



**Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**  
**Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera**



División de Estudios de Posgrado  
Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera

## Tesis

**Efecto del Termotratamiento en las Propiedades Físico-Mecánicas de *Eucalyptus nitens*  
(Deane & Maiden) Procedente de Una Plantación Comercial**

Que para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias y Tecnología de la Madera

Presenta

Gabriel Alejandro Garibay García

Director de Tesis

Doctor Raúl Espinoza Herrera

Morelia, Michoacán febrero del 2015

## RESUMEN

Las plantaciones forestales comerciales en el Estado de Michoacán juegan un papel muy importante en la actualidad ya que es una de las principales fuentes de abastecimiento para el área de celulósicos y se está incrementando su uso como madera aserrada. La madera de *Eucalyptus nitens* es de las especies más utilizadas para este tipo de plantaciones de acuerdo a la (CONAFOR, 2008), ya que presenta características importantes como alta resistencia a las bajas temperaturas y un rápido crecimiento. Se realizó un proceso de termotratamiento del *Eucalyptus nitens* con la finalidad de ver su efecto en las propiedades físico-mecánicas además de contribuir en la generación de información sobre otros posibles usos para la madera. Se utilizó madera al 12% de contenido de humedad. Las temperaturas empleadas para el termotratamiento fueron 140, 180 y 220 °C por tiempos de 1.5, 2.5 y 3.5 horas. Las propiedades que se evaluaron fueron densidad anhidra, pérdida de masa, absorción de agua, contracción, hinchamiento, dureza lateral y longitudinal, flexión estática, compresión paralela a la fibra, extracción de clavos lateral y longitudinal. Los ensayos fueron en base a las normas ISO y ASTM. Los resultados muestran que la madera sufre una disminución en la resistencia mecánica por efecto del termotratamiento que va del 6.7 al 53.3%. Mejorías en cuanto a hinchamiento y contracción se vieron reflejadas en la madera cuando se utilizaron temperaturas de 180 °C en adelante por tiempos mayores a 2.5 horas. La madera termotratada de *Eucalyptus nitens* puede ser utilizada en fachadas, marcos para puertas, ventanas, terrazas, muebles de jardín, contornos de piscinas donde el termotratamiento protegerá la madera contra la absorción de humedad, hongos de la pudrición y contra otros agentes de degradación.

Palabras clave: tratamiento térmico, tucalyptus nitens, plantación comercial.

## ABSTRACT

Commercial forest plantations in the State of Michoacán play an important role today as it is one of the main sources of supply for the area of cellulose and is increasingly used as lumber. The wood of *Eucalyptus nitens* is the species most used for this type of plantations according to (CONAFOR, 2008), as it has important characteristics such as high resistance to low temperatures and rapid growth. A process of heat treatment of *Eucalyptus nitens* in order to see its effect on the physical and mechanical properties and contribute in generating information about other possible uses for wood was performed. 12% wood moisture content was used. Temperatures employed in the heat treatment were 140, 180 and 220 °C for times of 1.5, 2.5 and 3.5 hours. The properties evaluated were anhydrous density, mass loss, water absorption, shrinkage, swelling, lateral and longitudinal hardness, static bending, parallel to the grain, removing nails lateral and longitudinal compression. Assays were based on the ASTM and ISO standards. The results show that wood suffers a decrease in the mechanical strength by the effect of heat treatment ranging from 6.7 to 53.3%. Improvements for swelling and shrinkage were reflected in the wood when temperatures of 180 °C were used hereinafter for 2.5 hours longer times. The heat-treated wood of *Eucalyptus nitens* can be used on walls, door frames, windows, terraces, garden furniture, contours of pools where the heat treatment protects the wood against moisture absorption, rotting fungi and other agents against degradation.

Keywords: heat treatment, tucalyptus nitens, commercial plantation.

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN -----	1
2.	ANTECEDENTES -----	3
	2.1. Plantaciones Forestales Comerciales -----	3
	2.2. Generalidades de la especie -----	3
	2.3. Termotratamiento -----	5
3.	JUSTIFICACIÓN -----	8
4.	HIPÓTESIS -----	9
5.	OBJETIVOS -----	9
	5.1. Objetivo general -----	9
	5.2. Objetivos específicos -----	9
6.	MATERIALES Y MÉTODOS -----	10
	6.1. Procedencia del material de estudio -----	10
	6.2. Aserrío -----	10
	6.3. Secado -----	10
	6.4. Estudio anatómico -----	11
	6.5. Termotratamiento -----	11
	6.5.1. Habilitación del material -----	11
	6.5.2. Termotratamiento en atmósfera normal -----	12
	6.6. Análisis termo gravimétrico (TGA) -----	12
	6.7. Evaluación del cambio de coloración por efecto del termotratamiento -----	13
	6.8. Pruebas físicas -----	14
	6.8.1. Densidad -----	14
	6.8.2. Absorción de agua -----	14
	6.8.3. Contracción e hinchamiento -----	15
	6.9. Pruebas mecánicas -----	15
	6.9.1. Dureza Janka -----	16
	6.9.2. Flexión estática -----	16
	6.9.3. Compresión paralela a la fibra -----	16
	6.9.4. Extracción de clavos -----	17
	6.10. Análisis estadístico -----	17

7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN -----	18
7.1.	Aserrió -----	18
7.2.	Secado -----	18
7.3.	Estudio anatómico -----	18
7.3.1.	Descripción de la rodaja -----	18
7.3.2.	Descripción macroscópica de la madera -----	19
7.3.3.	Descripción microscópica de la madera -----	20
7.4.	Pérdida de masa por efecto del termotratamiento -----	23
7.5.	Análisis termo gravimétrico (TGA) -----	25
7.6.	Cambio de color por efecto del termotratamiento -----	27
7.7.	Pruebas físicas de la material termotratado -----	29
7.7.1.	Densidad normal y anhidra -----	29
7.7.2.	Absorción de agua -----	31
7.7.3.	Contracción -----	35
7.7.4.	Hinchamiento -----	40
7.8.	Pruebas mecánicas del material termo tratado -----	46
7.8.1.	Flexión estática -----	46
7.8.2.	Dureza lateral -----	50
7.8.3.	Dureza longitudinal -----	52
7.8.4.	Compresión paralela a la fibra -----	54
7.8.5.	Extracción de clavos lateral -----	57
7.8.6.	Extracción de clavos longitudinal -----	58
8.	CONCLUSIONES -----	59
9.	RECOMENDACIONES -----	61
10.	BIBLIOGRAFÍA -----	62
11.	ANEXOS -----	69

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. 6.1	Normas ISO y ASTM empleadas en este estudio -----	12
Tabla. 6.2	Diseño empleado para la aplicación del temo tratamiento -----	12
Tabla. 7.1	Características anatómica de tres <i>Eucalyptus</i> -----	22
Tabla. 7.2	Pérdida de masa por efecto del termotratamiento -----	23
Tabla. 7.3	Cambio de coloración por efecto del termotratamiento -----	28
Tabla. 7.4	ANOVA densidad anhidra -----	30
Tabla. 7.5	Efecto del termotratamiento en la densidad anhidra -----	33
Tabla. 7.6	Efecto del termotratamiento en la absorción de agua a 2 horas -----	33
Tabla. 7.7	Efecto del termotratamiento en la absorción de agua a 24 horas -----	33
Tabla. 7.8	Efecto del termotratamiento en la contracción radial a 2 horas -----	34
Tabla. 7.9	Efecto del termotratamiento en la contracción radial a 24 horas -----	34
Tabla. 7.10	Efecto del termotratamiento en la contracción tangencial a 2 horas -----	37
Tabla. 7.11	Efecto del termotratamiento en la contracción tangencial a 24 horas -----	37
Tabla. 7.12	Efecto del termotratamiento en el hinchamiento radial a 2 horas -----	40
Tabla. 7.13	Efecto del termotratamiento en el hinchamiento radial a 24 horas -----	40
Tabla. 7.14	Efecto del termotratamiento en el hinchamiento tangencial a 2 horas -----	42
Tabla. 7.15	Efecto del termotratamiento en el hinchamiento tangencial a 24 horas -----	42
Tabla. 7.16	ANOVA en flexión (MOR) -----	46
Tabla. 7.17	Resistencia a la flexion en madera termotratada -----	47
Tabla. 7.18	Dureza lateral en madera termotratada -----	47
Tabla. 7.19	Dureza longitudinal en madera termotratada -----	47
Tabla. 7.20	ANOVA en dureza lateral -----	49
Tabla. 7.21	ANOVA en dureza longitudinal -----	51
Tabla. 7.22	Compresión paralela en madera termotratada -----	54
Tabla. 7.23	Resistencia a la extracción de clavos lateral en madera termotratada -----	54
Tabla. 7.24	Resistencia a la extracción de clavos longitudinal en madera termotratada -----	54
Tabla. 7.25	ANOVA en compresión -----	55
Tabla. 7.26	Recomendaciones para el uso del termotratamiento -----	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.	2.1	Hojas de <i>Eucalyptus nitens</i> -----	4
Figura.	2.2	Corteza de <i>Eucalyptus nitens</i> -----	4
Figura.	6.1	Madera de Eucalipto <i>nitens</i> flejada -----	11
Figura.	6.2.	Estufa de secado -- -----	11
Figura.	7.1	Defecto del secado -----	18
Figura.	7.2	Rodaja de madera de <i>Eucalyptus nitens</i> -----	19
Figura.	7.3	Madera de <i>Eucalyptus nitens</i> -----	19
-			
Figura	7.4	Parénquima leñoso -----	19
Figura.	7.5	Porosidad -----	19
Figura.	7.6	Rayos -----	21
Figura.	7.7	Fibras -----	21
Figura.	7.8	Pérdida de masa por efecto del termotratamiento -----	24
Figura.	7.9	Análisis TGA en madera termo tratada a 1.5 horas -----	25
Figura.	7.10	Análisis TGA en madera termo tratada a 2.5 horas -----	26
Figura.	7.11	Análisis TGA en madera termo tratada a 3.5 horas -----	26
Figura.	7.12	Cambio de coloración por efecto del termotratamiento -----	27
Figura.	7.13	Efecto del termotratamiento en la densidad anhidra -----	30
Figura.	7.14	Efecto del termotratamiento en la absorción de agua a 2 horas -----	31
Figura.	7.15	Efecto del termotratamiento en la absorción de agua a 24 horas -----	32
Figura.	7.16	Efecto del termotratamiento en la contracción radial a 2 horas -----	35
Figura.	7.17	Efecto del termotratamiento en la contracción radial a 24 horas -----	36
Figura.	7.18	Efecto del termotratamiento en la contracción tangencial a 2 horas -----	38
Figura.	7.19	Efecto del termotratamiento en la contracción tangencial a 24 horas -----	38
Figura.	7.20	Efecto del termotratamiento en el hinchamiento radial a 2 horas -----	41
Figura.	7.21	Efecto del termotratamiento en el hinchamiento radial a 24 horas -----	41
Figura.	7.22	Efecto del termotratamiento en el hinchamiento tangencial a 2 horas -----	44
Figura.	7.23	Efecto del termotratamiento en el hinchamiento tangencial a 24 horas -----	45
Figura.	7.24	Efecto del termotratamiento en la resistencia a la flexión -----	48
Figura.	7.25	Flexión en probetas termo tratadas -----	48

Figura	7.26	Efecto del termotratamiento en la dureza lateral -----	50
Figura	7.27	Dureza lateral en probetas termotradas -----	50
Figura	7.28	Efecto del termotratamiento en la dureza longitudinal -----	52
Figura	7.29	Dureza longitudinal en probetas termotradas -----	52
Figura	7.30	Efecto del termotratamiento en la compresi3n paralela a la fibra -----	55
Figura	7.31	Compresi3n en probetas termotradas -----	55
Figura	7.32	Efecto del termotratamiento en la extracci3n de clavos lateral -----	56
Figura	7.33	Efecto del termotratamiento en la extracci3n de clavos longitudinal -----	57
Figura	7.34	Extracci3n de clavos en probetas termotradas -----	57

## ANEXOS DE TABLAS

Anexo	10.1	ANOVA Absorción de agua 2 horas -----	67
Anexo	10.2	ANOVA Absorción de agua 24 horas -----	67
Anexo	10.3	ANOVA Contracción radial 2 horas -----	67
Anexo	10.4	ANOVA Contracción radial 24 horas -----	67
Anexo	10.5	ANOVA Contracción tangencial 2 horas -----	67
Anexo	10.6	ANOVA Contracción tangencial 24 horas -----	67
Anexo	10.7	ANOVA Hinchamiento radial 2 horas -----	68
Anexo	10.8	ANOVA Hinchamiento radial 24 horas -----	68
Anexo	10.9	ANOVA Hinchamiento tangencial 2 horas -----	68
Anexo	10.10	ANOVA Hinchamiento tangencial 24 horas -----	68
Anexo	10.11	ANOVA Extracción de clavos lateral -----	68
Anexo	10.12	ANOVA extracción de clavos longitudinal -----	68
Anexo	10.13	Secuela de secado utilizada como guía -----	68

## ANEXOS DE FIGURAS

Anexo	10.1	Probetas termotratadas a diferentes temperaturas -----	69
Anexo	10.2	Probetas en inmersión en agua -----	70
Anexo	10.3	Cambio de coloración -----	70

## 1. INTRODUCCIÓN.

Una Plantación Forestal Comercial (PFC) es el establecimiento y manejo de especies forestales en terrenos que han perdido su vegetación forestal natural, con el objeto de producir materias primas maderables y no maderables, para su industrialización y/o comercialización.

En México existen aproximadamente 22 millones de hectáreas aptas para desarrollar plantaciones forestales comerciales, de las cuales la Comisión Nacional Forestal CONAFOR (2008) menciona que existen aproximadamente 13.9 millones de hectáreas para el establecimiento de PFC, en donde se tiene calidad de suelo y climas favorables para obtener un rápido crecimiento. También se cuenta con mano de obra disponible y un mercado interno que demanda más materias primas forestales cada día.

A nivel mundial, las especies más empleadas para plantaciones comerciales son *Pinus* y *Eucalyptus* cubriendo un 70%. Los pinos más utilizados son *Pinus radiata*, *P. caribaea*, *P. taeda*, *P. patula*, *P. elliottii*, *P. palustris* y *P. oocarpa*. Dentro de los eucaliptos, los más utilizados son *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, y *E. globulus*. *Tectona grandis* cubre el 15% y el 12% otras latifoliadas como la *Gmelina arbórea*, *Acacia mamsii*, *A. mangium* y *Alibizia falcata* y el 3% restante le corresponde a coníferas diferentes al pino CONAFOR (2008).

La superficie de plantaciones comerciales en México comparada con otros países sigue siendo pequeña, se estima que solo existen 34 mil hectáreas de plantaciones comerciales. El 63% de la producción es destinado al área de celulósicos y el 33% le pertenece a la madera aserrada. Las principales especies utilizadas son el *Eucalyptus* 39%, *Pinus* 30%, *Cedrela odorata* 7%, *Swietenia macrophylla* 4% y el resto a *Gmelina arbórea* y *Hevea brasiliensis*, Muñoz *et al.*, (2010), CONAFOR (2008).

Desde hace aproximadamente una década se han venido consolidando las plantaciones forestales con fines comerciales en el Estado de Michoacán, principalmente con la especie de *Eucalyptus* debido a su rápido crecimiento, adaptabilidad a distintos sitios y su resistencia a las bajas temperaturas. Las plantaciones se establecen en su mayoría en terrenos que fueron de vocación agrícola y que debido a algunos factores se encuentran inutilizadas.

Michoacán es un Estado considerado de vocación forestal. Sin embargo, el abastecimiento de la madera se ve afectado por diferentes factores entre los cuales se pueden mencionar la tala ilegal, los cambios de uso de suelo y los incendios. Para contrarrestar este problema se han establecido plantaciones forestales con fines de comercialización.

Los diámetros que se obtienen de las plantaciones forestales comerciales son homogéneos en comparación con la gran variedad de diámetros que se obtienen directamente de los bosques naturales. Debido a esto, los usos para estos dos tipos de madera son diferentes. En Michoacán existe la empresa Forestaciones Operativas de México S. A. de C.V. dedicada al establecimiento de este tipo de plantaciones principalmente con las especies de *Pinus* y *Eucalyptus*.

Actualmente, se está aplicando termotratamiento a maderas de plantaciones forestales, con la finalidad de darles un valor agregado ya que les permite ser utilizadas en exteriores. El termotratamiento es un proceso que consiste en aplicar temperatura lentamente a la madera utilizando temperaturas entre los 160 y 240 °C. Entre sus principales características, se encuentra que disminuye la higroscopicidad de la madera haciéndola más estable dimensionalmente y la vuelve más resistente al ataque de agentes de deterioro como hongos, termitas y rayos UV.

Este trabajo forma parte de varios estudios en relación a la caracterización anatómica, física, mecánica y química de la madera de PFC en el Oriente de Michoacán. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto que tiene la aplicación de termotratamiento en las propiedades físicas y mecánicas de madera de *Eucalyptus nitens* de 8 años de edad e incrementar sus posibles usos.

## 2. ANTECEDENTES.

### 2.1. Plantaciones forestales comerciales.

En el mundo las PFC ocupan un lugar muy importante. Sin embargo, México está adentrándose en este tema a un paso muy lento. Esto se debe por un lado a que en este país aún es posible conseguir madera de buena calidad en nuestros bosques y por otro lado a que en la sociedad no se crea conciencia de la importancia de las PFC mediante reformas en el sector forestal.

En México la superficie cubierta por PFC de diversas especies a nivel nacional alcanza aproximadamente 117,479 ha, de las cuales las especies maderables representan el 85.2% distribuidas principalmente en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche siendo el cedro rojo y el eucalipto las especies que se han plantado en mayor escala. El género *Eucalyptus* abarca una superficie de 21,168 hectáreas plantadas, seguido muy de cerca de *Cedrela odorata* con 20,705 hectáreas, después se encuentran especies como *Pinus* con 13, 566 hectáreas, *Gmelina arborea* con 10,830 hectáreas, *Tectona glandis* con 9,024 hectáreas y *Swietenia macrophylla* con 6,328 hectáreas. Michoacán representa el 4% del total de ha plantadas a nivel nacional ubicadas estas en su mayoría en el Oriente del Estado CONAFOR (2008).

### 2.2. Generalidades de la especie.

Familia: *Myrtaceae*.

Género: *Eucalyptus*.

Especie: *Eucalyptus nitens*.

Nombre común: Eucalipto.

