada bajo diferentes temperaturas, expuesta a las condiciones ambientales de dos sitios diferentes de Costa Rica.

Materiales y métodos

Procedencia y características del material utilizado

El material utilizado, tanto para la especie de teca como de melina, fue obtenido de plantaciones forestales localizadas en la Zona Norte de Costa Rica, propiedad de la empresa Ethical Forestry S. A. Este sitio se encuentra dentro de la zona de vida Bosque Húmedo Tropical Basal y registra una temperatura media anual entre 27°C y 32°C, con una precipitación promedio de 350 mm (Holdridge, 1967).

Fueron seleccionadas trozas de 2.5 m de largo y un diámetro promedio de 20 cm aproximadamente. Después de obtenidas las trozas se procedió a aserrar las mismas para obtener tablas de 7.5 cm de ancho x 2.5 cm de espesor x 2.5 metros de largo aproximadamente. Las tablas aserradas fueron llevadas al horno para ser secadas siguiendo un programa de tiempo definido para cada especie hasta lograr

que la madera alcanzara en promedio un 12% de contenido de humedad. Para ambas especies se trabajó con madera de duramen.

Proceso de termo-tratamiento

La madera aserrada y condición seca en promedio a un 12% de contenido de humedad, fue termo-tratada a cuatro diferentes niveles de temperatura 160, 180, 200 y 220°C, además, se muestreó el tratamiento testigo el cual no fue termo-tratado. Cada proceso de termo-tratamiento se realizó de forma independiente de acuerdo a las temperaturas definidas constituyendo un ciclo por cada tratamiento. Las muestras fueron introducidas y apiladas en un horno marca VOLUTEC. Una vez colocado el material dentro del horno, este se configuró según la temperatura de termo-tratamiento y el tiempo de duración. El proceso fue integrado por varias etapas, una vez encendido el horno se inició un proceso de secado de la madera que duró aproximadamente 17 horas a una temperatura que varió de 0-130°C hasta obtener un 0% de contenido de humedad (CH%). Posterior a esto, se aplicó un aumento de temperatura de 130°C a la temperatura definida para cada termo-tratamiento, proceso que tardó aproximadamente seis horas en alcanzar la temperatura definida. Una vez alcanzada la temperatura máxima, esta se mantuvo durante dos horas. La siguiente etapa fue de acondicionamiento durante siete horas, en la que se aplicó vapor, agua y temperatura para hidratar la madera y lograr aproximadamente un 6% de CH final. Finalmente, se aplicó un proceso de enfriamiento durante tres horas. Los tratamientos fueron definidos de la siguiente manera: tratamiento 1 (muestras testigo, sin termo-tratamiento), tratamiento 2 (160°C), tratamiento 3 (180°C), tratamiento 4 (200°C) y tratamiento 5 (220°C).

Evaluación del deterioro por medio del método acelerado en laboratorio

Para establecer el ensayo acelerado de laboratorio se trabajó bajo la norma ASTM D 2017-05 (ASTM, 2005), la cual estipula los procedimientos y condiciones del laboratorio donde se realiza el ensayo.

Para iniciar el ensayo de biodeterioro para cada especie, se llenaron 200 frascos de vidrio con tapa metálica con en una proporción de 47 ml de agua destilada por 75 g de suelo esterilizado y seco, que fue agregado en forma homogénea dentro del frasco para obtener una superficie horizontal, asimismo se pesaron las probetas de 2 cm x 2 cm de ambas especies. Una vez llenos los frascos, fueron colocadas dos tablas alimentadoras de pino, y se auto clavaron los frascos durante dos horas.

Una vez esterilizados los frascos se dejaron enfriar a temperatura ambiente y fueron inoculados, colocando en las tablas un inóculo de hongo obtenido de cultivos puros; que fueron cultivados en placas petri con un medio de cultivo de papa dextrosa agar. Los hongos utilizados en el ensayo fueron *Lenzites acuta* y *Trametes versicolor*, de los cuales el primero es de pudrición café y el segundo es de pudrición blanca.

El proceso de inoculación del hongo se realizó en una cámara de flujo laminar, con la finalidad de eliminar las esporas que se encontraban en el aire; además se trabajó bajo llama. Para realizar la inoculación se controlaron las condiciones ambientales para disminuir la posibilidad de contaminación que inhibiera el desarrollo del hongo.

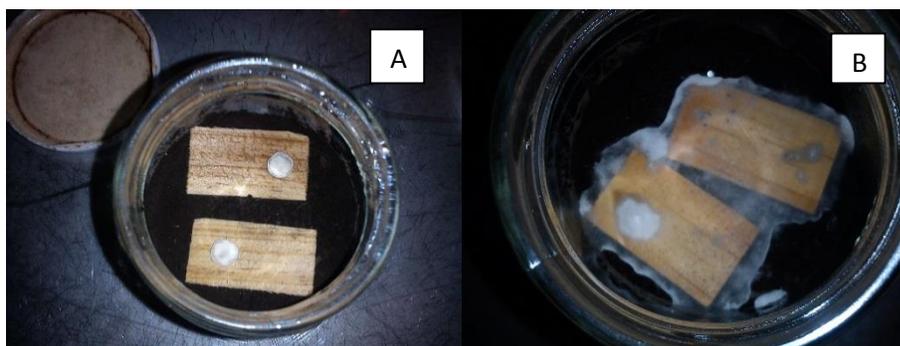


Figura 1. Inoculación de los hongos (A) y crecimiento del micelio en la superficie de las tablas alimentadoras (B).

Dos semanas después de realizada la inoculación, (tiempo que tardó el micelio en cubrir la superficie de las tablas alimentadoras) fueron colocadas en los frascos las muestras *T. grandis* y *G. arborea*, las cuales fueron previamente secadas al horno al

0% de CH y pesadas con una balanza analítica, para luego ser hidratadas y posteriormente esterilizadas en una autoclave durante dos horas y finalmente esterilizadas y fueron colocadas en los frascos.