Origen: Sudeste de Australia.

El *Eucalyptus nitens* es un árbol de tamaño grande que llega a crecer hasta los 60 m, en su lugar de origen ocasionalmente alcanza los 90 m de alto. Sus hojas jóvenes son opuestas, de ovaladas a elípticas, las hojas adultas son estrechas y lanceoladas midiendo entre 15 a 25 cm de largo y de 1.5 a 2.5 cm de ancho, verdes y brillosas (Figura 2.1). Tiene alta resistencia al frío, rápido crecimiento, adaptabilidad a distintos sitios. La corteza es persistente en la parte baja del tronco, su color va de gris a café grisáceo, entre fibrosa y escamosa, lisa en la parte exterior mudándola en largos listones

(Figura 2.2). Su inflorescencia es de 7, el pedúnculo estrechamente aplanado, el fruto es cilíndrico ovoide de 4 a 7 mm de largo y de 4 a 6 mm de diámetro.

Densidad básica de la madera: 490 a 520 kg/m<sup>3</sup> a los 10 años de edad.

Usos: Pulpa y papel, madera aserrada, chapas y tableros, productos de ingeniería INFOR (2004).



Figura 2.1. Hojas de *Eucalyptus nitens*



Figura 2.2. Corteza de *Eucalyptus nitens*

En las zonas de clima templado-frío en Michoacán, el 69% de las especies utilizadas en plantaciones corresponden al género *Pinus*, sobresaliendo *Pinus pseudostrobus*, el 7% le corresponde a la especie *Eucalyptus* y el 24 % restante diferentes especies. También existen plantaciones con especies nativas en zonas tropicales, entre las que se encuentran *Caesaelpinia platyloba*, *Tabebuia rosea*, *Roseodendron donnell-smithii* y *Leucaena microcarpa* COFOM (2003).

Las plantaciones de *Eucalyptus* con fines celulósicos resultan rentables para todas las densidades de población, pero se debe tener cuidado con el manejo de suelos, control de malezas y fertilización Guerra (2012). Durante mucho tiempo el *Eucalyptus globulus* fue el preferido para material celulósico debido a su fibra larga aun siendo una latifoliada. El *Eucalyptus nitens* ha cautivado el

interés de los productores forestales dadas sus características tan importantes como lo son la resistencia a heladas, rápido crecimiento y su incremento medio anual que va de los 20 a 45 m<sup>3</sup> por hectárea por año, superando al *Eucalyptus globulus* que es de 15 a 25 m<sup>3</sup>. De igual manera el manejo de alto valor de las plantaciones de *Eucalyptus nitens* orientado a la producción de rollizos para aserrío, chapa y pulpa, es una opción productiva con alta rentabilidad, ya que frente a la opción de celulósicos permite un incremento estimado entre los 790 y 1220 dólares por hectárea Valencia y Cabrera (2007).

Se han realizado muchos estudios sobre secado y caracterización de madera de plantaciones forestales con el objetivo de acrecentar la gama de usos para estas maderas. Rozas *et al.*, (2005), encontraron que la madera de *Eucalyptus nitens* presenta una fuerte evaporación superficial, generando altos gradientes de humedad, contracciones prematuras a nivel superficial y tensiones de secado una vez alcanzando el punto de saturación de la fibra (PSF) lo cual da origen a grietas superficiales e internas.

Otros estudios se han realizado con la finalidad de conocer sus propiedades físicas y mecánicas para predecir en gran porcentaje el comportamiento que tendrá la madera como producto final.

### 2.3. Termotratamiento.

Uno de los procesos que se le da a las maderas obtenidas de PFC es el termotratamiento. Este proceso se ha utilizado desde los años de 1970, pero fue hasta el año 2000 cuando tuvo un incremento considerable Rowell *et al.*, (2002), Lanchas (2011). Es considerado un método amigable con el medio ambiente ya que no utiliza ningún compuesto químico Peláez *et al.*, (2013). Este método aumenta la durabilidad biológica que es una de las propiedades más importantes en todos aquellos materiales que serán utilizados en exteriores donde se tendrá contacto directo con agentes biodeteriorantes Calonego *et al.*, (2010).

Este proceso consiste en someter la madera a temperaturas elevadas que van desde los 120 a 280 °C por tiempos de 15 minutos a 24 horas con la finalidad de eliminar las hemicelulosas, disminuyendo las propiedades higroscópicas e incrementando su durabilidad natural. Hillis (1984), Jämsä y Viitaniemi (2001), Repellin y Guyonnet (2005), Inari *et al.*, (2007). Mejora el

comportamiento de la madera ante la humedad debido a que el contenido de humedad en equilibrio disminuye alrededor de un 61% Severo *et al.*, (2012). Su aplicación se puede realizar en ambientes controlados utilizando algún gas inerte (Nitrógeno, Argón, Bióxido de Carbono) y/o en cámara normal con presencia de oxígeno Homan *et al.*, (2000), Vernois (2001), Waskett y Selmes (2001), Calonego *et al.*, (2010).

Al aplicar termotratamiento se tiene como resultado una transferencia de calor que se ve reflejada en la disminución de masa Kadem *et al.*, (2011), este parámetro puede ser ajustado en base a la especie y contenido de humedad de la madera que se va utilizar Priadi y Hiziroglu (2013). El efecto en la pérdida de masa aumenta en relación al aumento del tiempo y la temperatura Severo *et al.*, (2012).

Por otra parte cuando se aplica termotratamiento la madera toma un color oscuro Jämsä y Viitaniemi (2001), Mazela *et al.*, (2004). El cambio e intensidad de coloración se ve influenciado por las características macroscópicas de la madera entre las cuales se pueden mencionar, el color natural de la madera (si esta es una madera oscura por naturaleza el cambio de coloración no será tan significativo), la cantidad de extraíbles contenidos en la madera, si es madera de conífera o latifoliada, si las piezas tratadas contienen madera de reacción, si la madera tratada presenta zonación o cambios de transición visible y si existe presencia de nudos.

De manera general, se menciona que existen cinco importantes fases en el proceso de termotratamiento, la primera consiste en eliminar el agua de la madera y esta ocurre en dos etapas, la primera durante el secado por evaporación a temperatura alrededor de 100 °C y la segunda durante la deshidratación y despolimerización. Una segunda fase en donde la madera se somete a temperaturas entre los 100 y 250 °C en donde la temperatura modifica los constituyentes de la madera causando degradaciones irreversibles Órfao *et al.*, (1999), Kamdem *et al.*, (2002). La tercera fase se da entre los 250 y 330 °C en donde se tiene una eliminación total de las hemicelulosas Vernois (2001), Weiland y Guyonnet (2003). La celulosa se destruye en una cuarta fase la cual ocurre entre los 330 y 370 °C Bhuiyan *et al.*, (2000), (2001), Mamleev *et al.*, (2009). Finalmente la quinta fase corresponde a temperaturas por arriba de los 350 °C en donde se produce una degradación intensa de la lignina. Beall *et al.*, (1974), Brito y Barricheco (1979), Gomes y Oliveira (1980), Vovelle y Mellottee (1982), Guedira (1988), Haykiri-Açma (2003), Brito *et al.*, (2008), Espinoza-Herrera (2008).

Generalmente el termotratamiento disminuye las propiedades de resistencia de la madera. El módulo de elasticidad se ve afectado ya que presenta una disminución de entre 15 y 23%. La resistencia a la flexión disminuye entre un 43 y 50% Thomas (2004), Esteves *et al.*, (2007), Severo *et al.*, (2012). Sin embargo, en algunos casos su resistencia aumenta ya que la vuelve más rígida Kollmann y Schneider (1963), Yildiz (2002), Gosselink *et al.*, (2004), Wang y Cooper (2005), Hakkou *et al.*, (2006), Derya y Bilgin (2008), Korkut (2008), Chaouch (2010), César, (2012), González *et al.*, (2012), Muñoz (2013).

Estudios realizados para evaluar el efecto del termotratamiento en las propiedades físicas y mecánicas de maderas como el *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris* y *Acer trautuetteri* en donde se han utilizado temperaturas que van desde los 120 a 200 °C y tiempos de 2 a 10 horas, se ha obtenido que la densidad, la compresión, la dureza y la resistencia a la flexión disminuyen desde un 15 a un 46%. La estabilidad dimensional de las maderas aumenta con el aumento de la temperatura y el tiempo de tratamiento, es el caso para madera de *Pinus sylvestris* cuando se utilizan temperaturas de 180 °C y tiempos de 10 horas disminuye el hinchamiento un 22%, 34% y 20% en el sentido radial, tangencial y longitudinal respectivamente Derya y Bilgin (2007), Gökhan *et al.*, (2007), Korkut y Guller (2008), Korkut (2008).

Gunduz *et al.*, (2008) reportan que la aplicación de termotratamiento en madera de *Pinus nigra* utilizando temperaturas de 120 °C a 180°C y periodos de 2, 6 y 10 horas reduce la rugosidad de la madera y la dureza aumenta proporcionalmente al aumento de la temperatura.

Thibaud *et al.*, (2011) realizaron un estudio para evaluar las propiedades de durabilidad ante las termitas del *Pinus pinaster* aplicando termotratamiento en vacío. Se utilizaron temperaturas de 140, 160, 180, 200, 230 y 260 °C por tiempo de 4 horas. El resultado que se tuvo es que el deterioro de las termitas disminuyó conforme aumenta la temperatura del termotratamiento. Adicionalmente obtuvieron como resultado que cuando se utilizan temperaturas de 230 y 260 °C se tiene una disminución en módulo de ruptura (MOR) de 42.5 y 62.5% respectivamente.

Severo *et al.*, (2012) efectuaron un estudio sobre los cambios físico-químicos de madera juvenil y madura de *Pinus elliottii* causados por el termotratamiento a dos temperaturas 100 y 200 °C con tiempo de 4 horas. El resultado fue que el contenido de humedad en equilibrio y la contracción volumétrica disminuyeron un 20 y 16% respectivamente esto para la madera madura. En cuanto a

la madera juvenil, se obtuvo una disminución de 22 y 14% para el contenido de humedad en equilibrio y la contracción volumétrica respectivamente. La gravedad específica no se vio afectada significativamente. Sin embargo, el contenido de holocelulosa sí disminuyó un 3.4%.

### 3. JUSTIFICACIÓN.

Michoacán aunque es considerado un Estado con vocación forestal, presenta problemas de abastecimiento de madera debido a diferentes factores: clandestinaje, incendios, cambios de uso de suelo, sobrepastoreo y áreas naturales protegidas. Una buena alternativa para contrarrestar el problema de abastecimiento es el establecimiento de Plantaciones Forestales Comerciales (PFC).

La composición de la madera tanto de bosque natural como de plantación forestal comercial es completamente diferente en diámetros y anatomía. Debido a esto, sus propiedades tanto físicas como mecánicas presentan diferencias y por consiguiente los usos para los que serán destinadas cada una de estas serán diferentes.

La empresa Forestaciones Operativas de México S. A. de C.V. dedicada al establecimiento y silvicultura de PFC principalmente con las especies de *Eucalyptus*, tiene la necesidad de caracterizar su materia prima y determinar otros posibles usos ya que hasta la fecha el 100% se destina para el área de celulósicos y partícula para tableros. En este estudio se decidió aplicar termotratamiento en la madera de *Eucalyptus nitens* con la finalidad de evaluar su efecto en las propiedades físico-mecánicas y con ello incrementar los posibles usos de esta especie.

#### 4. HIPÓTESIS.

- El termotratamiento disminuye las propiedades higroscópicas de la madera de *Eucalyptus nitens*.
- El termotratamiento en la madera de *Eucalyptus nitens* disminuye sus propiedades de resistencia mecánica.

#### 5. OBJETIVOS.

##### 5.1. Objetivo general.

Aplicar termotratamiento en madera de *Eucalyptus nitens* de 8 años y analizar su efecto en las propiedades físico-mecánicas.

##### 5.2. Objetivos específicos.

- Realizar el estudio anatómico de la madera de *Eucalyptus nitens*.
- Aplicar termotratamiento en madera a diferentes temperaturas 140, 180 y 220 °C por tiempos de 1.5, 2.5 y 3.5 horas y analizar su efecto en las propiedades higroscópicas y de resistencia.
- Realizar pruebas físicas.
  - a) Densidad.
  - b) Pérdida de masa.
  - c) Absorción de agua.
  - d) Contracción e hinchamiento.
  - e) Dureza estática.
- Realizar Pruebas mecánicas.
  - a) Flexión estática.
  - b) Compresión paralela a la fibra.
  - c) Extracción de clavos.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS.

### 6.1. Procedencia del material de estudio.

La madera de *Eucalyptus nitens* utilizada para este estudio fue colectada en una PFC de 8 años ubicada en el predio el “Chilacayote” Municipio de Maravatío, Michoacán, México, el cual se localiza al Noreste del Estado en las coordenadas 19°54” de latitud Norte y 100°27” de longitud Oeste a una altura de 2020 msnm, su clima es templado con lluvias en verano con una precipitación pluvial anual promedio de 897.7 milímetros y temperaturas que oscilan entre los 14.1 y 29.9 °C. El bosque predominante es el mixto, estando presente el pino, encino, aile, álamo, fresno, sauce y sabino y por otro lado, el bosque de coníferas con oyamel, junípero y pino INAFED (s/f).

### 6.2. Aserrío.

Se utilizaron 3 m<sup>3</sup> de madera en rollo los cuales fueron colectados en una superficie de 2 hectáreas. El aserrío se realizó en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera (FITECMA), utilizando una sierra vertical simple de 4” dotada con sistema de fricción, que permite aserrar trozas con diámetros en punta de hasta de 15 cm. Durante el proceso de aserrío se procuró la obtención de piezas con cortes radiales o bastardos tendiendo a radial, obteniendo en su mayoría piezas de 2” y en un menor porcentaje de 1” de espesor, con la finalidad de cumplir con las especificaciones que establecen las normas ISO y ASTM para las probetas empleadas en este estudio.

### 6.3. Secado.

El secado de la madera se realizó en una estufa convencional marca Hildebrand® (Figura 6.1 y 6.2) con capacidad de 1 m<sup>3</sup>. Se utilizó una secuela lenta (Anexo 13) en base a lo establecido por Simpson (1996) en el Dry-Kiln Schedules. Las condiciones iniciales fueron una temperatura de 36 °C con humedad relativa de 93% dejando la madera a un contenido de humedad final del 12%.



Figura 6.1. Madera de Eucalipto *nitens* flejada



Figura 6.2. Estufa de secado

#### 6.4. Estudio anatómico.

Se obtuvieron rodajas de diámetro a la altura del pecho (DAP) las cuales fueron descortezadas y habilitadas. Se obtuvieron cubos los cuales fueron sometidos a ablandamiento alrededor de 250 horas. Parte de los cubos se utilizó para realizar maceración para determinar la longitud de fibra en base a la metodología establecida por Guridi (2003). Se realizaron 100 medidas al azar para cada uno de los elementos utilizando microscopio con aumento de 10X y 40X. El resto fue utilizado para realizar los cortes en microtomo. Para teñir las muestras se utilizó pardo de Bismark y resina para el montaje.

#### 6.5. Termotratamiento.

##### 6.5.1. Habilitación del material.

La habilitación de las probetas para los ensayos físicos y mecánicos se realizó de acuerdo a las especificaciones de las normas ISO (*International Organization for Standardization*) y ASTM (*American Society for Testing and Materials*) como se puede observar en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Normas ISO y ASTM empleadas en este estudio.

Ensayo	Norma
Densidad	ISO – 3133
Pérdida de masa	
Contracción	ISO – 4469
Hinchamiento	ISO – 4859
Absorción de agua	
Dureza estática	ISO – 3350
Flexión estática	ISO – 3133
Compresión paralela a la fibra	ISO – 3132
Extracción de clavos	ASTM – D143 – 09

#### 6.5.2. Termotratamiento en atmósfera normal.

La aplicación de termotratamiento se llevó a cabo en presencia de oxígeno utilizando un horno marca Felisa® con programación digital y una capacidad de 250 °C. El diseño experimental fue de dos factores (tiempo y temperatura) cada uno de ellos con tres niveles (Tabla 6.2), utilizando 15 probetas para cada una de las condiciones del termotratamiento.

Tabla 6.2. Diseño empleado para la aplicación del termotratamiento.

<i>Tiempo</i>	Temperatura		
	140 °C	180 °C	220 °C
<i>1.5 h</i>	*15	*15	*15
<i>2.5 h</i>	*15	*15	*15
<i>3.5 h</i>	*15	*15	*15

\*Número de piezas por ensayo.

#### 6.6. Análisis termo gravimétrico (TGA).

Con la finalidad de analizar el comportamiento de la madera de *Eucalyptus nitens* cuando se somete a altas temperaturas y predecir la pérdida de masa cuando se le aplica tratamiento térmico, se realizaron ensayos de termogravimetría (TGA) de 20 °C a 600 °C con una rampa de calentamiento de 10 °C/min. Se utilizó un equipo TGA/SDTA851e marca Mettler Toledo® evaluando la pérdida de masa en función de la temperatura. Todos los ensayos se realizaron por duplicado. Las muestras consistieron en 5 mg de material por tratamiento, las cuales fueron

colocadas en crisoles de cerámica. Los crisoles previamente fueron colocados en una mufla a 575 °C para eliminar cualquier tipo de impurezas.

#### 6.7. Evaluación del cambio de coloración por efecto del termotratamiento.

Para determinar el cambio de coloración causado en la madera por el termotratamiento se utilizó un espectrómetro con capacidad de 190 - 850 nm marca StellarNet EPP2000 UV-Vis. Este equipo utiliza una fuente de luz para la medición del cambio de color y emplea una sonda de fibra óptica de acuerdo a las especificaciones de la ASTM D2244 (2001). Se utilizó un Software SpectraWiz (CIE, 1986) para la transformación de los datos. Se midieron tres puntos por muestra para cada uno de los tratamientos. Los cambios de coloración ( $\Delta E_{ab}$ ) y el cálculo de la luminosidad relativa ( $\Delta L_{rel}$ ) se calcularon utilizando las fórmulas 1 y 2.

$$\Delta L_{rel} = \frac{L_{final}^* - L_{initial}^*}{L_{initial}^*} \times 100 \% \quad (1)$$

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (2)$$

Donde:

$\Delta L$ ,  $\Delta a$  y  $\Delta b$  representan las diferencias entre los valores de L, a, y b respectivamente. Un incremento en ( $\Delta L > 0$ ) significa que existió un ligero cambio. Valores de ( $-\Delta L$ ) significa que las muestras se oscurecieron. Valores positivos en  $\Delta a$  indican un cambio de color hacia rojo y valores de ( $-\Delta a$ ) indican un cambio de color hacia verde. Valores positivos en ( $\Delta b$ ) indican un cambio de coloración hacia amarillo y valores de ( $-\Delta b$ ) indican cambio de color hacia el azul (Anexo 10.3).  $L$  = reflectancia de la muestra. Cuando  $L = 0$  (la muestra no refleja la luz), cuando  $L = 100$  (la muestra refleja 100% la luz).

## 6.8. Pruebas físicas.

### 6.8.1. Densidad.

La densidad de la madera es de las propiedades más importantes ya que de ella depende en gran porcentaje su comportamiento mecánico, su trabajabilidad, su aptitud a los acabados, su estabilidad dimensional y su capacidad calorífica. Está definida como la masa de un material por unidad de volumen y puede ser reportada en  $\text{g/cm}^3$  ó  $\text{kg/m}^3$ .

En este trabajo se determinó la densidad normal y anhidra utilizando piezas de 20 x 20 x 30 mm de acuerdo a las especificaciones de la ISO - 3131. Se pesaron y fueron colocadas en un horno de secado convencional a  $103\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$  hasta registrar un peso constante. Para la determinación de la densidad se utilizó la fórmula (3).

$$\rho = W_o / V_o \quad (3)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad anhidra

$W_o$  = Peso anhidro

$V_o$  = Volumen anhidro

### 6.8.2. Absorción de agua.

La madera está considerada dentro de los materiales que cuentan con la propiedad de establecer intercambio de humedad, a esta propiedad se le denomina higroscopicidad Vignote y Jiménez (2000). Esta característica es la que le permite ganar o perder humedad dependiendo el ambiente en el que se encuentre Periadi y Hiziroglu (2013).

Para este ensayo se utilizaron piezas de acuerdo a las especificaciones de la ISO - 3133. Se colocaron en inmersión en agua por periodos de 2 y 24 horas. Las muestras se pesaron antes y después de cada periodo. Para el registro del peso se utilizó balanza analítica con precisión de 0.001g. El porcentaje de absorción de agua se calculó utilizando la fórmula (4).

$$Abs. A. = P_2 - P_1 / P_1 \times 100 (\%) \quad (4)$$

Donde:

*Abs. A* = Absorción de agua.

*P2* = Peso después de la inmersión en agua.

*P1* = Peso antes de la inmersión.

### 6.8.3. Contracción e hinchamiento.

La contracción e hinchamiento de la madera se define como los cambios en sus dimensiones. La contracción de la madera comienza debajo del punto de saturación de la fibra y el hinchamiento termina cuando se llega a este punto. En base a las especificaciones de la norma ISO - 3133 se obtuvieron las piezas para esta prueba física las cuales fueron medidas en los tres ejes de la madera (Radial, Tangencial y Longitudinal). Para realizar las mediciones se utilizó un vernier y los cálculos para determinar el hinchamiento a 2 y 24 horas de inmersión en agua se realizaron con la fórmula (5). Para la contracción fue utilizada la fórmula (6).

$$\alpha_{max} = \frac{\varphi t - \theta c}{\theta c} \times 100 (\%) \quad (5)$$

$$\beta_{max} = \frac{\varphi t - \theta c}{\varphi t} \times 100 (\%) \quad (6)$$

Donde:

$\alpha$  = Hinchamiento a 2 y 24 horas de inmersión en agua.

$\beta$  = Contracción por secado después de la inmersión en agua.

$\varphi t$  = Dimensión saturada después de inmersión en agua.

$\theta c$  = Dimensión anhidra.

### 6.9. Pruebas mecánicas.

#### 6.9.1. Dureza estática.

La dureza no es precisamente un esfuerzo mecánico, pero si una propiedad medible a través de la utilización de una carga. Se define como la resistencia que opone un cuerpo a ser penetrado por

otro. Para este ensayo se utilizaron probetas de 50 x 50 x 50 mm de acuerdo a la ISO - 3350, con una velocidad de avance de 6 mm/min. La dureza fue medida tanto en el eje longitudinal como en el eje lateral.

### 6.9.2. Flexión estática.

Entre los esfuerzos a los que se ve sometida la madera con más frecuencia se encuentra la flexión. Los ensayos para esta prueba mecánica se realizan aplicando una carga concentrada en el centro de la longitud de las piezas, las cuales están apoyadas en sus extremos. Las piezas que se utilizaron fueron de 20 x 20 x 300 mm (ISO - 3131), con un claro entre los apoyos de 27 cm. La fórmula (7) fue utilizada para calcular el módulo de ruptura (MOR) en flexión.

$$MOR = \frac{3 \times F \times Ls}{2 \times a \times h^2} \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (7)$$

Donde:

*MOR* = Módulo de ruptura en flexión.

*F* = Fuerza máxima de ruptura (N).

*Ls* = Distancia entre soportes (mm).

*a* = Ancho de la probeta (mm).

*h* = Altura de la probeta (mm).

### 6.9.3. Compresión paralela a la fibra.

En esta prueba participan dos fuerzas axiales opuestas las cuales producen un aplastamiento de la pieza, se considera una de las mejores pruebas para la caracterización mecánica de una madera. Las medidas de las muestras fueron 20 x 20 x 60 mm (ISO - 3132). Para determinar el módulo de ruptura (MOR) en compresión paralela a la fibra se utilizó la fórmula (8).

$$MOR = \frac{F}{a \times b} = \frac{F}{A} \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (8)$$

Donde:

$MOR$  = Módulo de ruptura en compresión.

$F$  = Fuerza máxima de ruptura (N).

$a$  = Lado de la probeta (mm).

$b$  = Lado de la probeta (mm).

$A$  = Área de la sección transversal ( $mm^2$ ).

#### 6.9.4. Extracción de clavos.

En el ensayo mecánico de resistencia a la extracción de clavos, la fuerza tiende a vencer el roce entre la madera y el clavo introducido en ella. En este ensayo se aplica una fuerza de tensión en el extremo del clavo y la pieza a probar. La resistencia se midió en el sentido longitudinal y transversal. Se utilizaron piezas de 50 x 50 x 150 mm con base a las especificaciones de la norma ASTM – 143 - 09.

#### 6.10. Análisis estadístico.

El análisis estadístico consistió en evaluar el efecto del termotratamiento sobre cada una de las propiedades consideradas. Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) utilizando como herramienta el paquete estadístico (SAS). Las propiedades analizadas fueron: densidad anhidra, pérdida de masa, absorción de agua, contracción e hinchamiento, dureza longitudinal, dureza lateral, módulo de ruptura en flexión, compresión paralela a la fibra y extracción de clavos lateral y longitudinal.

Cuando el ANOVA mostró que había diferencias significativa se realizó una prueba de Duncan el cual especifica entre cuáles tratamientos hay diferencia significativa. Se utilizó un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05\%$ .

## **7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

### 7.1. Aserrío.

La madera presentó problemas en el aserrío debido a las altas tenciones lo cual se vio reflejado en la presencia inmediata de grietas y rajaduras seguido de un arqueamiento de las piezas en los primeros cortes de cada troza.

## 7.2. Secado.

La madera de eucalipto proveniente de plantación forestal comercial presentó serios problemas en el proceso de secado debiéndose esto a que es madera juvenil y cuenta con una gran variedad de tamaños de fibra (Figura 7.1). Estos resultados coinciden con lo reportado por Ananías *et al.*, (2009), quienes encontraron que la contracción y el colapso en madera de *Eucalyptus nitens* tiende a aumentar en el sentido radial, teniendo un mayor incremento en la zona central asociado esto a la baja densidad.



7.1. Defectos del secado

## 7.3. Estudio anatómico.

### 7.3.1. Descripción de la rodaja.

La rodaja presentó un diámetro exterior en promedio de 28 cm, su albura es de 3 a 4 cm, la médula es ligeramente excéntrica, su corteza interna es de 8 mm, la corteza externa se desprende en capas de color castaño grisáceo, dejando al descubierto corteza nueva la cual va de color naranja a verde olivo (Figura 7.2).



Figura 7.2. Rodaja de madera de *Eucalyptus nitens*

### 7.3.2. Descripción macroscópica de la madera.

La madera tiene un color que va de blanco (HUE SY 8/2) a castaño muy pálido (HUE 10RY 8/2), seca la madera no se aprecia olor ni sabor (Figura 7.3). Es de textura fina, brillo medio, tiene un hilo de ligeramente inclinado a ligeramente recto, de vetado suave donde se aprecia la zonación.



Figura 7.3. Madera de *Eucalyptus nitens*

### 7.3.3. Descripción microscópica de la madera.

La madera presentó dos tipos de parénquima leñoso, paratraqueal vasicéntrico y apotraqueal difuso (Figura 7.4). Su porosidad es semicircular, poros en forma elíptica, solitarios en su mayoría, en cadena radial de 2 a 3 y múltiples tangenciales de 2 (80-366-474  $\mu\text{m}$ ) (Figura 7.5). Estos resultados son similares a los reportados por López *et al.*, (2003) para la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Tabla 7.1.

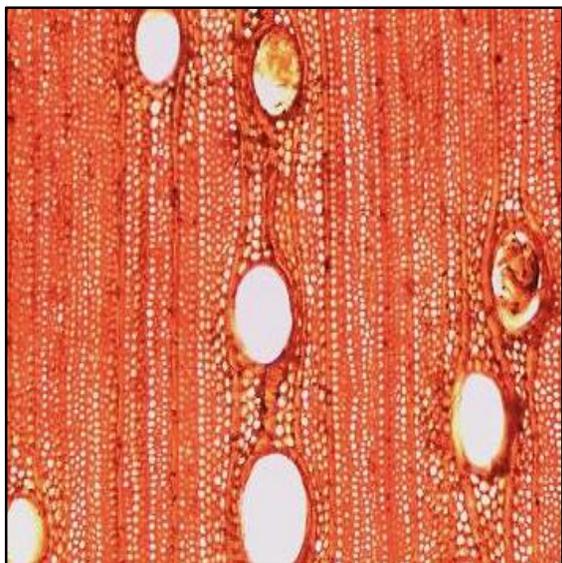


Figura 7.4. Parénquima leñoso

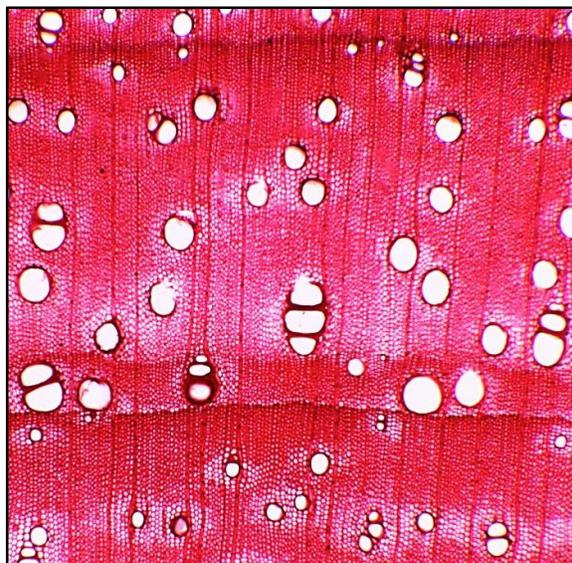


Figura 7.5. Porosidad semicircular

Los elementos de vaso son cortos (151-280-434  $\mu\text{m}$ ) con puntuaciones areoladas alternas, platinas de poco inclinadas a muy inclinadas con perforaciones simples. El valor promedio 280  $\mu\text{m}$  encontrado es cercano a los reportados por Pirralho *et al.*, (2014) para *Eucalyptus tereticornis* y *Eucalyptus globulus* ( $268 \pm 50$ ), ( $273 \pm 53$ ) respectivamente. Se encontró presencia de traqueidas vasicéntricas con punteaduras areoladas. Los radios presentaron de 3-21-43 células de alto los cuales son poco visibles con lupa, uniseriados en su mayoría y algunos parcialmente biseriados (Figura 7.6). Estos resultados difieren al promedio reportado en la literatura para *Eucalyptus maculata*, *Eucalyptus sideroxylon*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus viminalis* el cual es de 9 células de alto Pirralho *et al.*, (2014).

Las fibras son cortas 525-828-1080  $\mu\text{m}$  con un diámetro de 10-15-22  $\mu\text{m}$ , el lumen es de 6.2-5.6-20  $\mu\text{m}$ , y el grosor de pared celular de 1.2 - 2.2 - 3.7  $\mu\text{m}$  como se aprecia en la Figura 7.7. La longitud de fibra representa alrededor del 50% en comparación con el valor reportado por Sánchez (2012) para la madera de *Eucalyptus grandis* (Tabla 3).

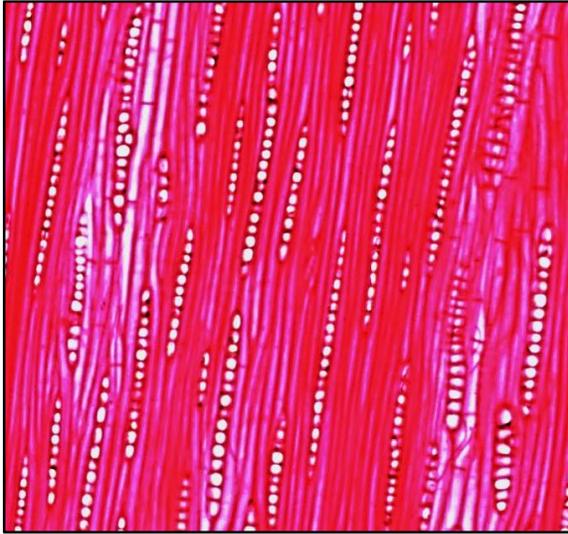


Figura 7.6. Rayos.

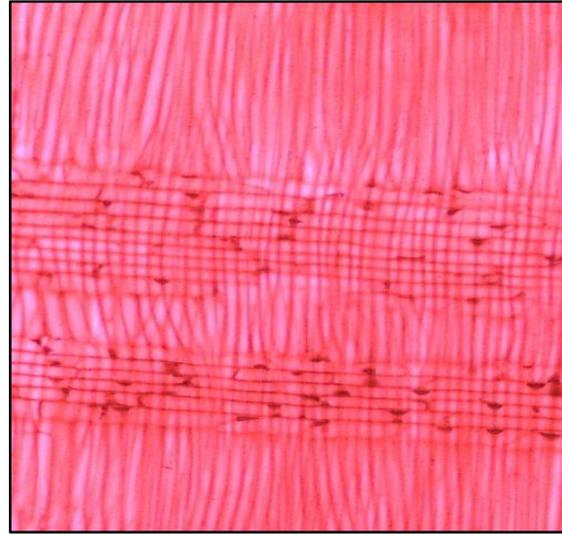


Figura 7.7. Fibras.

Se han realizado un número importante de trabajos en esta área, entre los cuales se encuentran Alfonso (1987), Oliveira y Freitas (1970), Quilho *et al.*, (2006), Sharma *et al.*, (2005). Kibblewithe *et al.*, (2001<sup>a</sup>) reportan para madera de *Eucalyptus nitens* con una edad de 8 años, una longitud de fibra de 0.88 mm, un espesor de pared de 2.10  $\mu\text{m}$  y para una madera de 11 años de la misma especie, una longitud de fibra de 0.88 mm y espesor de pared de 2.16  $\mu\text{m}$ . Una longitud de fibra de 0.78 mm, ancho de fibra 12.4  $\mu\text{m}$  y un espesor de fibra de 6.6  $\mu\text{m}$  para madera de 15 años. 0.95 mm, 14.1  $\mu\text{m}$ , 7.4  $\mu\text{m}$  en madera de 16 años para largo de fibra, ancho de fibra y espesor de fibra respectivamente Kibblewithe *et al.*, (2001<sup>a</sup>), Salas, (2005). De igual manera se reporta un diámetro tangencial de vasos de (89-108  $\mu\text{m}$ ), (13-22) vasos por  $\text{mm}^2$ , (383-408  $\mu\text{m}$ ) de longitud de vaso, (0.80-0.88 mm) de longitud de fibra y (349  $\mu\text{m}$ ) de longitud de rayos para *Eucalyptus camaldulensis* Veenin *et al.*, (2005), Dyer (1992).

Debido a que la madera es un material muy complejo y a que su crecimiento se ve influenciado por varios factores, se considera que las variaciones en los datos analizados y comparados con los reportados es consecuencia de la edad del árbol, la especie, los nutrientes del suelo, la precipitación fluvial, la altura sobre el nivel del mar y los métodos de silvicultura empleados.

En estudios realizados por Oliveira y Freitas (1970) se reporta para la madera de *Eucalyptus ovata* valores de: (45 – 63  $\mu\text{m}$ ) para el diámetro tangencial de los vasos, (0.763 – 1.342 mm) de longitud de fibra. Quilhó *et al.*, (2006) reportan para *Eucalyptus grandis* una promedio de longitud de fibra

de (0.955 mm) y un diámetro de (18 µm). El espesor de pared es de (3.6 µm) para arboles de 7 años. Por otro lado Alfoso (1987) reporta para *Eucalyptus maculata* un diámetro tangencial de vasos de (97 – 119 µm), (4 – 12) vasos por mm<sup>2</sup>, longitud de vaso de (474 µm), longitud de fibra de (990 µm), espesor de la pared de la fibra de (5 µm).

*Eucalyptus tereticornis* presenta valores de 435 – 463 µm para el diámetro tangencial de vasos y una longitud de 435 – 463 µm, (9 –12) vasos por mm<sup>2</sup>, longitud de fibra de (0.908–1.08 mm) Sharma *et al.*, (2005), Alfonso (1987).

Tabla 7.1. Características anatómica de tres *Eucalyptus*.