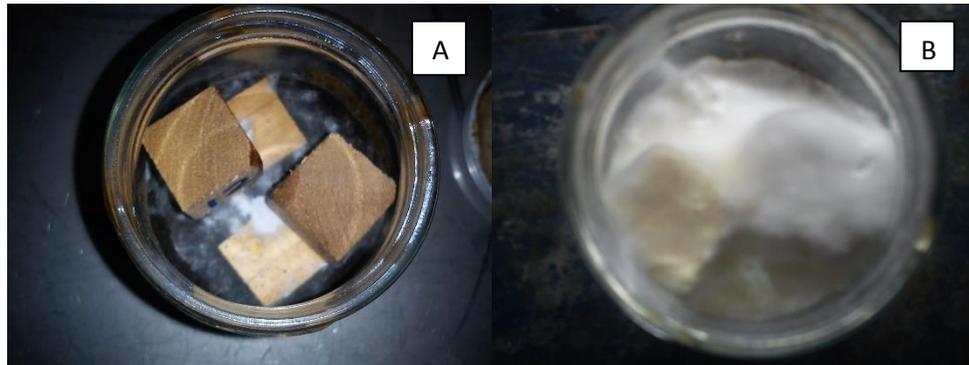


Figura 2. Exposición de las muestras de madera termo-tratada en el hongo (A). Colonización de los hongos después de las 16 semanas de exposición (B).

Para este ensayo las mediciones se realizaron a las 16 semanas de expuestas las probetas al hongo. Para la medición del peso una vez terminado el ensayo se removieron los restos de hongo y luego se llevaron al horno a una de temperatura de 105°C durante 24 horas. Lo que permitió que la madera que la madera alcanzara un 0% de CH y posteriormente fueron pesadas en la misma balanza analítica (tres decimales), que se utilizó para pesarlas antes del ensayo.

Las muestras control fueron colocadas en las mismas condiciones, sólo que no fueron inoculadas, con el fin de obtener la pérdida de peso sin tomar en cuenta la degradación enzimática generada por los hongos. Estas muestras control fueron evaluadas para obtener la pérdida de peso y solamente se ajustaban los valores si se presentaban pérdidas de peso promedio entre un 5-10%, un valor menor al 5% no se ajusta y mayor a un 10% requeriría una repetición del ensayo.

Posteriormente, para determinar el porcentaje de pérdida de peso de la madera con respecto a la degradación producida por cada hongo, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%Pp = \frac{Pi - Pf}{Pi} * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

Pi = Peso inicial (g)

Pf = Peso final en (g)

%Pp = Pérdida de peso

Una vez determinada la pérdida de peso de las probetas, el ensayo se analizó bajo los criterios de la norma ASTM D 2017-81 (ASTM, 2003), la cual menciona el grado de resistencia a los hongos y lo clasifica de acuerdo al detalle en el cuadro 1:

Cuadro 1. Criterio de clasificación de la resistencia de la madera al ataque de hongos para una prueba acelerada de laboratorio (ASTM, 2003).

Promedio de pérdida de peso (%)	Grado de resistencia al hongo de prueba	Clase de resistencia
0-10	Altamente resistente	A
11-24	Resistente	B
25-44	Moderadamente resistente	C
45 ó mas	Ligeramente resistente a no resistente	D

Evaluación del deterioro por el método de prueba de campo

Para desarrollar el método de pruebas de campo o cementerio de estacas, se cortaron estacas de madera de 2 cm de ancho x 2 cm de espesor x 30 cm de longitud. Estas muestras fueron divididas en dos grupos: El primero fue de 40 muestras que fueron denominadas testigo, estas no sufrieron exposición a condiciones ambientales ni estuvieron en contacto con suelo. El segundo grupo se integró por un conjunto de 80 muestras que estuvieron en contacto con el suelo

durante 300 días, a lo largo de este período se mantuvieron libres de maleza. Dichas muestras fueron colocadas en ocho macetas; en cada una de ellas se colocaron 10 muestras de las cuales cinco eran de teca y cinco de melina, y cada estaca representó cada uno de los tratamientos (sin tratamiento, 160, 180, 200 y 220°C). Las muestras fueron enterradas a 10 cm de profundidad en el suelo, asimismo las ocho macetas fueron separadas en dos grupos, las cuales estuvieron expuestas a dos condiciones ambientales diferentes: El primer grupo formado por cuatro macetas permanecieron en Cartago en las instalaciones del Tecnológico de Costa Rica, que presenta una latitud de 9 ° 50'59"N y longitud de 83 ° 54'37 "O, con una altitud de 1100 msnm (Holdridge, 1967) y el segundo grupo fue llevado a las instalaciones de la empresa Ethical Forestry ubicada en Santa Rosa de Pocosol de San Carlos que presenta una latitud de 10°11'22"N y longitud de 84°31'23"O, con una altitud de 116 msnm (Holdridge, 1967). Las estacas estuvieron expuestas directamente a las condiciones ambientales de cada uno de los sitios.

Evaluación de la resistencia luego de la exposición en el suelo

Luego de los 300 días de exposición, se evaluó la resistencia de la madera por medio de dos métodos diferentes: En el primero se utilizó un método no destructivo para determinar la resistencia y el segundo fue la resistencia a la flexión estática (destructivo). Las muestras fueron extraídas y secadas en una secadora solar (temperatura de 22°C y humedad relativa de 66%, lo que permite contar con un contenido de humedad del 12%), en el caso de la evaluación de la resistencia con el método no destructivo y una vez acondicionadas las estacas se realizaron mediciones ultrasónicas longitudinales de las mismas, se utilizó el equipo SYLVATEST DUO con transductores de 22 kHz.

Este dispositivo realizó cuatro lecturas por medición, de las cuales se obtuvo un tiempo promedio en μ s. Los transductores se colocaron en la parte central de los extremos con una distancia de 30 cm. La velocidad longitudinal del ultrasonido fue determinada utilizando la siguiente ecuación:

$$V = L / \left(\frac{T}{1000000} \right) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

V = velocidad de ultrasonido en km s-1

L = longitud de la muestra en metros

T = tiempo que tarda la onda del ultrasonido de un extremo a otro en μs

En relación a la prueba destructiva y luego de medida la velocidad del ultrasonido y fue determinado el módulo de elasticidad (Ecuación 3) y el módulo de ruptura (Ecuación 4). Posterior a esto se realizó un ensayo de flexión estática a las muestras; para ello se utilizó el equipo Tinius Olsen Horizon H10KT, utilizando una luz entre apoyos de 20 cm y aplicando la carga sobre la línea de tierra de las estacas.

Para realizar la prueba de flexión de cada una de las estacas se trabajó bajo la norma ASTM D 143-14. La prueba se realizó cuando las estacas presentaron un contenido de humedad (%CH) menor al 12%, el cual fue medido con un Hydromette HTR 300.