Características	<i>E. nitens</i>	<i>E. grandis</i> *	<i>E. camaldulensis</i> **
Porosidad	Semicircular	Difusa	Difusa
Agrupación de poros	Solitarios y múltiples Radiales de 2 y 3	Solitarios	Solitarios
Parénquima	Paratraquel vasicéntrico y apotraquela difuso	Paratraquel vasicéntrico	Paratraqueal vasicéntrico y apotraquela difuso
Rayos	Uniseriados y algunos parcialmente biseriados	Uniseriados en su mayoría	Uniseriados y biseriados
Altura de rayos	24-113-210 µm	130-360	64-98-170µm
Diámetro <i>Tg</i> de poros	8-36-47µm	100-137-200	50-92-140µm
Fibras	525-828-1080µm	1600	520-834-1340µm

\*Sánchez (2012) \*\*López *et al.*, (2003)

#### 7.4. Pérdida de masa por efecto del termotratamiento.

En la Tabla 7.2 se muestra la pérdida de masa por efecto del termotratamiento. Cuando se utilizan condiciones de 140 °C por tiempo de 1.5 horas la pérdida es de 3.3%. Sin embargo, con el aumento

de la temperatura y el tiempo de termotratamiento se tiene un incremento en la pérdida de masa significativo. Fengel y Wegener (1989) reportan una pérdida de masa en *Picea abies* de 0.8% y 15.5% en madera termo tratada a 120 y 200 °C por un tiempo de 24 horas. Una pérdida de masa de 8.1 y 9.8% para 150 y 200 °C en *Fagus sylvatica*. El valor de pérdida de masa obtenido depende de las condiciones iniciales del material tales como su composición química, anatomía, especie y contenido de humedad inicial de la muestra Brito *et al.*, (2008), García *et al.*, (2012).

Tabla 7.2. Pérdida de masa por efecto del termotratamiento.

<i>Tiempo</i>	<i>Temperatura</i>		
	140 °C	180 °C	220 °C
1.5 h	3.3%	4.9%	9.4%
2.5 h	4.5%	4.7%	17.4%
3.5 h	4.6%	6.0%	22.9%

Cuando se aplica termotratamiento a 140 °C por 2.5 horas la pérdida de masa aumenta a 4.5%, valor que se mantiene constante hasta condiciones de 180 °C por 2.5 horas. Los valores máximos obtenidos para la pérdida de masa se tuvieron con las condiciones de 220 °C con 2.5 y 3.5 horas (17.4 y 22.9%) respectivamente. Estos resultados son similares a los reportados por Esteves *et al.*, (2007), Brito *et al.*, (2006), Cao *et al.*, (2011), Weiland y Guyonnet (2003), Mburu *et al.*, (2008).

Zaman *et al.*, (2000) reportaron una pérdida de masa en madera de *Pinus sylvestris* de 5.7, 6.8 y 7.0% a 205 °C para 4, 6 y 8 horas respectivamente y para *Betula pendula* de 6.4, 7.1 y 10.2% para 4, 6, y 8 horas a 205 °C valores que son cercanos a los encontrados en este estudio con las condiciones de termotratamiento de 3.5 horas a 180 °C. Sailer (2001) reporta una pérdida de masa en madera de *Pinus sylvestris* tratada a 180 y 220 °C por 4.5 horas de 5.5 y 11.0% respectivamente. Brito *et al.*, (2008) reportan que la mayor pérdida de masa se tiene a 180 °C (9.6%) para *Pinus caribea var. hondurensis* de 9 años procedente de plantación comercial, estos valores son similares a los encontrados con condiciones de 220 °C a 1.5 horas.

En general la pérdida de masa aumenta con el incremento del tiempo y la temperatura Esteves *et al.*, (2007), Thomas (2004), Severo *et al.*, (2012) lo cual es posible observar en la Figura 7.8. La pérdida de masa es consecuencia de la eliminación de las hemicelulosas debido al aumento de la temperatura Calonego (2012).

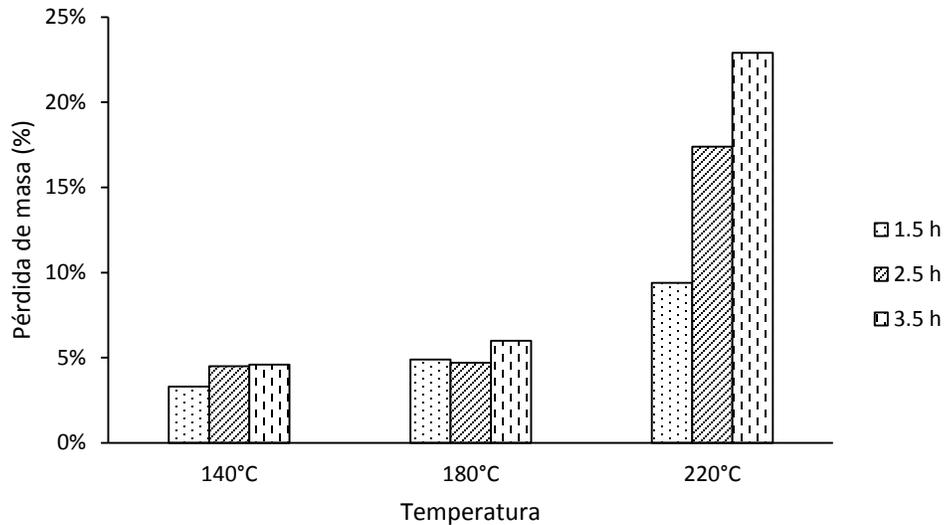


Figura 7.8. Pérdida de masa por efecto del termotratamiento.

De igual manera se puede observar en la Figura 7.8 que a temperatura de 140 °C el porcentaje de pérdida de masa tiene un comportamiento constante entre temperaturas de 140 y 180 °C para los tiempos de 1.5 y 2.5 horas, debiéndose esto a que el agua contenida en la madera ha sido eliminada en su totalidad así como algunos compuestos de bajo peso molecular como extractivos, sustancias orgánicas solubles en agua y sustancias inorgánicas. Es posible observar que las diferencias significativas en la pérdida de masa comienzan a partir de temperaturas superiores a los 180 °C en donde se tiene un aumento del 7.5%. Es en este rango en donde se eliminan la mayor parte de las hemicelulosas presentándose cambios en la estructura de la madera que son irreversibles.

El aumento en la temperatura a 220 °C representa una pérdida de masa de 15.7% como consecuencia de la eliminación total de las hemicelulosas, parte de la celulosa y un porcentaje menor de la lignina Hillis (1984), Repellin y Guyonnet (2005).

## 7.5. Análisis termogravimétrico (TGA).

La Figura 7.9 muestra el análisis TGA realizado con madera termotratada a 140, 180 y 220 °C por tiempo de 1.5 horas. Es posible observar que el comportamiento térmico para las tres temperaturas es muy similar sin embargo, se presenta una ligera variación después de los 325 °C en la madera termotratada a 220 °C como consecuencia de la eliminación de las hemicelulosas, esto con base al comportamiento del material sin tratar.

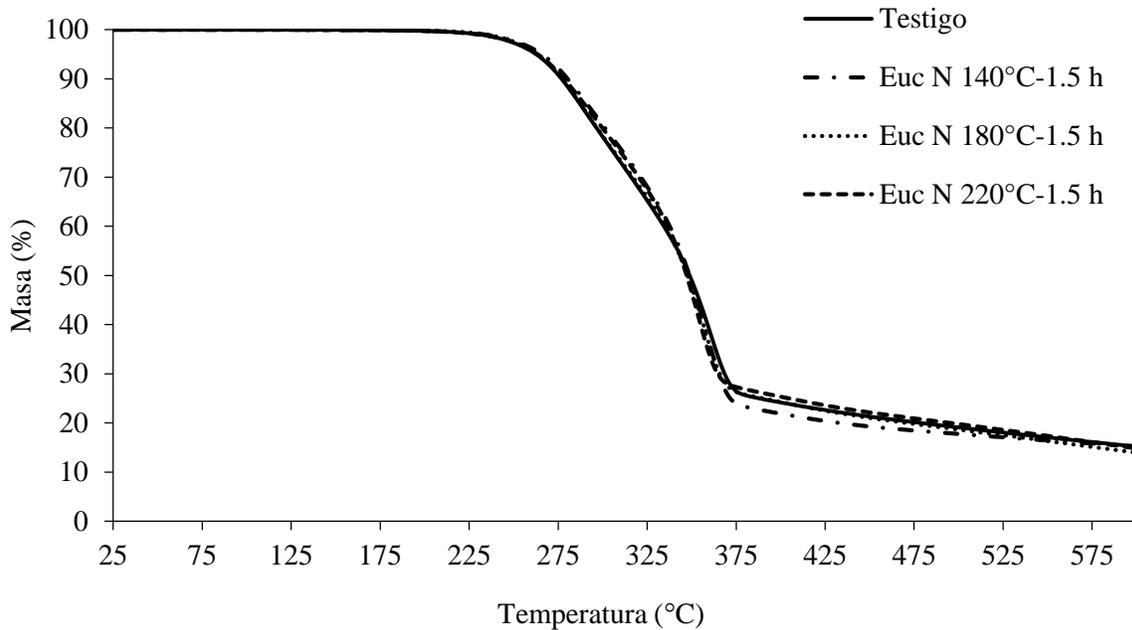


Figura 7.9. Análisis (TGA) en madera termotratada a 1.5 horas.

Por otro lado se tiene el análisis (TGA) del material termotratado a 2.5 y 3.5 horas (Figura 7.10 y 7.11). Se pueden observar de forma general tres regiones, la primera región que cubre de 25 a 200 °C en donde se tiene un comportamiento similar para los tres tratamientos en relación con el control, en donde se aprecia que no existe pérdida de masa debido a que el agua ya se había eliminado con los tratamientos. En este rango de temperatura se da la eliminación de las hemicelulosas, que de acuerdo a Yang *et al.*, (2007) la temperatura en la cual se eliminan en su totalidad es a 268 °C.

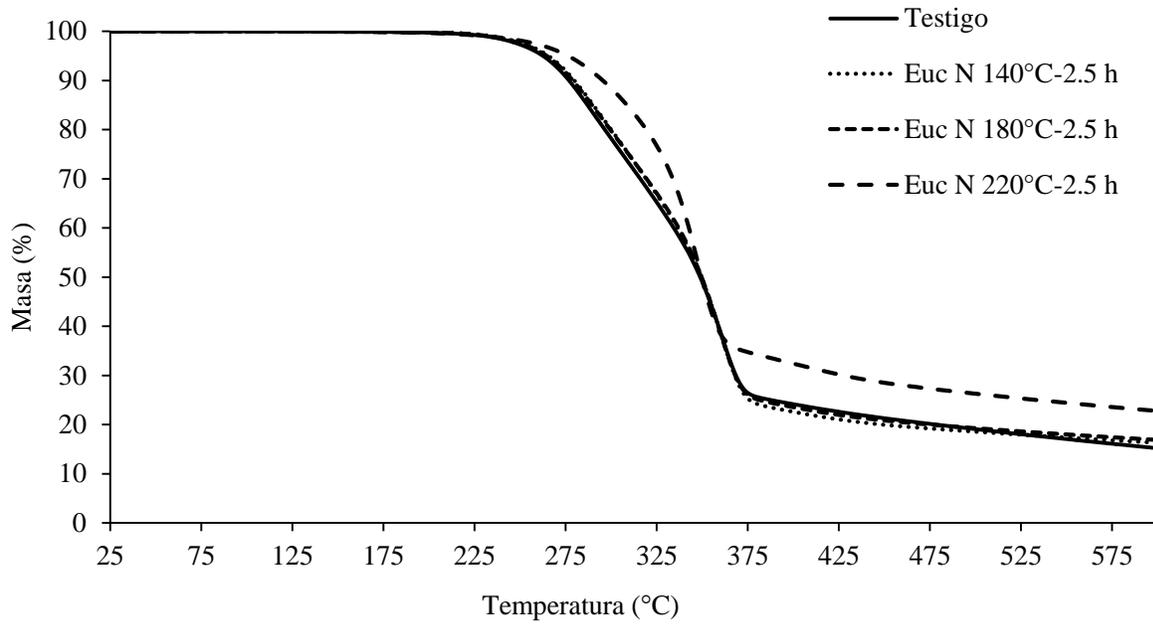


Figura 7.10. Análisis (TGA) en madera termotratada a 2.5 horas.

La segunda región cubre temperaturas entre 200 y 340 °C en donde se tiene una degradación más intensa del material debido a la eliminación de la celulosa, la cual se elimina en su totalidad alrededor de los 400 °C. Estos resultados coinciden con White y Dietsberg (2011) quienes reportan que la degradación de la celulosa ocurre entre temperaturas de 300 y 500 °C.

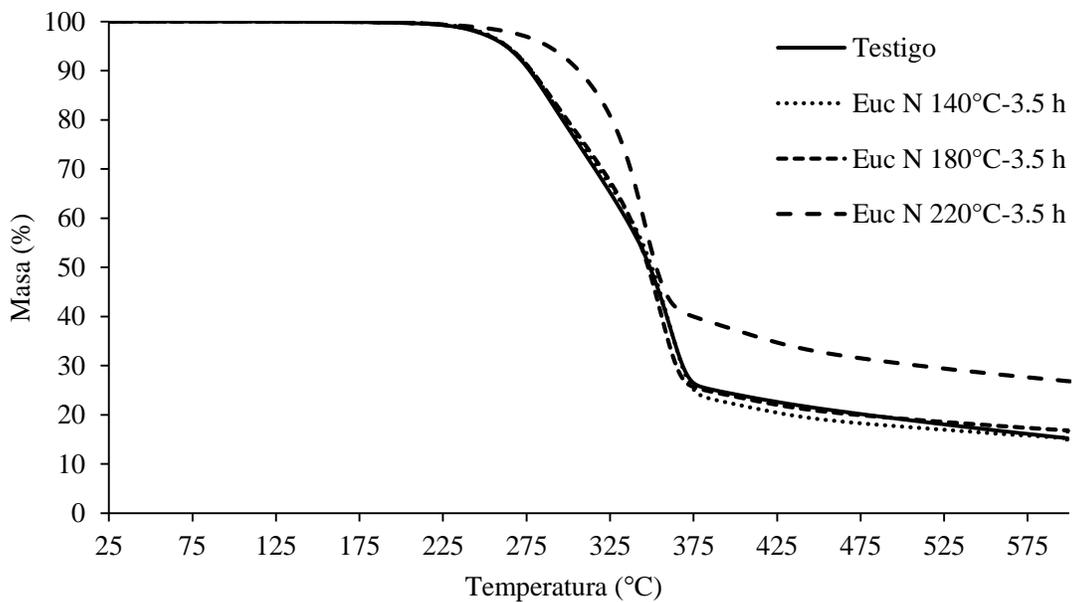


Figura 7.11. Análisis (TGA) en madera termotratada a 3.5 horas.

Como tercera región se tiene que a temperaturas superiores a los 400 °C existe un comportamiento similar para todos los tratamientos y es que por encima de estas temperaturas se comienza a degradar la lignina. Sin embargo cuando aun cuando se tienen temperaturas superiores a los 500 °C existe presencia de masa en promedio de 15% y al parecer se tiene un comportamiento constante después de estas temperaturas.

#### 7.6. Cambio de coloración por efecto del termotratamiento.

El cambio de coloración que se obtuvo en cada una de las condiciones del termotratamiento se observa en la Figura 7.12. Se logra apreciar a simple vista que la tonalidad de la madera va oscureciéndose al aumentar temperatura y al incrementar el tiempo de tratamiento, por lo que la madera más oscura se tiene con las condiciones de mayor tiempo y temperatura (220 °C y 3.5 horas).

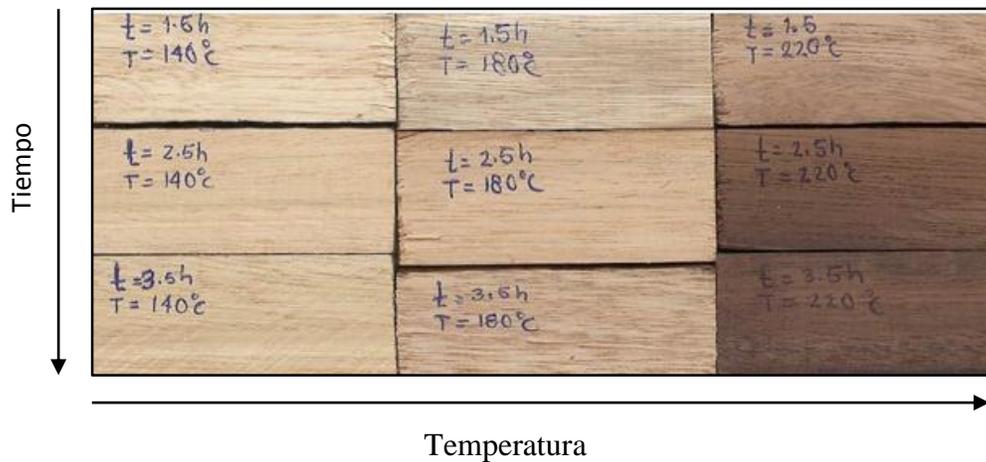


Figura 7.12. Cambio de coloración por efecto del termotratamiento.

Los valores correspondientes al cambio de coloración en la madera termotratada en atmósfera normal (con presencia de oxígeno) se pueden observar en la Tabla 7.3. Cuando se utiliza temperatura de 140 °C por tiempo de 1.5 horas, la madera refleja un 95% de la luz utilizada en el espectrómetro, no siendo este un cambio significativo en la coloración. A partir del tratamiento con 180 °C por 3.5 horas se obtuvieron valores de  $(-\Delta L)$  indicando un oscurecimiento de las muestras. Con condiciones de 140 °C por 2.5 horas se obtuvieron valores de  $(-\Delta a)$  que indican un ligero cambio de color hacia verde. Valores positivos para  $(\Delta a)$  fueron encontrados con el

tratamiento a 180 °C por 3.5 horas y los tres periodos de tiempo a 220 °C indicando un cambio de coloración hacia el rojo. Por otro lado en los tratamientos a 140 °C por 2.5 horas y 220 °C por 1.5 horas se tuvieron valores positivos para ( $\Delta b$ ) indicando con ello un cambio de coloración hacia el amarillo. El resto de los tratamientos presentaron valores de ( $-\Delta b$ ) con lo cual indican que las muestras tuvieron un cambio de coloración hacia el azul. En cuanto a la cantidad de luz reflejada por las muestras ( $*L$ ) se tuvo una disminución de alrededor del 40% siendo  $*L = 95$  a condiciones de 140 °C por 1.5 horas y  $*L = 59$  a 220 °C por 3.5 horas.

Cuando se utilizan condiciones de 180 °C por tiempo de 2.5 horas se obtuvo un decremento en el brillo de las piezas de 34.1% valores que son similares a los reportados por Müller *et al.*, (2012) quienes mencionan que se tiene una disminución en el brillo de las piezas de 39.8% para condiciones de 180 °C y tiempo de 24 horas. Los resultados permitieron corroborar lo que se reporta en otros trabajos realizados, los cuales indican que se tiene un aumento en el cambio de coloración de las piezas en relación al aumento de la temperatura Unsal *et al.*, (2003), Ates *et al.*, (2009).