Figura 3. Prueba de campo para la madera termo-tratada (A). Ensayo de flexión estática (B).

Determinación del MOE, MOR y MOEd

El módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de ruptura (MOR) fueron determinados por medio de las siguientes ecuaciones, (Bodig y Jayne, 1993) y el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) (Bucur, 1995) respectivamente:

$$MOE = \frac{P * Lflex^3}{y * 48 * I} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$MOR = \frac{3 * Prup * Lflex}{2 * b h^2} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$MOEd = V^2 * \rho \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

MOE = Módulo de elasticidad (Pa)

P = Carga al límite proporcional (N)

Lflex = Distancia entre apoyos (m)

y = Intervalo de deformación en el dominio elástico (m)

I = Segundo momento de inercia de la sección transversal (m⁴)

MOR = Módulo de ruptura (Pa)

Prup = Carga a la ruptura (N)

b = Base de la probeta (m)

h = Altura de la probeta (m)

MOEd = módulo de elasticidad dinámico (GPa)

V = velocidad de ultrasonido (km s⁻¹)

ρ = densidad de cada muestra (kg/m³)

Análisis estadístico

Para analizar los resultados del ensayo acelerado de biodeterioro se utilizó el programa SAS, donde se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y se realizó una prueba de Tuckey (P<0.05) para determinar las diferencias entre los termo-tratamientos, donde la variable independiente fue cada uno de los hongos (*L. acuta* y *T. versicolor*), la temperatura a la que se hizo el termo-tratamiento de la madera (160°C, 180°C, 200°C y 220°C), la madera sin tratamiento (control), además de la interacción hongo/temperatura.

En cuanto a las estacas se realizó un análisis de varianza (ANOVA), para estimar las diferencias entre las diferentes temperaturas de tratamiento; en este análisis la temperatura de tratamiento fue considerada como la variable independiente y las variables evaluadas (pérdida de peso, módulo de elasticidad dinámico, MOE, MOR en flexión estática) fueron las variables dependientes. La existencia de diferencias significativas entre tratamientos fue verificada mediante una prueba de Tuckey (P<0.05), y para el MOE y MOR la prueba utilizada fue Dunnet, donde la madera no expuesta fue lo establecido como patrón de comparación.

Resultados y análisis de resultados

Ensayo acelerado de laboratorio para evaluar el biodeterioro

El análisis de clasificación de la resistencia de la madera al ataque de hongos, para una prueba acelerada de laboratorio (Cuadro 1), definió *Tectona grandis* como resistente al hongo *Lenzites acuta* (11,19%), y altamente resistente al hongo *Trametes versicolor* (7,13%); mientras que *Gmelina arborea* se clasifica como

moderadamente resistente a *Lenzites acuta* y *Trametes versicolor* (26,33% y 43,60%), respectivamente.

Los resultados del ensayo acelerado de laboratorio (Figura 4), mostraron que el biodeterioro de la madera termo-tratada para la especie de *T. grandis*, medido por la pérdida de peso de las muestras expuestas a la colonización de *Lenzites acuta* y *Trametes versicolor* luego de 16 semanas, no presentan diferencias entre los tratamientos testigo y el termo-tratamiento a 160°C en ambos hongos (Figura 4A-4B). Al comparar ambos hongos, se determinó que la pérdida de peso fue menor para *Lenzites acuta* en relación a la pérdida de peso para *Trametes versicolor*.

La madera termo-tratada a 180°C y 200°C no presentan diferencias significativas en la pérdida de peso promedio (Figura 4A). La madera termo-tratada a 220°C presentó menor pérdida de peso para este hongo. Por su parte, en la degradación con *Trametes versicolor*, la pérdida de peso en la madera termo-tratada con las más altas temperaturas (180, 200 y 220°C), no mostró diferencias significativas (Figura 4B).

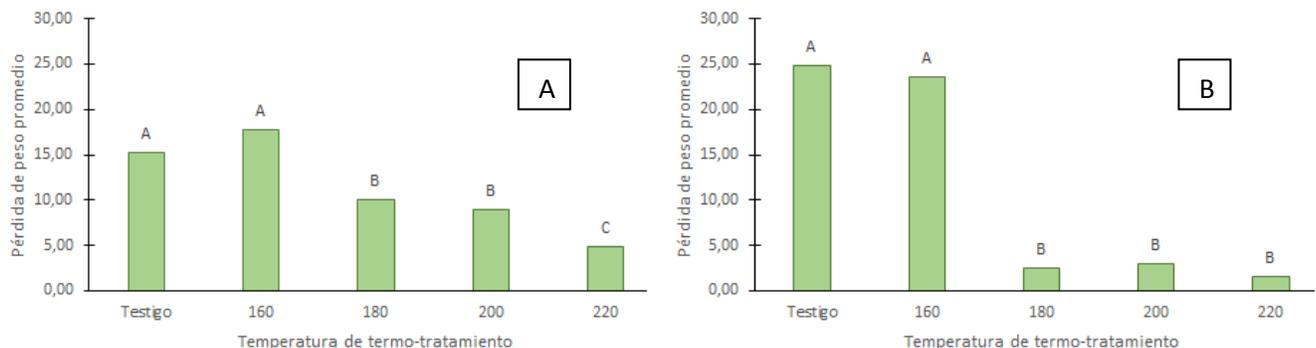


Figura 4. Diferencia de pérdida de peso en las probetas de *Tectona grandis* expuestas a *Lenzites acuta* (A) y *Trametes versicolor* (B).

Nota: Valores con letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos de termo-tratado de la madera a un nivel de confianza del 95%.

Para la madera de melina se observó menor pérdida de peso con *L. acuta*, en comparación con *T. versicolor*. También se encontró que la madera termo-tratada a 160°C y 180°C no presentó diferencias significativas con el control para *L. acuta*

(Figura 5A). Los valores de pérdida de peso para la madera termo-tratada a 200 y 220°C, fueron diferentes entre sí (Figura 5A). Para la madera de melina colonizada por *T. versicolor*, se encontró que no hay diferencias en la pérdida de peso entre la madera control y la madera termo-tratada a 160°C. Entre los tratamientos a 160°C y 180°C no se presentan diferencias en la pérdida de peso, aunque sí hay diferencias entre la madera sin termo-tratar y la tratada a 180°C. La menor pérdida de peso con el hongo *T. versicolor* fue en la madera termo-tratada a 200 y 220°C; la pérdida de peso, para los tratamientos con ambas temperaturas no mostraron diferencias significativas entre sí (Figura 5B).

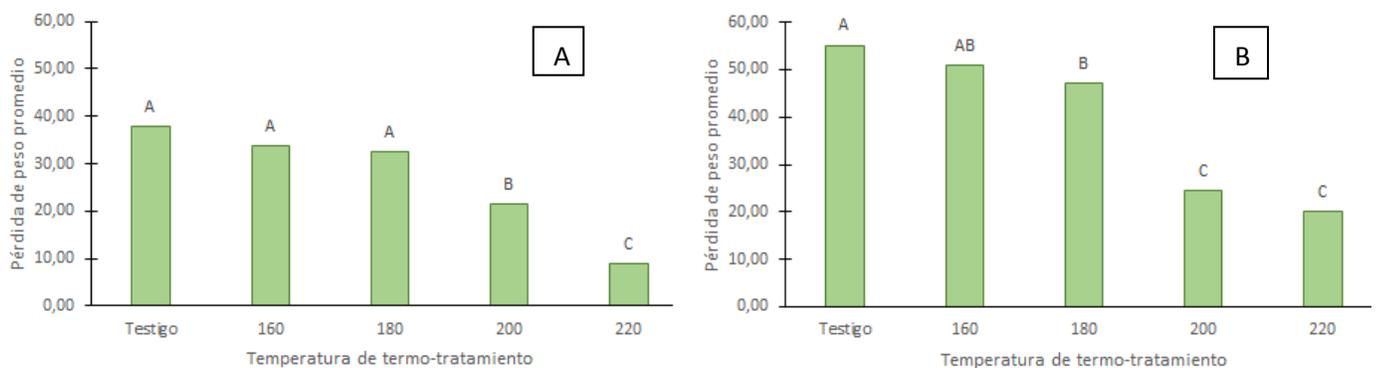


Figura 5. Promedio de pérdida de peso en probetas de *Gmelina arborea* expuesta a *Lenzites acuta* (A) y *Trametes versicolor* (B).

Nota: Valores con letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos de termo-tratado de la madera a un nivel de confianza del 95%.

Según Yilgör y Kartal (2009), el proceso de modificación térmica de la madera mejora la resistencia al ataque de los hongos, lo cual fue comprobado en este estudio donde se observa una menor pérdida de peso de las muestras conforme aumenta la temperatura de termo-tratamiento (Figura 4-5). La pérdida de peso de la madera, es explicada por la degradación de los polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) en las etapas iniciales y en algunos casos por la degradación de la lignina en las etapas posteriores, para el hongo de pudrición café y por el contrario en los de pudrición blanca primero hay una degradación de la lignina y luego de la celulosa (Venäläinen, Partanen y Harju, 2014).

Para las dos especies de madera evaluada se determinó que *T. versicolor* fue el hongo que tuvo mayor capacidad de pérdida de peso (Figura 4-5); lo que implica directamente que degradó en mayor grado, los polisacáridos presentes. De acuerdo con Zaid (2004) los hongos de pudrición blanca tienen la capacidad de degradar en menor proporción la celulosa y hemicelulosa de la madera, luego de disminuir la disponibilidad de lignina. Para los hongos de pudrición café se reporta que son más selectivos, ya que únicamente degradan la celulosa de la pared celular (Alcibar, 2014).

Hermoso, Mateo, Cabrero, Fernández,, Conde, M y Troya (2014) y Kocaeffe, Poncsak, Tang y Bouazara (2009), determinan que a mayor temperatura de tratamiento térmico hay una mayor reducción del contenido de hemicelulosa, humedad y componentes como almidón, ácidos grasos y lípidos, los cuales son esenciales para el crecimiento de los hongos. Esto implicaría que en este estudio, los tratamientos térmicos mayores a 200°C modificarían la estructura de la madera; de forma tal que a esta temperatura de tratamiento, se logra una mayor resistencia a la degradación, de hecho de acuerdo con la norma ASTM D-2017-81 (ASTM, 2003) la madera tratada a estas temperaturas es clasificada como altamente resistente al ataque de hongos xilófagos, lo que coincide con los resultados obtenidos en este estudio.

La madera de *G. melina* presenta menor resistencia que *T. grandis*, lo cual estaría explicado por la densidad seca de la madera de esta especie es de 0,45 g/cm³ (Moya y Leandro, 2010), mientras que la teca presenta una densidad de 0,83 g/cm³ en estado seco (Moya, Muñoz y Berrocal, 2010). La estructura de la pared celular de la madera es más susceptible a sufrir cambios; por lo que afecta la resistencia de la melina (Trevisan, de Figueiredo, Pacheco, Grilo y de Carvalho, 2014).

Evaluación de la pérdida de peso luego de la exposición en el suelo

La evaluación por medio de estacas en contacto directo con el suelo en dos condiciones climáticas (Cartago y Santa Rosa de Pocosol) de la madera termo-tratada, se determinó primeramente que ambos sitios no presentan diferencias en la pérdida de peso en la madera de *T. grandis* (Figura 6A). Por su parte, para *G. arborea* sólo la madera termo-tratada a 200 y 220°C presentan diferencias estadísticamente significativas (Figura 6B).

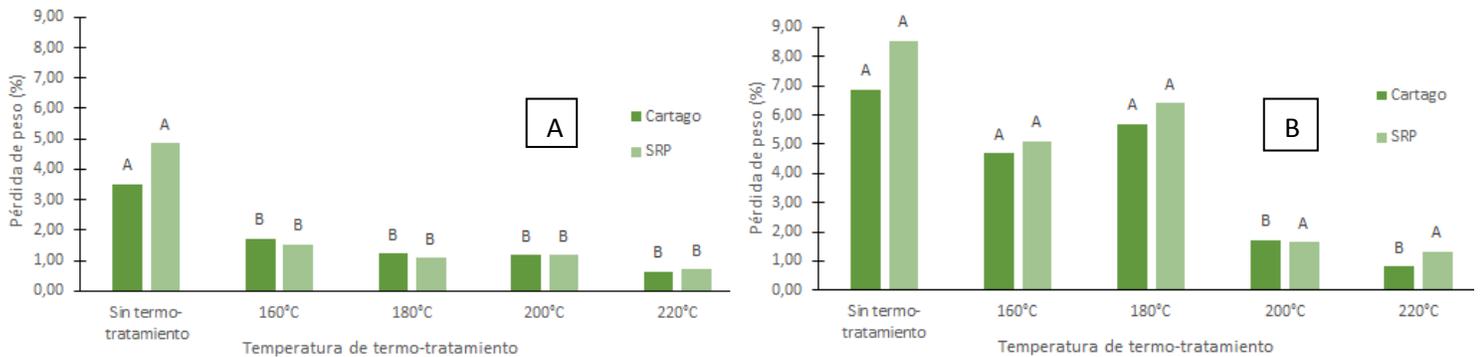


Figura 6. Porcentaje de pérdida de peso en las estacas de *T. grandis* (A) y *G. arborea* (B), expuestas a dos condiciones ambientales diferentes.