Tabla 7.3. Cambio de coloración por efecto del termotratamiento.

Tratamiento	$\Delta L_{rel}$	$\Delta a$	$\Delta b$	$\Delta L^2_{rel}$	$\Delta a^2$	$\Delta b^2$	$\Delta L_{ab}$
t2T1.1	-0.221	-26.034	5.617	0.049	677.794	31.550	26.634
t2T1.2	-0.916	-58.897	6.139	0.839	3468.804	37.688	59.223
t2T1.3	0.979	26.172	1.686	0.958	684.995	2.844	26.245
Promedio	-0.053	-19.586	4.481	0.615	1610.531	24.027	37.367
t3T1.1	3.053	79.000	-23.407	9.319	6241.000	547.909	82.451
t3T1.2	2.811	76.621	-19.203	7.899	5870.730	368.752	79.040
t3T1.3	2.916	75.983	-21.517	8.502	5773.380	463.002	79.025
Promedio	2.926	77.201	-21.376	8.573	5961.703	459.888	80.172
t1T2.1	2.316	68.759	-11.420	5.363	4727.748	130.426	69.739
t1T2.2	1.642	45.759	-5.269	2.697	2093.851	27.766	46.090
t1T2.3	1.905	56.190	-6.832	3.630	3157.277	46.681	56.636
Promedio	1.954	56.902	-7.841	3.896	3326.292	68.291	57.488
t2T2.1	0.547	1.207	1.334	0.300	1.457	1.779	1.880
t2T2.2	0.632	0.810	-0.757	0.399	0.657	0.573	1.276
t2T2.3	3.284	96.655	-22.505	10.786	9342.222	506.487	99.295
Promedio	1.488	32.891	-7.309	3.828	3114.779	169.613	34.150
t3T2.1	0.726	-2.724	-4.122	0.528	7.421	16.994	4.994
t3T2.2	-0.642	-64.362	-2.159	0.412	4142.476	4.660	64.401

t3T2.3	-2.295	-127.534	3.545	5.266	16265.044	12.570	127.604
Promedio	-0.737	-64.874	-0.912	2.069	6804.980	11.408	65.667
t1T3.1	-10.274	-371.810	7.724	105.549	138242.933	59.665	372.032
t1T3.2	-13.179	-424.155	9.128	173.685	179907.610	83.322	424.458
t1T3.3	-12.253	-407.293	8.231	150.127	165887.672	67.750	407.560
Promedio	-11.902	-401.086	8.361	143.120	161346.072	70.246	401.350
t2T3.1	-29.611	-529.966	-1.166	876.783	280863.449	1.359	530.793
t2T3.2	-27.821	-523.121	-1.352	774.011	273655.256	1.829	523.862
t2T3.3	-28.053	-526.810	0.370	786.950	277529.139	0.137	527.557
Promedio	-28.495	-526.632	-0.716	812.581	277349.282	1.108	527.404
t3T3.1	-20.926	-454.810	-2.530	437.911	206852.450	6.402	455.299
t3T3.2	-32.179	-461.293	-10.631	1035.485	212791.327	113.022	462.536
t3T3.3	-37.642	-445.724	-18.691	1416.928	198670.007	349.355	447.701
Promedio	-30.249	-453.943	-10.617	963.441	206104.595	156.260	455.179

El cambio de coloración en la madera se debe principalmente a la eliminación de compuestos de bajo peso molecular (formaldehidos, cetonas, fenoles), azúcares de la madera (hemicelulosas), en un porcentaje menor la eliminación de la celulosa y a la migración de la lignina hacia la superficie de la madera cuando se utilizan temperaturas superiores a los 200 °C Hillis (1984).

Con las temperaturas utilizadas en este estudio, la madera de *Eucalyptus nitens* logra alcanzar tonalidades muy similares a maderas como el nogal, el tzalam y la parota, maderas que dentro del mercado tienen un valor agregado y que son demandadas para la elaboración de varios productos (Anexo 10.4).

## 7.7. Pruebas físicas del material termotratado.

### 7.7.1. Densidad normal y anhidra.

La densidad normal que presentó la madera de *Eucalyptus nitens* fue de 0.59 g/cm<sup>3</sup>. Este valor es cercano al 0.56 g/cm<sup>3</sup> reportado por Munery y Raymond (2005) en Australia para una plantación de 7 años de *Eucalyptus nitens*. Kibblewhite *et al.*, (2001) reportaron para el *Eucalyptus maidenii* de 8 años de edad una densidad de 0.56 g/cm<sup>3</sup>. En la Tabla 7.5 se observan los valores obtenidos para la densidad anhidra en madera de *Eucalyptus nitens* después de aplicar termotratamiento a diferentes condiciones. Cuando se aplica termotratamiento a 140 °C por 1.5 horas la densidad

disminuye un 3%, sin embargo, aumenta un 5% en condiciones de 140 °C por 2.5 horas. Cuando la madera es sometida a 220 °C por 3.5 horas ésta disminuye en un 8.4%.

La máxima reducción de la densidad se dio con 220 °C a 2.5 horas (10.1%). Valores de (1.6%) fueron encontrados para 180 y 220 °C a 1.5 horas (Figura 7.13), todos estos resultados en relación a la densidad del material sin tratar (0.59 a) g/cm<sup>3</sup>.

Valores similares fueron reportados por Korkut (2010) para madera de Rowan (*Sorbus aucuparian*) la cual fue termotratada a condiciones de 180 °C por 6 horas y presentó una disminución en la densidad del 6%. Por otro lado, 5.7 y 6.6% para 6 y 10 horas respectivamente. Severo *et al.*, (2012) reportaron para *Eucalyptus grandis* una reducción en la densidad de 3.6, 2.1, 6.7, 3.1 y 10.5% para 140, 160, 180, 200 y 220 °C respectivamente. Korkut (2012) reportó una disminución de 4.7 y 7.9% para 2 y 4 horas a 180 °C en madera de *Entrandrophragma cylindricum*.

La Tabla 7.4 corresponde al análisis de varianza (ANOVA) el cual indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < .0001$ ), utilizando un  $\alpha = 0.05$  de confiabilidad.

Tabla 7.4. ANOVA densidad anhidra.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	P > F
Tratamientos	8	0.09	0.01	4.87	<.0001
Error	125	0.29	0.00		
Total	133	0.38			

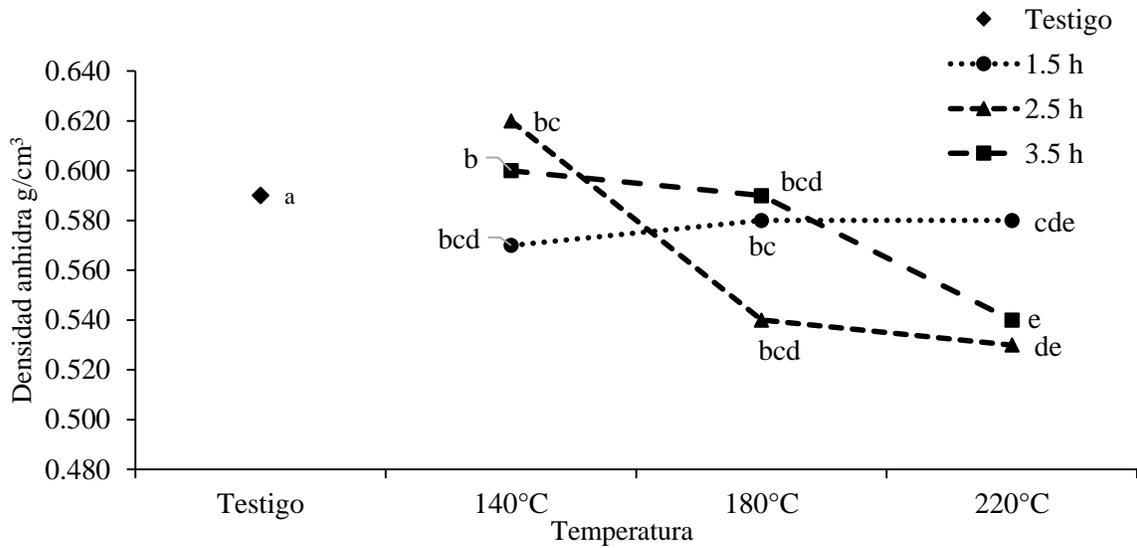


Figura 7.13. Efecto del termotratamiento en la densidad anhidra.

<sup>(abc)</sup> Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza

#### 7.7.2. Absorción de agua (%).

La madera termo tratada fue colocada en inmersión en agua por tiempos de 2 y 24 horas, la absorción de agua obtenida se presenta en la Tabla 7.6 y 7.7. La madera sin tratamiento presentó una absorción de agua de 11 y 35% para 2 y 24 horas respectivamente. Los porcentajes menores de absorción de agua se dieron a 220 °C por 2.5 horas de termotratamiento como se observa en la Figura 7.14.

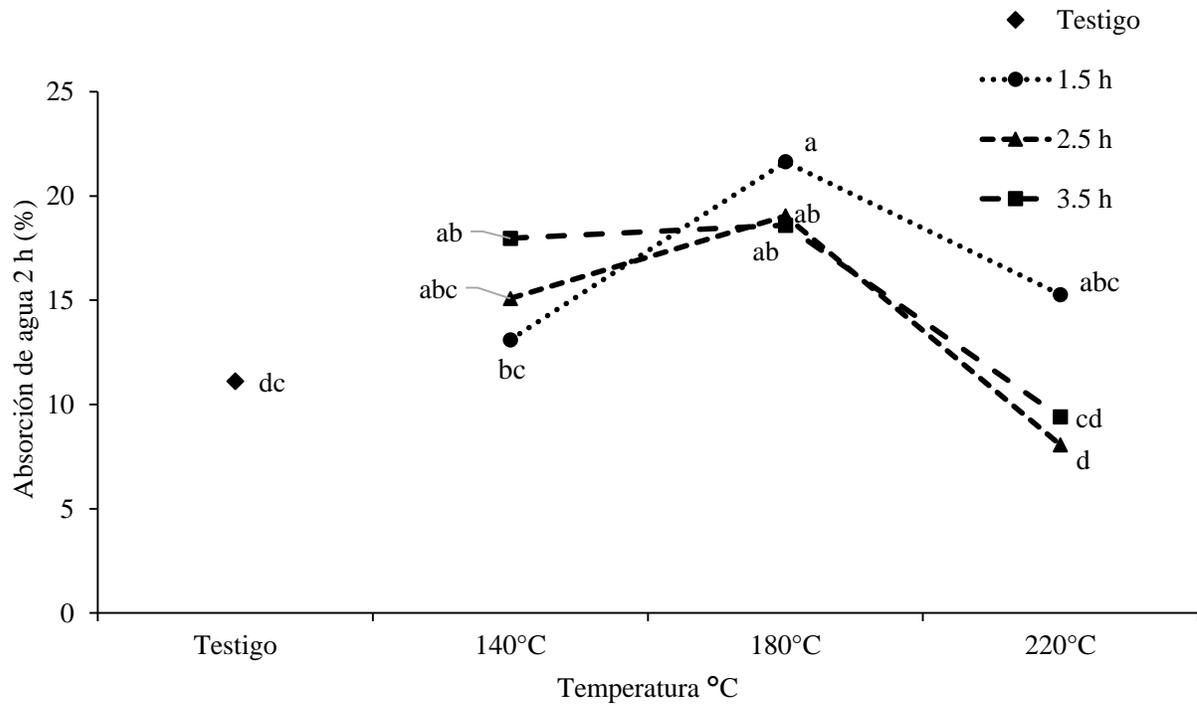


Figura 7.14. Efecto del termotratamiento en la absorción de agua a 2 horas (%).

(abc) Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza

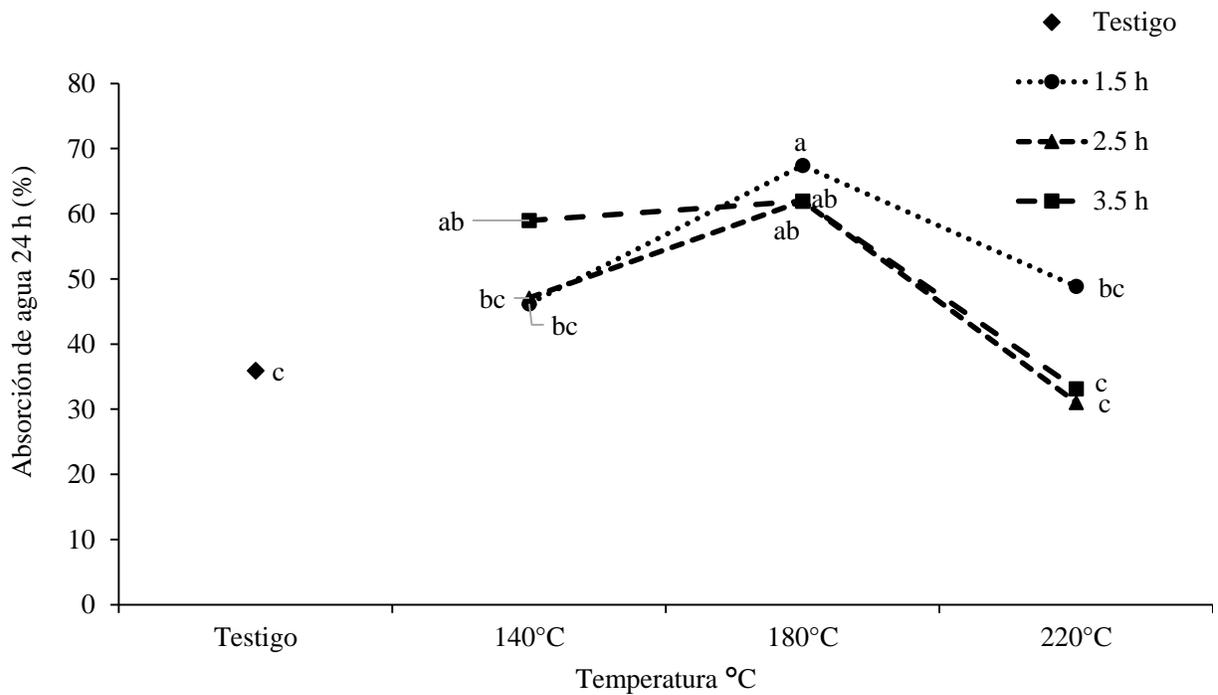


Figura 7.15. Efecto del termotratamiento en la absorción de agua a 24 horas (%).

(abc) Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza

La diferencia en porcentaje de absorción de agua en el periodo de dos horas presentó una diferencia de 2 a 13% entre los tratamientos, mientras que para el periodo de 24 horas fue de 1 a 36% como se puede apreciar en la Figura 7.15. El análisis de varianza indicó que los tratamientos (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>9</sub>) presentaron diferencia significativa. Los valores de absorción de agua obtenidos principalmente con los tratamientos a temperaturas superiores a los 180 °C, indican que la madera es menos higroscópica, esto se debe principalmente a que las condiciones de termotratamiento causaron la eliminación parcial o total de compuestos de bajo peso molecular y de un porcentaje de las hemicelulosas contenidas en la madera dando como resultado una fractura de las cadenas de los polisacáridos.

Tabla 7.5. Efecto del termotratamiento en la densidad anhidra (g/cm<sup>3</sup>).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	0.59	0.60	0.62	Prom.	0.61	0.59	0.59	Prom.	0.56	0.54	0.52	Prom.	0.67
Desv. Std.	0.04	0.05	0.03	Desv. Std.	0.04	0.07	0.03	Desv. Std.	0.03	0.04	0.02	Desv. Std.	0.02
C.V. %	7.32	7.50	5.75	C.V. %	6.19	11.28	6.47	C.V. %	5.17	6.26	2.88	C.V. %	3.05
V. Máx.	0.64	0.69	0.61	V. Máx.	0.64	0.71	0.58	V. Máx.	0.66	0.63	0.54	V. Máx.	0.7
V. Mín.	0.55	0.58	0.52	V. Mín.	0.56	0.55	0.49	V. Mín.	0.59	0.54	0.51	V. Mín.	0.65

Tabla 7.6. Efecto del termotratamiento en la absorción de agua a 2 horas (%).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	13.1	21.6	15.2	Prom.	15.0	19.0	8.0	Prom.	17.9	18.6	9.4	Prom.	11.10
Desv. Std.	3.2	3.0	6.6	Desv. Std.	3.5	3.8	4.5	Desv. Std.	6.2	2.5	7.2	Desv. Std.	1.10
C.V. %	24.4	19.8	36.6	C.V. %	16.1	20.2	24.3	C.V. %	40.9	31.1	76.6	C.V. %	9.70
V. Máx.	18.5	18.1	27.0	V. Máx.	25.3	24.6	23.1	V. Máx.	21.7	12.6	18.5	V. Máx.	12.70
V. Mín.	10.6	11.0	12.4	V. Mín.	17.9	15.5	13.0	V. Mín.	9.0	6.8	1.7	V. Mín.	10.00

Tabla 7.7. Efecto del termotratamiento en la absorción de agua a 24 horas (%).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	46.20	47.10	59	Prom.	67.40	62.00	61.90	Prom.	48.90	31.10	33.20	Prom.	35.90
Desv. Std.	9	9.6	18.7	Desv. Std.	12.7	11.3	12.9	Desv. Std.	15.4	9.8	16.6	Desv. Std.	2.1
C.V. %	19.5	20.3	31.6	C.V. %	18.9	18.2	20.8	C.V. %	31.5	31.7	50.2	C.V. %	5.9
V. Máx.	61.9	57.8	80.2	V. Máx.	78	77.2	72	V. Máx.	65.8	43	59.7	V. Máx.	35.8
V. Mín.	40.5	38.2	40	V. Mín.	53.2	51.8	44.2	V. Mín.	33.5	23.3	17.7	V. Mín.	33.2

### 7.7.3. Contracción (%).

En las Tablas 7.8 y 7.9 se observan los valores en la contracción radial que se obtuvieron en la madera termotratada a las diferentes condiciones y colocadas en inmersión en agua por tiempos de 2 y 24 horas.