Nota: Valores con letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos de termo-tratado de la madera a un nivel de confianza del 95%.

Así mismo, es posible observar que la pérdida de peso de las estacas de la madera termo-tratada de *T. grandis* es menor que la pérdida de peso de la madera termo-tratada de *G. arborea* (Figura 6). Además, la pérdida de peso, luego de los 300 días de exposición disminuyó al aumentar la temperatura del tratamiento. Para la madera de *T. grandis* esta relación es inversamente proporcional (Figura 6A), en tanto que para la madera de *G. arborea* la pérdida de peso presenta una considerable inflexión en el tratamiento a 180°C (Figura 6B).

Trevisan et al (2014), encontraron diferencias en la madera termo-tratada, indicando una mayor resistencia conforme incrementa la temperatura de tratamiento térmico en la prueba de campo, debido a que la tasa de deterioro, mostró menos acción por microorganismos presentes en el suelo; los resultados concuerdan, para los dos sitios estudiados, con lo reportado en la literatura. Así mismo, dichos autores mencionan que esta resistencia al biodeterioro aumenta con una mayor temperatura, lo cual también es concordante con este estudio, donde, la temperatura de termo-tratado a los 220°C fue la que menor pérdida de peso obtuvo.

Otro factor que podría ayudar a mejorar la resistencia de la madera termo-tratada en contacto con el suelo es el efecto de la humedad. De acuerdo a Boonstra, Pizzi, Zomers, Ohlmeyer y Paul (2006), a mayor temperatura de tratamiento térmico de la madera, esta reduce la capacidad de absorber humedad, lo que contribuye a que la madera con menor humedad dificulte el proceso de degradación de la misma.

Evaluación de las propiedades mecánicas luego de la exposición en el suelo

Con respecto a la evaluación de la resistencia a la flexión de la madera de *T. grandis* expuesta 300 días. Se obtuvo para el sitio Cartago, la carga al límite de proporcionalidad (CLP), carga máxima (Cmax) y el módulo de ruptura (MOR) fueron estadísticamente menores en la madera termo-tratada a 180°C, 200°C y 220°C, en relación a la madera que no ha tenido ningún tipo de exposición (Cuadro 2). Mientras que la deflexión en el límite de proporcionalidad (YLP), módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) fueron estadísticamente semejantes entre la madera que no ha sido expuesta y la madera termo-tratada luego de 300 días de exposición a la intemperie.

Cuadro 2. Diferencia de las variables analizadas para las estacas de *Tectona grandis* expuestas a la intemperie en dos sitios diferentes.

Lugar	Tratamiento	CLP (kg)	YLP (cm)	MOE (kg/cm ²)	Cmax (kg)	MOR (kg/cm ²)	MOEd (Gpa)
Cartago	Sin exposición	173,00 (A)	0,25 (A)	96219,61 (A)	292,95 (A)	1143,20 (A)	1,83 (A)
	Sin termo-tratamiento	158,00 (A)	0,24 (A)	77770,54 (A)	241,26 (A)	934,55 (A)	1,46 (A)
	160°C	162,25 (A)	0,24 (A)	88573,91 (A)	257,95 (A)	1016,97 (A)	1,63 (A)
	180°C	129,50 (B)	0,21 (A)	82627,21 (A)	179,46 (B)	707,97 (B)	1,61 (A)
	200°C	131,75 (A)	0,21 (A)	83117,67 (A)	217,21 (B)	848,05 (B)	1,60 (A)
	220°C	128,00 (B)	0,22 (A)	80328,53 (A)	203,75 (B)	808,86 (B)	1,53 (A)
Santa Rosa de Pocosol	Sin exposición	168,00 (A)	0,25 (A)	91475,49 (A)	279,46 (A)	1104,81 (A)	1,74 (A)
	Sin termo-tratamiento	104,45 (B)	0,20 (B)	69162,93 (A)	161,45 (B)	636,49 (B)	1,60 (A)
	160°C	146,75 (A)	0,24 (A)	77427,75 (A)	241,25 (A)	908,93 (A)	1,55 (A)
	180°C	146,75 (A)	0,25 (A)	76816,08 (A)	227,65 (A)	879,16 (A)	1,48 (A)
	200°C	132,75 (A)	0,21 (A)	83108,77 (A)	206,39 (B)	805,83 (B)	1,55 (A)
	220°C	130,00 (A)	0,23 (A)	77686,42 (A)	194,18 (B)	777,52 (B)	1,46 (A)

Nota: Valores con letras diferentes indican diferencias significativas entre la madera expuesta con madera sin termo-tratamiento y en conserva, a un nivel de confianza del 95%.

En la evaluación de la misma madera termo-tratada de teca, pero en condiciones de exposición en Santa Rosa de Pocosol, se encontró que la madera termo-tratada en los parámetros de CLP, YLP, MOE y MOEd no presentaron diferencias en relación con la madera que no ha sido expuesta al contacto con el suelo (Cuadro 2). Sin embargo, la madera sin termo-tratado y expuesta al contacto con el suelo disminuyó significativamente estos parámetros en comparación con la madera no expuesta, ni termo-tratada. La madera termo-tratada a 200°C y 220°C junto con la que no fue termo-tratada y expuesta, presentaron valores de Cmax y MOR estadísticamente menores a la madera que no ha sido termo-tratada ni expuesta. Finalmente el MOEd no presenta diferencias estadísticas al compararla con la madera no expuesta, ni termo-tratada.