Tabla 7.8. Efecto del termotratamiento en la contracción radial a 2 horas (%).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Testigo	
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C		
Prom.	2.1	2.4	2.4	Prom.	3.3	3	3.3	Prom.	2.4	1.1	1.7	Prom.	2.4
Desv. Std.	0.8	0.7	0.9	Desv. Std.	0.3	0.5	0.4	Desv. Std.	0.4	0.4	0.4	Desv. Std.	0.5
C.V. %	38.5	30.2	38.3	C.V. %	9.2	15.7	11.8	C.V. %	16.8	38.6	26.6	C.V. %	20.2
V. Máx.	3.4	3.2	3.5	V. Máx.	3.5	3.5	3.8	V. Máx.	2.9	1.5	2.1	V. Máx.	2.9
V. Mín.	1.5	1.2	1.4	V. Mín.	2.9	2.2	2.9	V. Mín.	1.8	0.5	0.9	V. Mín.	1.9

Tabla 7.9. Efecto del termotratamiento en la contracción radial a 24 horas (%).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Testigo	
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C		
Prom.	3.5	4.7	4.4	Prom.	4.7	4.1	4.9	Prom.	3.4	1.9	1.9	Prom.	3.4
Desv. Std.	0.7	2.4	0.6	Desv. Std.	0.5	0.5	0.1	Desv. Std.	0.7	0.7	0.7	Desv. Std.	0.4
C.V. %	21	50.5	14.6	C.V. %	10.1	11.9	2.1	C.V. %	20.4	37.3	38.3	C.V. %	10.9
V. Máx.	4.3	8.7	4.9	V. Máx.	5.3	4.6	5	V. Máx.	4.1	2.8	2.6	V. Máx.	3.9
V. Mín.	2.4	2.2	3.3	V. Mín.	4.2	3.3	4.8	V. Mín.	2.3	0.9	0.9	V. Mín.	2.9

La contracción radial en la madera sin tratamiento presentó valores de 2.3 y 3.4% para 2 y 24 horas respectivamente. La contracción máxima que se tuvo para el periodo de 2 horas fue de 3.2% y un mínimo de 0.5% con condiciones de 220 °C por 3.5 horas. En cuanto al periodo de 24 horas (Figuras 7.16 y 7.17) se obtuvieron valores que van del 1.8, 3.4 y 4.8%.

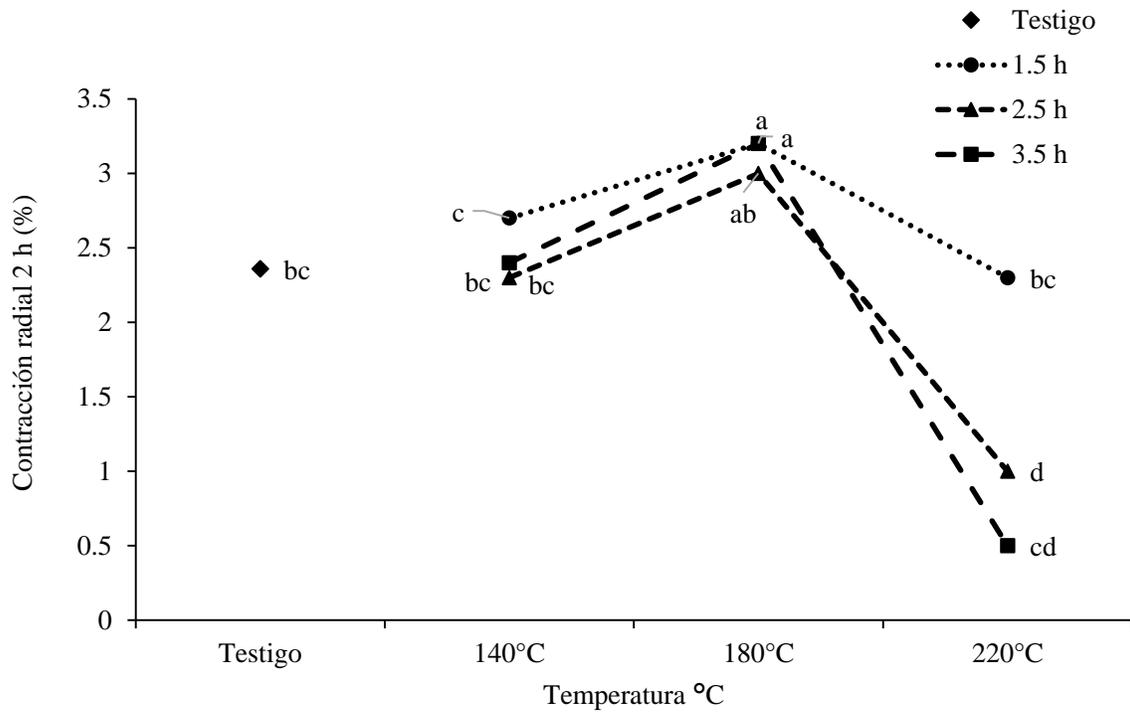


Figura 7.16. Efecto del termotratamiento en la contracción radial a 2 horas (%).

<sup>(abc)</sup> Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza

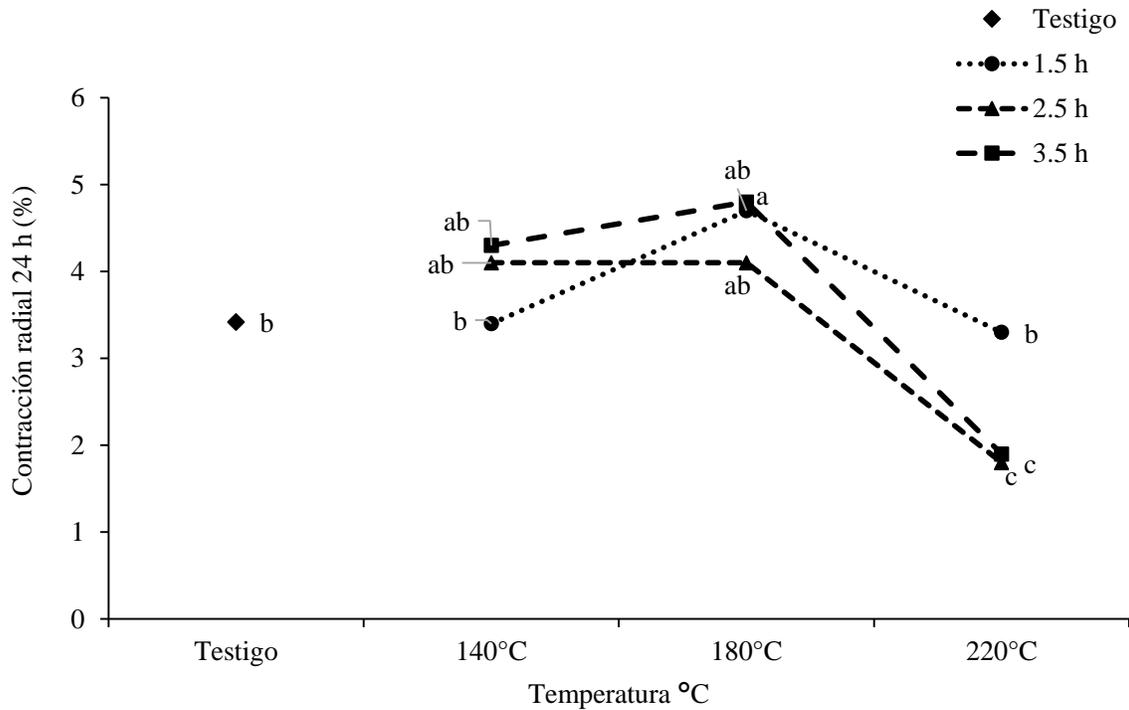


Figura 7.17. Efecto del termotratamiento en la contracción radial a 24 horas (%).

<sup>(abc)</sup> Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza

Valores entre 1.6 y 4% se encontraron para contracción tangencial en madera termotratada a diferentes condiciones para el periodo de 2 horas en inmersión como se aprecia en la Tabla 7.10. El comportamiento es muy similar al que se obtuvo en la contracción radial, y es que la tendencia es a disminuir conforme aumenta la temperatura y el tiempo del termotratamiento, presentándose los valores más pequeños para las condiciones de 220 °C por 3.5 horas (1.8 y 3.0%) para el periodo de 24 horas (Tabla 7.11).

Tabla 7.10. Efecto del termotratamiento en la contracción tangencial a 2 horas (%).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	4	3.6	3.3	Prom.	3.6	2.9	2.9	Prom.	2.8	1.6	1.9	Prom.	3.7
Desv. Std.	1.1	0.9	0.1	Desv. Std.	0.3	0.4	0.3	Desv. Std.	0.9	0.7	0.4	Desv. Std.	1.9
C.V. %	28.7	25.5	3.9	C.V. %	7.5	13.5	10.8	C.V. %	30.3	42.2	21.4	C.V. %	52.1
V. Máx.	5.7	4.9	3.5	V. Máx.	4	3.4	3.4	V. Máx.	4.1	2.3	2.6	V. Máx.	7.1
V. Mín.	2.6	2.6	3.2	V. Mín.	3.3	2.6	2.5	V. Mín.	1.9	0.6	1.5	V. Mín.	2.1

Tabla 7.11. Efecto del termotratamiento en la contracción tangencial a 24 horas de inmersión (%).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	7.5	6.1	6.4	Prom.	6.6	5.5	6.4	Prom.	5.2	3.2	3.1	Prom.	5.8
Desv. Std.	1.2	1.4	0.4	Desv. Std.	0.6	0.3	0.7	Desv. Std.	0.8	0.7	0.6	Desv. Std.	0.9
C.V. %	15.4	23.7	6.7	C.V. %	8.9	6.3	11.2	C.V. %	14.5	20.8	20.7	C.V. %	15.7
V. Máx.	9.1	7.8	7	V. Máx.	7.3	5.9	7.1	V. Máx.	6.2	3.9	3.8	V. Máx.	6.7
V. Mín.	6.1	4.5	5.9	V. Mín.	5.8	5.2	5.4	V. Mín.	4.1	2.2	2.2	V. Mín.	4.6

La diferencia encontrada entre las condiciones máximas de termotratamiento y el material utilizado como testigo fue de 1.8% para el periodo de 2 horas y 2.7% para 24 horas respectivamente. El comportamiento de la madera termo tratada a 180 °C por 1.5 y 3.5 horas fue similar para la contracción radial como se puede observar en la Figuras 7.18 y 7.19.

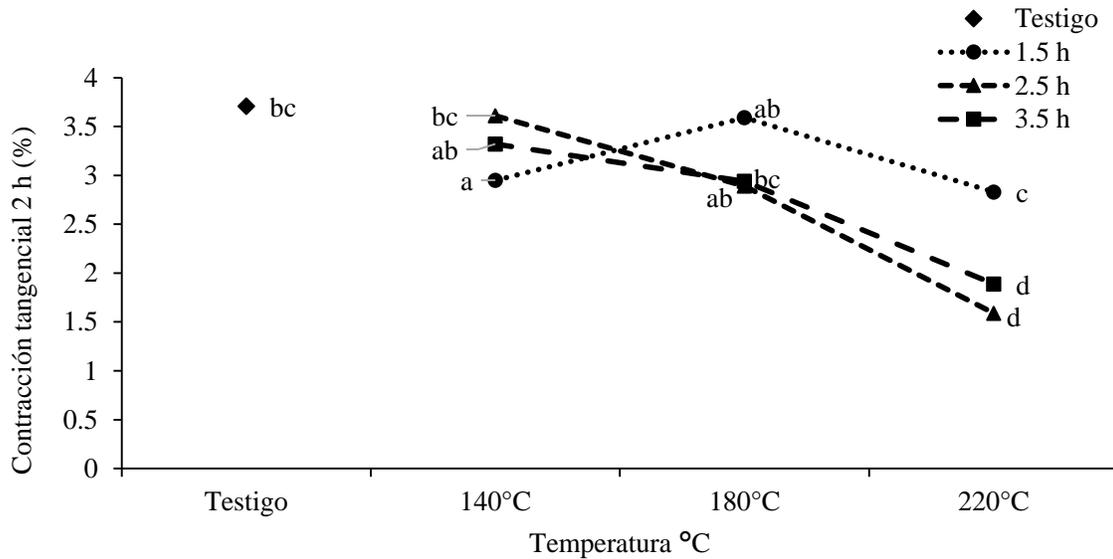


Figura 7.18. Efecto del termotratamiento en la contracción tangencial a 2 horas (%).  
 (abc) Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza

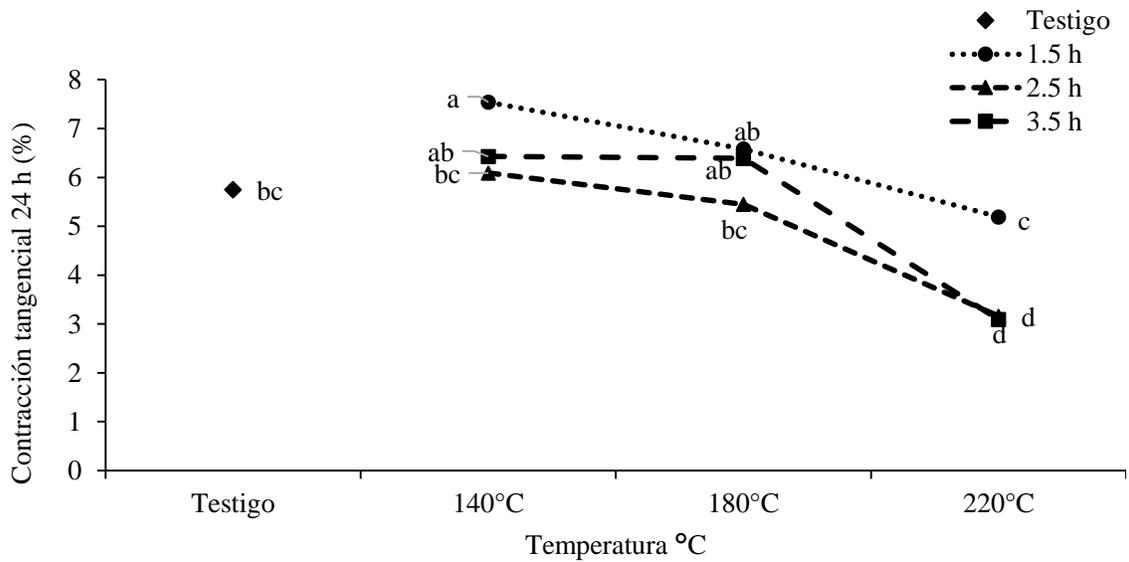


Figura 7.19. Efecto del termotratamiento en la contracción tangencial a 24 horas (%).  
 (abc) Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza

#### 7.7.4. Hinchamiento (%).

El hinchamiento radial a 2 horas en inmersión en agua para la madera termo tratada a condiciones de 3.5 horas fue de 2.4, 3.3 y 0.5% para 140, 180 y 220 °C respectivamente (Tabla 7.12). Para el periodo de 24 horas a 140, 180 y 220 °C fue de 4.5, 5.1 y 1.9% respectivamente (Tabla 7.13). Estos resultados son similares a los reportados por Gündüz *et al.*, (2008) para madera de *Pinus nigra* Subsp. *pallasiana* termotratada a 120, 150 y 180 °C por tiempos de 2, 6 y 10 horas, obteniendo un hinchamiento de 4.0, 3.9 y 3.9% para 2, 6 y 10 horas a 120 °C . Por otro lado, un 3.5, 3.5 y 3.2% a 180 °C para 2, 6 y 10 horas respectivamente. La tendencia a la disminución en el hinchamiento se da con el aumento de la temperatura y el tiempo del termotratamiento (Figura 7.20 y 7.21).

Tabla 7.12. Efecto del termotratamiento en el hinchamiento radial a 2 horas de inmersión (%).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	1.9	2.5	2.5	Prom.	3.4	3.1	3.4	Prom.	2.4	1.1	1.5	Prom.	2.4
Desv. Std.	1.1	0.8	1	Desv. Std.	0.3	0.5	0.4	Desv. Std.	0.4	0.4	0.6	Desv. Std.	0.5
C.V. %	59.9	30.7	39.1	C.V. %	9.5	16.1	12.2	C.V. %	17.2	38.9	42.4	C.V. %	20.7
V. Máx.	3.6	3.3	3.6	V. Máx.	3.7	3.6	4	V. Máx.	3	1.6	2.2	V. Máx.	3
V. Mín.	0.4	1.2	1.4	V. Mín.	2.9	2.3	3	V. Mín.	1.8	0.5	0.7	V. Mín.	2

Tabla 7.13. Efecto del termotratamiento en el hinchamiento radial a 24 horas de inmersión (%).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	3.6	5.5	4.6	Prom.	5	4.3	5.1	Prom.	3.5	1.9	2.9	Prom.	3.6
Desv. Std.	0.8	2.3	0.7	Desv. Std.	0.5	0.5	0.1	Desv. Std.	0.7	0.7	1.9	Desv. Std.	0.4
C.V. %	21.7	41.3	15.2	C.V. %	10.6	12.3	2.2	C.V. %	21	37.9	65.3	C.V. %	11.3
V. Máx.	4.4	9.5	5.2	V. Máx.	5.6	4.8	5.3	V. Máx.	4.2	2.9	6.1	V. Máx.	4
V. Mín.	2.5	4.2	3.4	V. Mín.	4.4	3.4	5	V. Mín.	2.3	0.9	0.9	V. Mín.	3

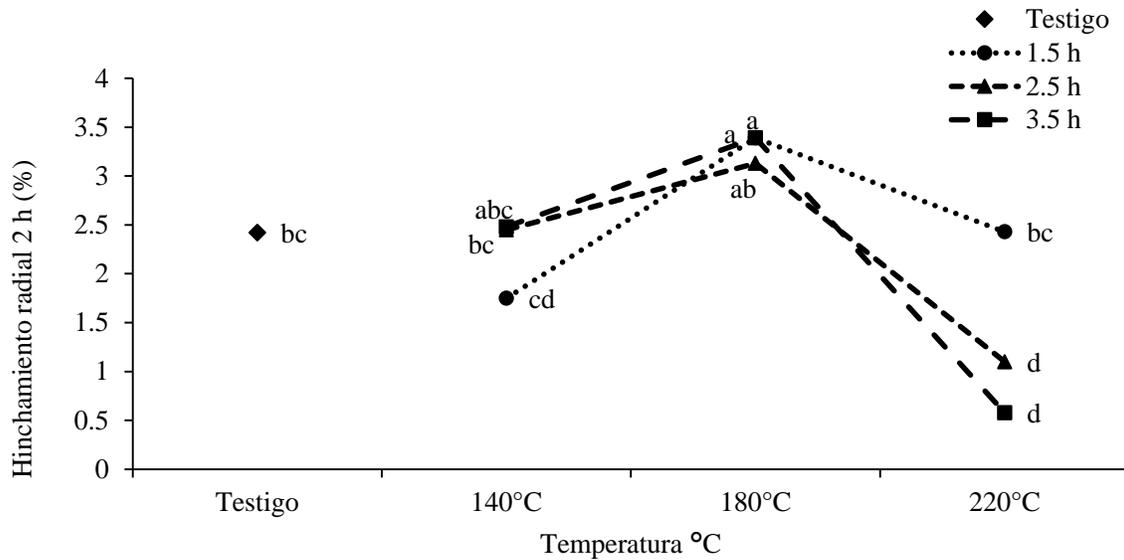


Figura 7.20. Efecto del termotratamiento en el hinchamiento radial a 2 horas (%).  
 (abc) Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza

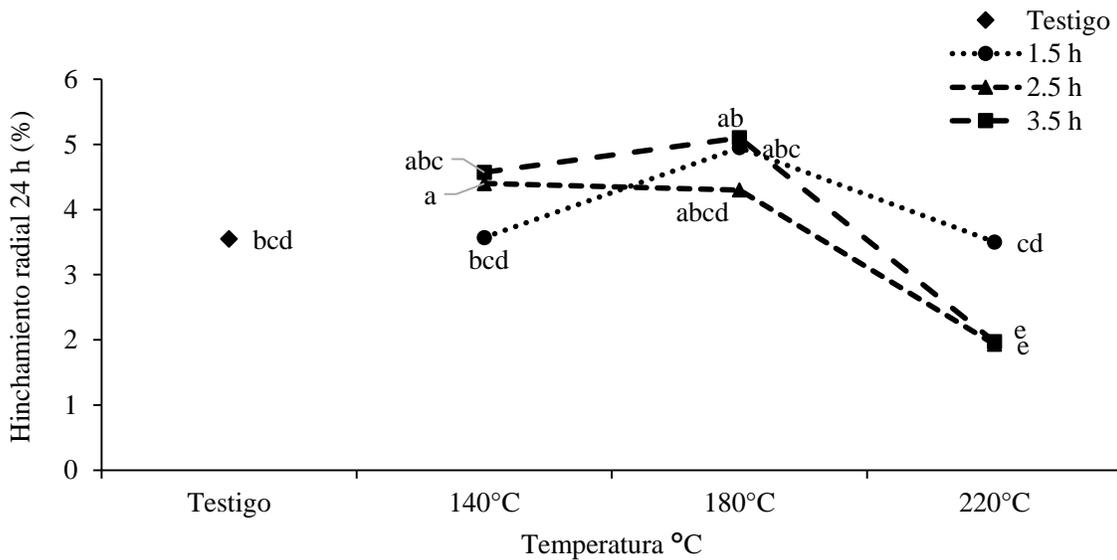


Figura 7.21. Efecto del termotratamiento en el hinchamiento radial a 24 horas (%).  
 (abc) Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza

El hinchamiento de la madera al igual que la contracción es mayor en el sentido tangencial que en radial con lo cual se corrobora la propiedad conocida como anisotropía de la madera. En la Tabla 7.14 es posible observar los valores obtenidos para el hinchamiento tangencial del material termotratado. El material termotratado a condiciones de 140 °C por 1.5 y 2.5 no presentan

diferencia significativa a los encontrados con condiciones de 180 °C por 1.5 horas. De igual manera no existe diferencia significativa entre los tiempos de termotratamiento a 2.5 y 3.5 horas a 180 °C. Los valores mínimos en hinchamiento se obtuvieron con las condiciones de 200 °C por tiempos de 3.5 horas (Tabla 7.15).

Tabla 7.14. Efecto del termotratamiento en el hinchamiento tangencial a 2 horas de inmersión (%).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	4.1	3.8	3.2	Prom.	3.7	3	3	Prom.	2.9	1.6	1.9	Prom.	3.9
Desv. Std.	1.2	1	0.7	Desv. Std.	0.3	0.4	0.3	Desv. Std.	0.9	0.7	0.4	Desv. Std.	2.1
C.V. %	30	26.5	22.3	C.V. %	7.8	13.9	11.1	C.V. %	31.3	42.6	21.9	C.V. %	55
V. Máx.	6.1	5.1	3.7	V. Máx.	4.2	3.5	3.5	V. Máx.	4.3	2.3	2.6	V. Máx.	7.6
V. Mín.	2.7	2.6	1.9	V. Mín.	3.5	2.6	2.6	V. Mín.	2	0.6	1.6	V. Mín.	2.1

Tabla 7.15. Efecto del termotratamiento en el hinchamiento tangencial a 24 horas de inmersión (%).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	8.2	6.5	6.9	Prom.	7	5.8	6.8	Prom.	5.5	3.3	3.2	Prom.	6.1
Desv. Std.	1.4	1.6	0.5	Desv. Std.	0.7	0.4	0.8	Desv. Std.	0.8	0.7	0.7	Desv. Std.	1
C.V. %	16.7	25.2	7.1	C.V. %	9.5	6.7	11.9	C.V. %	15.2	21.4	21.3	C.V. %	16.6
V. Máx.	10	8.4	7.5	V. Máx.	7.9	6.2	7.7	V. Máx.	6.6	4	4	V. Máx.	7.2
V. Mín.	6.5	4.7	6.3	V. Mín.	6.2	5.4	5.7	V. Mín.	4.3	2.2	2.3	V. Mín.	4.9

El mínimo valor obtenido en el hinchamiento tangencial fue de 1.6% a condiciones de 220 °C por 2.5 horas en comparación con el material sin tratar. Por otro lado el valor máximo encontrado en el periodo de 2 horas de inmersión se encontró con las condiciones de 140 °C por 2.5 horas. Se encontró una diferencia en hinchamiento tangencial de 2.2% entre el material utilizado como testigo (3.8%) y el valor mínimo obtenido en la madera termo tratada (1.6% con 220 °C por 2.5 horas), esto es posible observarlo en las Figuras 7.22 y 7.23. Resultados similares han sido reportados por Gündüz *et al.*, (2008) para madera de (*Pinus nigra* Arn. Subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) termo tratada a 120, 150 y 180 °C por tiempos de 2, 6 y 10 horas. Reportan valores de 6.0, 5.9, y 5.8% fueron encontrados para condiciones de termotratamiento de 2, 6 y 10 horas a 120 °C respectivamente. Por otro parte reportan para condiciones de termotratamiento de 2, 6 y 10 horas a 180 °C valores de 4.9, 4.7 y 4.6% respectivamente.

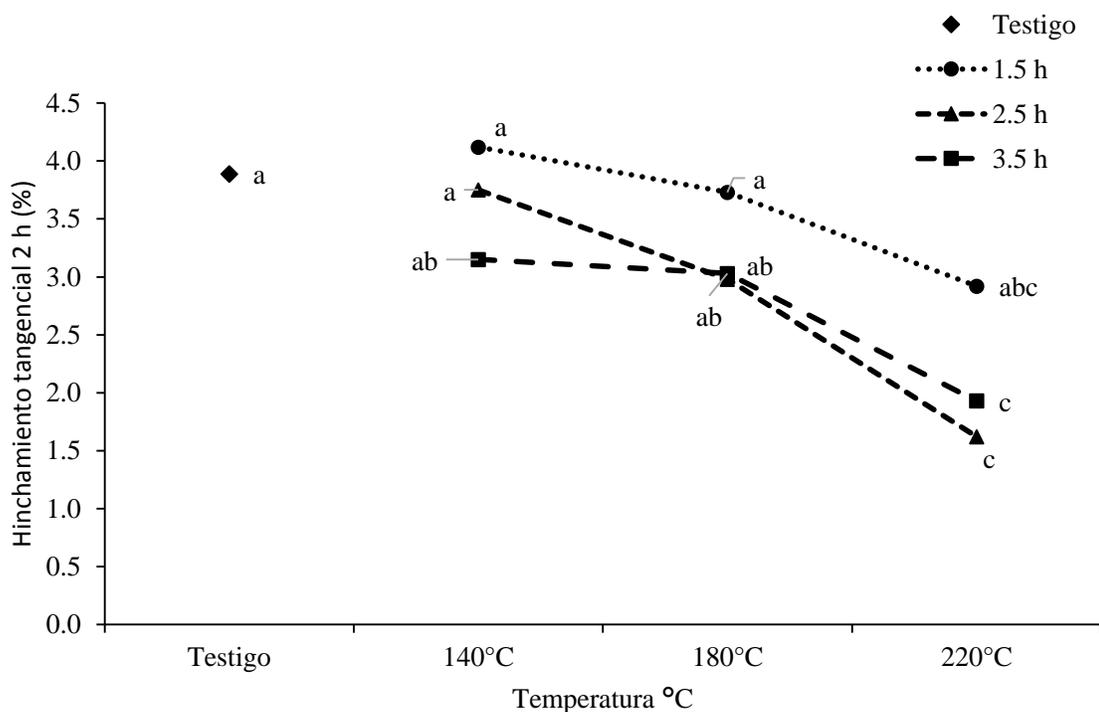


Figura 7.22. Efecto del termotratamiento en el hinchamiento tangencial a 2 horas (%).  
<sup>(abc)</sup> Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza

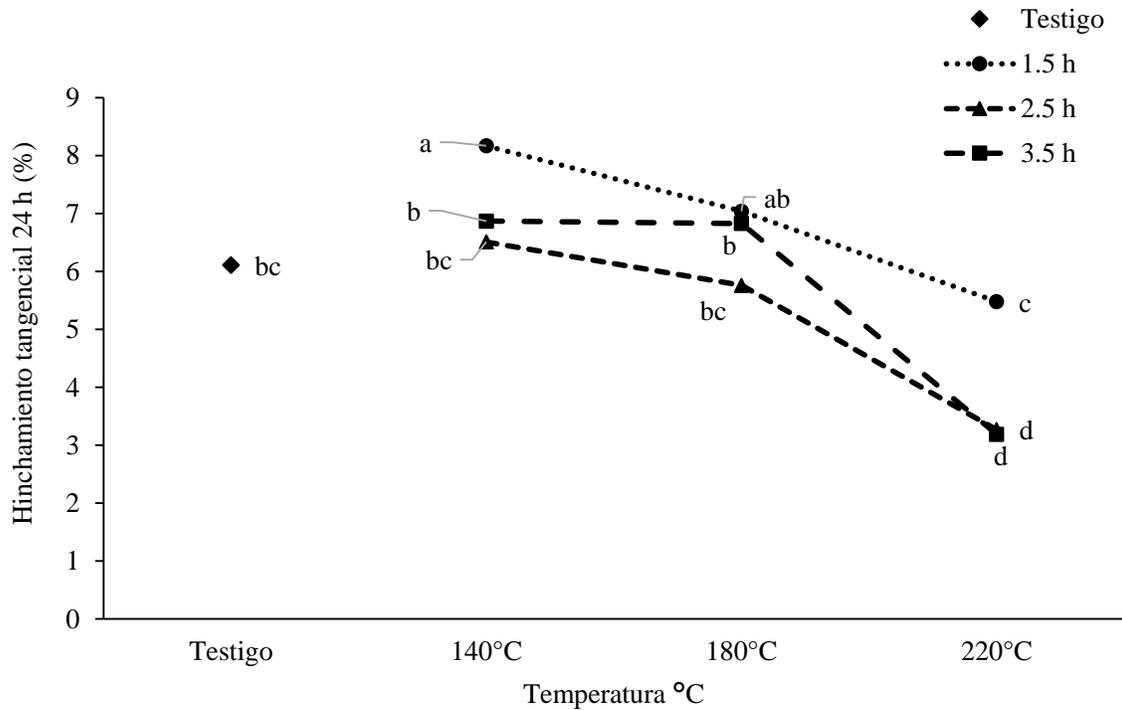


Figura 7.23. Efecto del termotratamiento en el hinchamiento tangencial a 24 horas (%).  
 (abc) Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza

## 7.8. Pruebas mecánicas del material termo tratado.

### 7.8.1. Flexión estática (MOR).

Como se hizo mención en los antecedentes de este trabajo se sabe que el proceso de termotratamiento afecta las propiedades mecánicas de la madera, la Tabla 7.17 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la flexión estática. El material utilizado como testigo presentó una resistencia al módulo de ruptura (MOR) del 103 N/mm<sup>2</sup> valor que se clasifica como una resistencia media de acuerdo a Echenique - Manrique (1994).

Cuando se sometió la madera a condiciones de 140 y 180 °C por tiempo de 1.5 horas se incrementó la resistencia en flexión un 6.7 y 15.5% respectivamente debiéndose esto a que se están eliminando compuestos de bajo peso molecular y se está realizando una compactación de las fibras volviéndose más rígida la madera. Sin embargo, cuando se utilizaron temperaturas de 180 y 200 °C se obtuvieron disminuciones en flexión del 8.7 y 53.3% respectivamente. Estos resultados son

similares a los reportados por Calonego *et al.*, (2012) para *Eucalyptus grandis* quienes reportaron una disminución de 24 y 52.3% para 180 y 200 °C. Por otro lado resultados cercanos a los encontrados en este estudio son reportados por Korkut y Hiziroglu (2009), quienes reportan una disminución en la resistencia a la flexión de 0.38, 6.33 y 6.7% en madera de hazelnut (*Corylus colurna*) termo tratada a 140 °C por tiempos de 2, 6 y 10 horas respectivamente. La máxima disminución en flexión que se tuvo en este estudio fue con la madera termotratada a condiciones de 220 °C por 2.5 y fue de 53% (Figura 7.24 y 7.25).

La afectación en la resistencia es igual para las condiciones de termotratamiento de 2.5 horas a 40 y 180 °C (9.7%) ya que no presentan diferencia significativa de acuerdo al análisis de varianza (Tabla 7.16), estos valores difieren con Korkut y Hiziroglu (2009), quienes reportan una disminución en la resistencia a la flexión de 14, 19.6 y 31.8 para madera de *Corylus colurna* termotratada a 180 °C por tiempo de 2, 6 y 10 horas en atmósfera normal, lo cual se puede deber principalmente al tiempo de tratamiento ya que se utilizan hasta 10 horas de tratamiento.

Tabla 7.16 ANOVA en flexión (MOR).

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F	P > F
Tratamientos	8	61003.32	7625.41	6.08	<.0001
Error	126	158049.71	1254.36		
Total	134	219053.03			

En otro estudio realizado por Cihad (2014) en madera juvenil de *Pinus nigra* subsp. *Pallasiana* termotratada en atmósfera normal utilizando temperaturas de 140, 170 y 200 °C por tiempo de 3 horas, los resultados que se obtuvieron fue una disminución en el MOR de 2.8, 12.7 y 24.6% para 140, 170 y 200 °C respectivamente, mientras que en la madera de *Eucalyptus nitens* se obtuvo una disminución de 5.8 y 30.1% para las condiciones de 180 y 200 °C con 3.5 horas.

Tabla 7.17. Resistencia a la flexión en madera termotratada (MOR).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	127	108	112	Prom.	119	109	121	Prom.	106	61	72	Prom.	111
Desv. Std.	25.8	18.3	15	Desv. Std.	13.2	12.4	27.5	Desv. Std.	15.6	11.1	20.3	Desv. Std.	15.6
C.V. %	20.4	16.9	13.4	C.V. %	11	11.4	22.7	C.V. %	14.7	18.3	28	C.V. %	15.6
V. Máx.	197	142	139	V. Máx.	148	128	161	V. Máx.	125	77	120	V. Máx.	153
V. Mín.	90	74	77	V. Mín.	100	91	70	V. Mín.	77	33	40	V. Mín.	75

Tabla 7.18. Dureza lateral en madera termotratada.

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	673	412	501.3	Prom.	421.3	536.3	381.3	Prom.	466.7	116.3	0	Prom.	675.7
Desv. Std.	92.8	224.8	273.6	Desv. Std.	230.5	117.8	206.3	Desv. Std.	234.5	202.1	0	Desv. Std.	163.2
C.V. %	13.8	54.6	54.6	C.V. %	54.7	22	54.1	C.V. %	50.2	173.1	0	C.V. %	24.2
V. Máx.	830	620	800	V. Máx.	700	775	590	V. Máx.	780	515	0	V. Máx.	1070
V. Mín.	550	0	0	V. Mín.	0	355	0	V. Mín.	0	0	0	V. Mín.	510

Tabla 7.19. Dureza longitudinal en madera termotratada.