La evaluación de la resistencia mecánica de la madera de *G. arborea* entre la madera termo-tratada y en contacto con el suelo por 300 días no mostró disminución

en los parámetros de CLP, YLP, MOE, Cmax, MOR y MOEd en los sitios que fueron estudiados (Cuadro 3). Únicamente se observó diferencia con la madera no espuesta, ni termo-tratada fue en el sitio de Cartago, que presenta un valor de YLP estadísticamente inferior en la madera termo-tratada a 220°C en relación a las otras condiciones de la madera.

El módulo de elasticidad (MOE) no presentó diferencia entre los tratamientos térmicos (Cuadro 2), dicho comportamiento coincide con el encontrado por Hermoso, Mateo, Cabrero y Fernández (2013), para la madera pino radiata, en donde no presentan diferencias significativas en la aplicación del termo-tratamiento de la madera a diferentes temperaturas. Además, Machek, Edlund, Sierra, y Militz, (2004), encontraron que la disminución en el MOE en la madera fue altamente correlacionado a la exposición de la misma a la intemperie.

Debe de destacarse el hecho de que se obtuvo una disminución del MOR en la madera termo-tratada en relación a la madera sin termo-tratar (Cuadro 2), lo cual es común en este tipo de tratamientos (Kocaefe et al, 2009). Esto es explicado porque la utilización de una alta temperatura produce la despolimerización de los componentes de la madera, debilitando su resistencia (Hillis, 1984).

Tiryaki y Hamzacebi (2013), confirman que este comportamiento, al indicar que el tratamiento térmico también provoca cambios negativos en la estructura de madera, lo que provoca la degradación de los componentes y causa reducción en ciertas propiedades mecánicas de la madera. Asimismo, estos autores afirman que las propiedades de resistencia de la madera comienzan a debilitarse, volviéndose más frágil en tratamientos mayores a los 150°C.

Cuadro 3. Diferencia de las variables analizadas para las estacas de *Gmelina arborea* expuestas a la intemperie en dos sitios diferentes.

Lugar	Tratamiento	CLP (kg)	YLP (cm)	MOE (kg/cm ²)	Cmax (kg)	MOR (kg/cm ²)	MOEd (Gpa)
Cartago	Sin exposición	99,75 (A)	0,24 (A)	49624,15 (A)	162,27 (A)	590,39 (A)	1,13 (A)
	Sin termo-tratamiento	97,08 (A)	0,25 (A)	49172,21 (A)	156,58 (A)	589,09 (A)	1,07 (A)
	160°C	108,43 (A)	0,23 (A)	56351,76 (A)	178,17 (A)	641,79 (A)	1,24 (A)
	180°C	87,78 (A)	0,25 (A)	42895,06 (A)	131,86 (A)	479,18 (A)	0,97 (A)
	200°C	91,55 (A)	0,22 (A)	42352,38 (A)	145,93 (A)	428,39 (A)	0,85 (A)
	220°C	82,65 (A)	0,17 (B)	56749,58 (A)	120,85 (A)	440,59 (A)	1,02 (A)
Santa Rosa de Pocosol	Sin exposición	82,10 (A)	0,10 (A)	49179,18 (A)	145,28 (A)	521,26 (A)	0,98 (A)
	Sin termo-tratamiento	96,15 (A)	0,23 (A)	53247,72 (A)	144,34 (A)	543,66 (A)	1,17 (A)
	160°C	99,18 (A)	0,22 (A)	55474,44 (A)	233,43 (A)	847,19 (A)	1,23 (A)
	180°C	67,08 (A)	0,20 (A)	37602,11 (A)	94,97 (A)	340,63 (A)	0,88 (A)
	200°C	76,43 (A)	0,19 (A)	47650,71 (A)	126,40 (A)	448,71 (A)	1,10 (A)
	220°C	78,93 (A)	0,17 (A)	54389,29 (A)	102,74 (A)	369,95 (A)	0,93 (A)

Nota: Valores con letras diferentes indican diferencias significativas entre la madera sin termo-tratamiento y en conserva a un 95% de confianza.

Castellanos y Aguilar (2006); confirman que hay una diferencia entre el módulo de elasticidad estático y el módulo de elasticidad dinámico, siendo mayor el dinámico, al igual que se obtuvo en este estudio, para un contenido de humedad menor al 12%, de ahí que los valores del MOEd sean mayores al MOE medido en forma destructiva (Cuadros 2 y 3).

Con el fin de mostrar el efecto de la aplicación de carga en la madera termo-tratada en contacto con el suelo se muestran las figuras 7 y 8, donde se detalla la relación que existe en el tratamiento térmico y la deformación de las muestras al ser sometidas a cargas. En el caso de la madera de teca la mayor deformación se presenta en la muestra que estuvo sin exposición y sin termo-tratamiento para ambos sitios, es decir; una mayor flexibilidad de la madera. Sin embargo en la madera termo-tratada ésta capacidad de flexionarse disminuye, ya que hay mayor deflexión con la misma aplicación de carga. Así mismo, se observa que en Cartago la madera termo-tratada a 220°C la que presentó menor deformación a la misma carga. (Figura 7A), mientras que en Santa Rosa de Pocosol (Figura 7B), las estacas termo-

tratadas a 200°C es la que presenta menor deformación de acuerdo a la carga aplicada. Esto significa que cuando la madera falle en estas condiciones de exposición, la falla será de tipo instantánea.

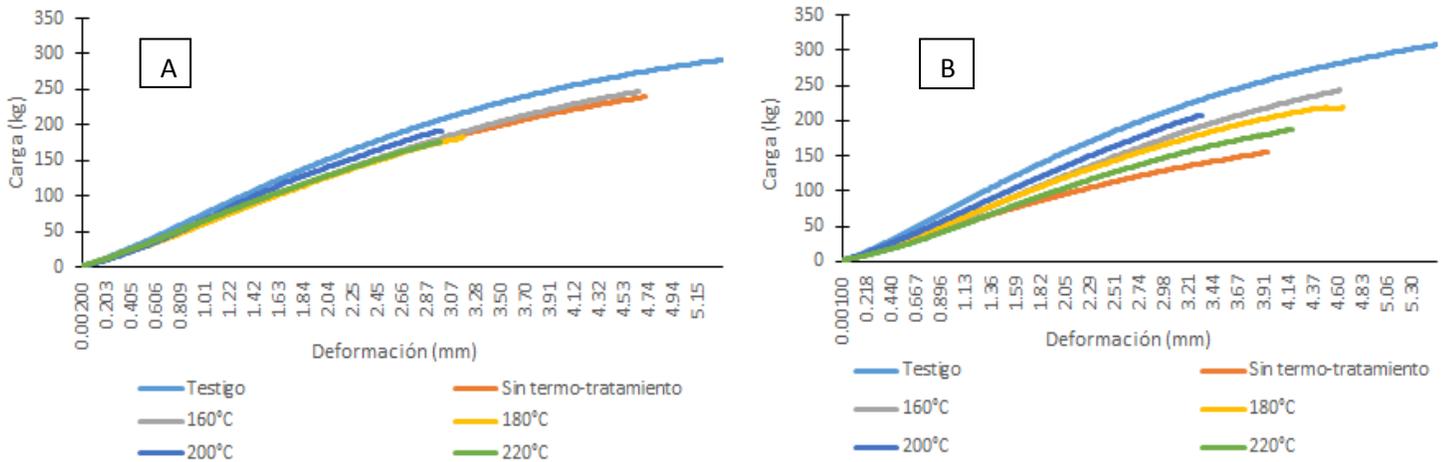


Figura 7. Deflexión que presentan las estacas de teca expuestas en Cartago (A) y Santa Rosa de Pocosol (B) según la carga aplicada.

Para el caso de la madera de melina se tiene un comportamiento similar al de la teca. La mayor deformación se logra en madera sin exponer y sin termo-tratar (Figura 8) y se observa que se tienen cargas ligeramente mayores en las muestras expuestas pero de poca deformación.

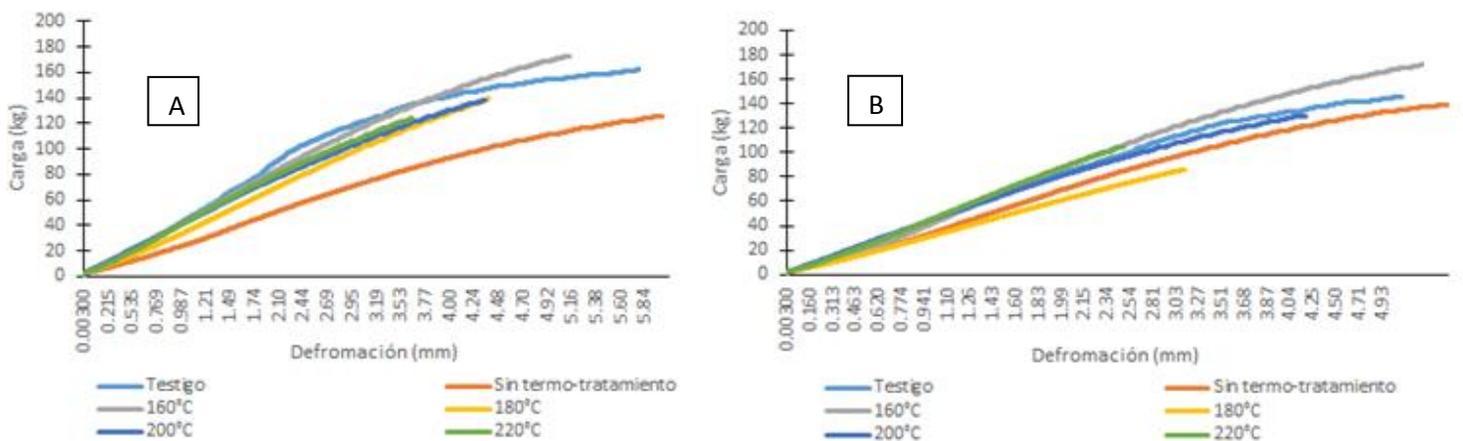


Figura 8. Deflexión que presentan las estacas de melina expuestas en Cartago (A) y en Santa Rosa de Pocosol (B) según la carga aplicada.

Las estacas expuestas a la intemperie durante 300 días, presentaron una mayor deformación, en relación a las muestras termo-tratadas a 220°C, mientras que para el sitio Cartago (Figura 8A), las estacas que presentaron mayor deformación fueron las no termo-tratadas que estuvieron expuestas a la intemperie, esta misma condición la presentan las estacas expuestas en Santa Rosa de Pocosol (Figura 8B).

Conclusiones

- El hongo *T. versicolor* degrada en mayor magnitud la madera de *G. arborea* en relación a *L. acuta*, lo anterior expresado en términos de pérdida de peso, además se determinó que la madera con una mayor temperatura de termo-tratamiento presenta menor pérdida de peso. Asimismo, la especie *G. arborea* es más susceptible a la degradación en comparación con *T. grandis*.
- La evaluación del biodeterioro de las estacas expuestas al suelo, determinaron que la madera termo-tratada de *T. grandis* presentó menor pérdida de peso en comparación con *G. arborea*, lo que significa una mayor resistencia.
- El módulo de elasticidad, módulo de ruptura y módulo de elasticidad dinámico para la madera termo-tratada de *T. grandis* expuesta a la intemperie en los sitios estudiados, fueron menores con respecto a las estacas en conserva. No obstante, hay una mayor resistencia al biodeterioro, lo que significa que la pérdida de resistencia es producto de la disminución en los componentes de la madera durante el proceso de termo-tratamiento.
- Las estacas de *G. arborea* sometidas a la temperatura de termo-tratado de 160°C, presentan un aumento en las propiedades de resistencia mecánica: módulo de elasticidad, módulo de ruptura y módulo de elasticidad dinámico. Lo que el termo-tratamiento es más efectivo en esta especie, para mantener las propiedades con el tiempo de exposición. Sin embargo, a esta temperatura

no se presenta una mayor diferencia con respecto a la madera sin termo-tratado.

- Se recomienda que la temperatura de termo-tratado de la madera para *T. grandis* y *G. arborea* sea de 200°C, para garantizar una buena resistencia de la madera contra agentes abióticos y los hongos estudiados; además esta temperatura presenta los mejores resultados en cuanto al MOE, MOR y MOEd.