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	872.3	788.7	795	Prom.	671.3	730	720.7	Prom.	735.7	618.3	269	Prom.	675.7
Desv. Std.	106.3	63.9	110.3	Desv. Std.	131.3	80.2	116.9	Desv. Std.	150.2	90.7	346.9	Desv. Std.	163.2
C.V. %	12.2	8.1	13.9	C.V. %	19.6	11	16.2	C.V. %	20.4	14.7	12.9	C.V. %	24.2
V. Máx.	1030	920	1050	V. Máx.	1010	855	955	V. Máx.	1050	752	800	V. Máx.	1070
V. Mín.	675	675	670	V. Mín.	480	610	530	V. Mín.	530	445	0	V. Mín.	510

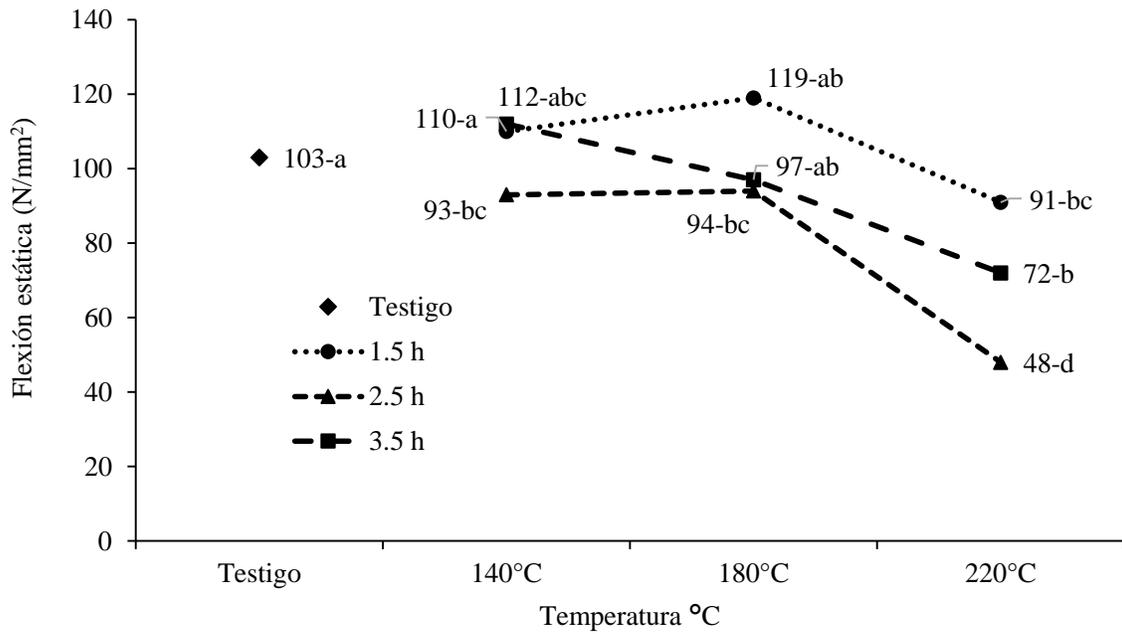


Figura 7.24. Efecto del termotratamiento en la resistencia a la flexión (MOR).  
 (abc) Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza



Figura 7.25. Flexión en probetas termo tratadas

### 7.8.2. Dureza lateral.

La dureza lateral se incrementó 40% (6468 N) cuando se utilizaron las condiciones más bajas (140 °C por 1.5 horas) en relación al valor presentado por el testigo (4601 N) lo cual se debe a una compactación de las fibras y por la eliminación de compuestos de bajo peso molecular (Tabla 7.18.) Se tuvieron diferencias significativas entre los tratamientos de acuerdo al análisis de varianza (Tabla 7.20). Sin embargo, cuando se utilizan condiciones de 140 °C por tiempo de 2.5 horas, aumentó un 11.6% (5135 N) y un 25.8% (5792 N) para 3.5 horas. Valores similares han sido encontrados por Priadi y Hiziroglu (2013) quienes reportan para madera de Mindi (*Melia azedarch* L.) termotratada a condiciones de 130 °C por 2 horas valores en dureza lateral de 4799 y 4196 N para condiciones de 220 °C por 2 horas. Por otro lado, estos valores difieren a los reportados para madera de *Pinus taeda* en resistencia a la dureza lateral la cual es de 3116 N para condiciones de 130 °C por 8 horas y para 220 °C con el mismo tiempo una resistencia de 2989 N. Estos valores equivalen a una disminución del 1.3 y 5.4% respectivamente.

Gündüz *et al.*, (2008) reportan para madera de *Pinus nigra* Subsp. *pallasiana* termotratada a 120, 150 y 180 °C por tiempos de 2, 6 y 10 horas valores para la disminución en la dureza lateral de 30.5, 31.9 y 32.3% para 150 °C y un 33, 36.9 y 38.9% para 180 °C.

Tabla 7.20 ANOVA en dureza lateral.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	F	P > F
Tratamientos	8	4172988.44	521623.55	14.16	<.0001
Error	126	4641022.53	36833.51		
Total	134	8814010.98			

Para todas las condiciones de termotratamiento se tiene un aumento en la resistencia de la dureza lateral. Sin embargo, cuando se utilizan condiciones de 220 °C por tiempos mayores a 2.5 horas las probetas se afectan a tal grado que es imposible realizar los ensayos (Figura 7.26 y 7.27). Esta disminución en la resistencia se puede explicar por la degradación y eliminación de las hemicelulosas que tiene como consecuencia una ruptura en las cadenas de los carbohidratos contenidos en la madera.

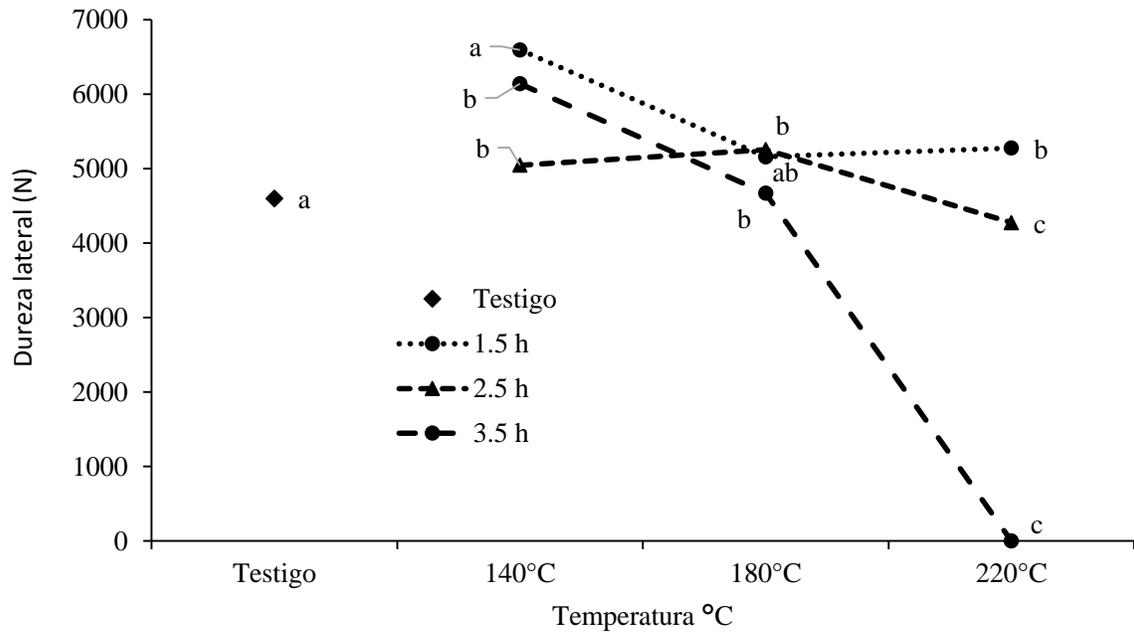


Figura 7.26. Efecto del termotratamiento en la dureza lateral.

(abc) Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza



Figura 7.27. Dureza lateral en probetas termotratadas.

### 7.8.3. Dureza longitudinal.

Cuando se utilizan condiciones de 140 °C por tiempo de 1.5 horas, se obtuvo un aumento en la resistencia en dureza longitudinal del 35% debiéndose esto a que las fibras sufren una compactación y a la eliminación de compuestos al utilizar estos rangos de temperatura como se logra observar en la Tabla 7.19. Cuando es utilizada temperatura de 180 °C el comportamiento no tiene diferencia significativa para ninguna de las condiciones, esto en relación al valor obtenido con el material sin tratar y al análisis de varianza (Tabla 7.21). La máxima disminución en la dureza longitudinal se obtuvo para las condiciones de 220 °C por 2.5 horas el cual fue de un 6.4%. Estos resultados difieren a los reportados por Korkut y Hiziroglu (2009) quienes reportan una disminución de la resistencia para todos los tratamientos, presentándose valores como 26.7, 44.9 y 64.3% para 2, 6 y 10 horas a 180 °C en madera de *Hazelnut (Corylus colurna)*.

Tabla 7.21 ANOVA en dureza longitudinal.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	P > F
Tratamientos	8	4378437.08	547304.63	18.35	<.0001
Error	126	3757177.23	29818.86		
Total	134	8135614.31			

A diferencia de la resistencia lateral, en la dureza longitudinal es posible realizar los ensayos en todas las condiciones de termotratamiento (Figura 7.28). Es decir, con las condiciones de 220 °C por 3.5 horas aún es posible ensayar las piezas. Sin embargo, es muy importante mencionar que la madera se ve muy deteriorada (Figura 7.29).

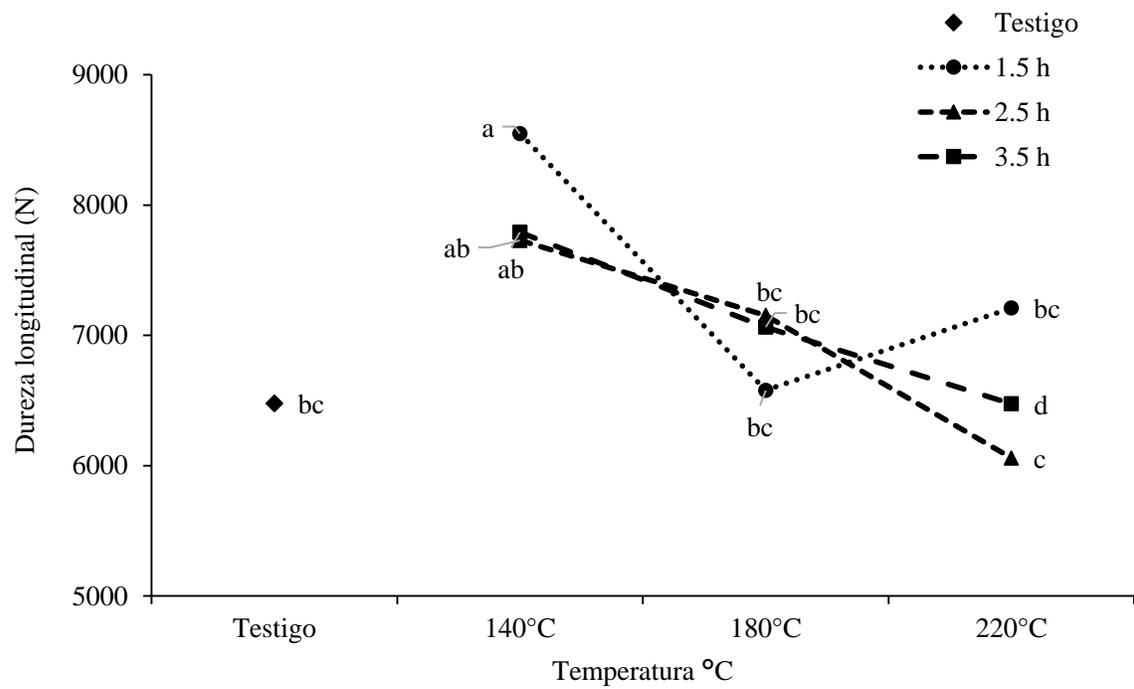


Figura 7.28. Efecto del termotratamiento en la dureza longitudinal.

(abc) Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza



Figura 7.29. Dureza longitudinal en probetas termotratadas.

#### 7.8.4. Compresión paralela a la fibra (MOR).

El material que se utilizó como testigo presentó un valor de 64 N/mm<sup>2</sup> en resistencia a la compresión paralela a la fibra (Tabla 7.22). El valor máximo se encontró con condiciones de 140 °C por 3.5 horas y fue un aumento del 17% en relación al material sin tratar, esto debido a lo que anteriormente se ha venido mencionando, a que se eliminan compuestos como el agua contenidos lo que hace que se liberen espacios y las fibras sufran una compactación. La mínima resistencia se tuvo para las condiciones de 220 °C por 1.5 horas con una disminución del 21% debiéndose esto al deterioro que sufre la madera por la oxidación causada al eliminarse en su totalidad las hemicelulosas, indicando con esto diferencias entre los tratamientos lo cual se corroboró por medio del ANOVA (Tabla 7.25).

Gündüz *et al.*, (2008) reportan para madera termotratada de *Pinus nigra*. Subsp. *pallasiana* a 120, 150 y 180 °C por tiempos de 2, 6 y 10 horas valores para la disminución en la compresión de 4.5, 14.9 y 23.3% para condiciones de 120, 150 y 180 °C. Estos valores son similares a los encontrados en este trabajo donde se obtuvo una disminución en la resistencia a la compresión de 3.1 y 1.5% para condiciones de termotratamiento de 140 y 180 °C por tiempo de 2.5 horas. Estos resultados son parecidos a los reportados por Calonego *et al.*, (2012) quienes reportan una disminución en la resistencia a la compresión paralela a la fibra de 5.6% en madera de *Eucalyptus grandis*.

Cuando son utilizadas condiciones de 220 °C se tiene un aumento en la resistencia a la compresión del 4.3 y 3.1% para 2.5 y 3.5 horas respectivamente (Figura 7.30 y 7.31). Es importante mencionar que prácticamente las piezas están carbonizadas por lo cual es difícil determinarles algún uso. Korkut y Hiziroglu (2009), reportan una disminución de la resistencia a la compresión de 0.38, 11.45 y 20.2% para madera termotratada de *Hazelnut (Corylus colurna)* a 120, 150 y 180 °C por tiempo de 2 horas.

Tabla 7.22. Compresión paralela en madera termotratada (kg/cm<sup>2</sup>).

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	64	62	76	Prom.	68	64	66	Prom.	50	67	47	Prom.	59
Desv. Std.	6.2	5.4	8.2	Desv. Std.	6.6	5.5	9.2	Desv. Std.	9.9	10.1	4.1	Desv. Std.	6.2
C.V. %	9.7	8.7	10.8	C.V. %	9.7	8.7	13.9	C.V. %	19.8	15	8.8	C.V. %	10.6
V. Máx.	79	73	94	V. Máx.	83	78	79	V. Máx.	64	84	55	V. Máx.	71
V. Mín.	54	51	62	V. Mín.	59	54	43	V. Mín.	38	47	38	V. Mín.	48

Tabla 7.23. Resistencia a la extracción de clavos lateral (kg) en madera termotratada.

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	91	91	86	Prom.	89	114	104	Prom.	122	80	78	Prom.	111
Desv. Std.	12.5	14	17.8	Desv. Std.	11.5	8.2	14.5	Desv. Std.	26.4	18.2	17.7	Desv. Std.	15.1
C.V. %	13.7	15.4	20.7	C.V. %	12.8	7.2	14	C.V. %	21.7	22.6	22.7	C.V. %	13.6
V. Máx.	104	105	114	V. Máx.	105	122	115	V. Máx.	161	105	95	V. Máx.	124
V. Mín.	75	74	69	V. Mín.	75	102	79	V. Mín.	102	60	58	V. Mín.	90

Tabla 7.24. Resistencia a la extracción de clavos longitudinal (kg) en madera termotratada.

Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura			Tiempo	Temperatura				
1.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	2.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	3.5 horas	140 °C	180 °C	220 °C	Testigo	
Prom.	85	81	64	Prom.	71	94	88	Prom.	102	69	54	Prom.	63
Desv. Std.	13.7	9.4	9.6	Desv. Std.	11.7	16.4	24	Desv. Std.	19.4	14.2	10.3	Desv. Std.	22
C.V. %	16.2	11.7	15	C.V. %	16.5	17.3	27.4	C.V. %	19.1	20.6	19.2	C.V. %	35
V. Máx.	101	95	80	V. Máx.	92	117	122	V. Máx.	130	88	71	V. Máx.	89
V. Mín.	63	71	55	V. Mín.	62	74	62	V. Mín.	84	51	45	V. Mín.	38

Tabla 7.25 ANOVA en compresión.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	8	9342.89	1167.86	20.61	<.0001
Error	126	7140.98	56.67		
Total	134	16483.88			

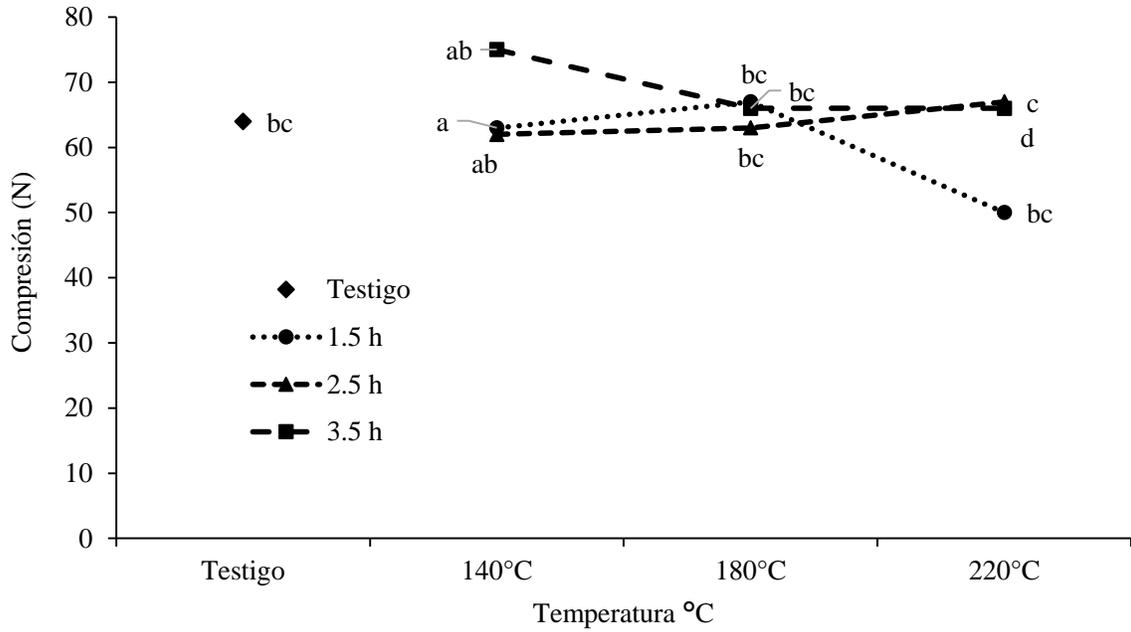


Figura 7.30. Efecto del termotratamiento en la compresión paralela a la fibra (MOR).  
<sup>(abc)</sup> Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza



Figura 7.31. Compresión en probetas termotratadas.

### 7.8.5. Extracción de clavos lateral.

Los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la extracción de clavos muestran que existe diferencia entre los tratamientos, teniendo como resultado que cuando se utilizan condiciones de 140 °C por tiempos de hasta 3.5 horas se tiene una disminución de 17 a 21.6% en sentido lateral. Sin embargo, cuando se utilizan temperaturas de 180 °C y tiempos mayores a 2.5 horas se tiene un incremento en la resistencia a la extracción de clavos que va de 3.6 hasta 21.6%. El material sin tratamiento tuvo una resistencia de 110.8 Kg. Esto es posible observarlo en la Tabla 7.23. Estos valores son superiores a los reportados para *Gmelina arborea* (melina) procedente de plantación forestal de 15 años la cual tiene una resistencia de 48 y 46 kg para el sentido lateral y longitudinal respectivamente.

La Figura 7.32 muestra claramente el efecto de la disminución en la resistencia a la extracción de clavos cuando se utilizan temperaturas de 220 °C con tiempos mayores a 2.5 horas, la reducción va desde un 27 hasta un 29.8%. Aunque existe la disminución de resistencia en algunos de los tratamientos, los valores que se obtuvieron se clasifican como un nivel de resistencia alta.