Referencias

- Alcibar, E. 2014. Introducción al conocimiento de la madera. Recuperado de https://books.google.co.cr/books?id=BLAkCQAAQBAJ&pg=PT1&dq=introducci%C3%B3n+al+conocimiento+de+la+madera+2014+Alcibar&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=introducci%C3%B3n%20al%20conocimiento%20de%20la%20madera%202014%20Alcibar&f=false
- Alexopoulos, C. J. (1952). Introductory mycology. *Soil Science*, 74(6), 481.
- American Society for Testing Materials (ASTM). 2003. Standard Test Method of Accelerated Laboratory Test of Natural Decay Resistance of Woods. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.10. Philadelphia. USA. (ASTM D 2017-81 Reproved 1994).
- American Society for Testing Materials (ASTM). 2005. Standard Test Method of Accelerated Laboratory Test of Natural Decay Resistance of Woods. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.10. West Conshohocken, PA. (ASTM D 2017-05 Reproved 2014).
- American Society for Testing Materials (ASTM). 2003. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.10 West Conshohocken, PA. (ASTM D 143-14 Reproved 2014).
- Berrocal, A. 2008. Sistemas de preservación de madera para la construcción. Recuperado de Revista Forestal Mesoamericana Kurú. Ficha técnica 5 (15): 1-5.
- Bodig, J.; Jayne, B. 1993. *Mechanics of Wood Composites*. Reprinted edition. Kreiger Publishing Company. USA.
- Boonstra, M; Pizzi;A · Zomers, F; Ohlmeyer, M y Paul, W. 2006. The effects of a two stage heat treatment process on the properties of particleboard. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 64: 157–164

Bucur, V. 1995. Acoustics of wood. CRC Press.

Castellanos, J. y Aguilar, J. 2006. Comportamiento viscoelástico de la madera de prosopis sp. Madera y Bosques, 12(2), 3-15.

Cenci, R; Cocchi, L; Petrini, O; Sena, F; Siniscalco, C & Vescovi, L. 2011. Chemical elements in Ascomycetes and Basidiomycetes. Recuperado de http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eusoils_docs/other/EUR24415EN.pdf

Garay, R y Henriquez, M. 2012. Chemical acetylation treatment in radiata Pine wood. Maderas. Ciencia y Tecnología. Ficha técnica número 14(1): 103-13. Universidad de Bío Bío. Chile. Recuperado de <http://www.scielo.cl/pdf/maderas/v14n1/ART09.pdf>

Encinas, O y Mora, N. (2003). Patrones de degradación de las maderas de Pino caribe, Curarire y Drago por *Gloeophyllum trabeum*, *Trametes versicolor* y *Pycnoporus sanguineus*. Revista Forestal Venezolana, 47(1), 1-14.

Fonseca, W. 2004. Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L. f) en Costa Rica. Heredia. Costa Rica.

Hermoso, E; Mateo, R; Cabrero, J y Fernández, J. 2013. Tratamientos térmicos versus propiedades mecánicas en madera de Pino radiata. Sociedad Española de Ciencias Forestales.

- Hermoso, E; Mateo, R; Cabrero, J; Fernández, J, Conde, M y Troya, M. 2014. Characterization of thermally modified radiata pine timber. *Maderas-Cienc Tecnol* 17(4)
- Honorato, J; Vázquez, L y Zamudio, F. 2001. Durabilidad natural de la madera de cinco especies de *Quercus* del estado de Puebla.
- Hillis, W. 1984. High temperature and chemical effects on wood stability. *Wood Science and Technology*. Vol 18 (4): 281-293
- Holdridge, L. R. 1967. Life zone ecology. *Life zone ecology*. (rev. ed.).
- Kocafe, D; Poncsak, S; Tang, J y Bouazara, M. 2009. Effect of heat treatment on the mechanical properties of North American jack pine: thermogravimetric study. *Journal Mater Sci* (2010) 45:681–687
- Machek, L; Edlund, M; Sierra, R y Militz, H. 2004. A non-destructive approach for assessing decay in preservative treated wood. *Wood Sci Technol*. 411-417
- Márquez. A. 2008. Agentes de biodeterioro en madera en contacto con el suelo. Universidad experimental de Guayana. Recuperado de http://www.cidar.uneg.edu.ve/DB/bcuneg/EDOCS/TESIS/TRABAJOS_DE_ASCENSOS/Trabajo%20de%20Ascenso%20Agregado%20Arlenys%20Marquez.pdf
- Mohali, S y Castro, F. 2005. Evaluación de laboratorio de la durabilidad natural e inducida de las maderas de Pino Caribe (*Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis*) y Melina (*Gmelina arborea* Roxb.). *Revista Arbitrada de Divulgación Científica*. p. 52-59

- Moya, R; Leandro, L. 2010. Tecnología de maderas de plantaciones. Melina, Revista Forestal Mesoamericana Kurú. Ficha técnica número 5: 87-101.
- Moya, R; Muñoz, F; Berrocal, A. 2010. Tecnología de maderas de plantaciones. Teca, Revista Forestal Mesoamericana Kurú. Ficha técnica número 5: 117-131.
- Peraza, F. (2002). Protección preventiva de la madera., Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho. Madrid, España. 437 p.
- Pérez, J; Muñoz, J; de la Rubia, T, Martínez, J. 2002. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicelulosa and lignin: an overview. Int Microbiol. 5 (2). 53-63
- Tiryaki, S y Hamzacebi, C. 2013. Predicting modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of heat treated woods by artificial neural networks. Measurement 49. 266–274
- Trevisan, H; de Figueiredo, J; Pacheco, A; Grilo, J y de Carvalho, A. 2014. Analysis of rigidity loss and deterioration from exposure in a decay test field of thermorectificated *Eucalyptus grandis* wood. III Iberoamerican Congress on Wood Deterioration
- Salca, E; Hizioglu, S. 2014. Evaluation of hardness and surface quality of different wood species as function of heat treatment. Materials and Design 62.416–423
- Turner, I; Rousset, P; Rémond, R & Perré, P. 2010. An experimental and theoretical investigation of the thermal treatment of wood (*Fagus sylvatica*

L.) in the range 200–260°C. International Journal of Heat and Mass Transfer. 53. 715– 72

Venäläinen, M., Partanen, H., & Harju, A. 2014. The strength loss of scots pine timber in an accelerated soil contact test. International Biodeterioration & Biodegradation, 86, 150-152.

Yilgör, N; Kartal, S. 2009. Heat Modification of Wood: Chemical Properties and Resistance to Mold and Decay Fungi. Revista Forest Products Journal, 60(4): 357-361.

Younsi, R; Kocaefe, D; Poncsak, S; Kocaefe Y & Gastonguay, L. 2010. A high-temperature thermal treatment of wood using a multiscale computational model: Application to wood poles. Bioresource Technology 101 4630-4638

Zaid, L. 2004. Estudio del biodeterioro en madera de *Eucalyptus globulus* Lab. por el método gravimétrico. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales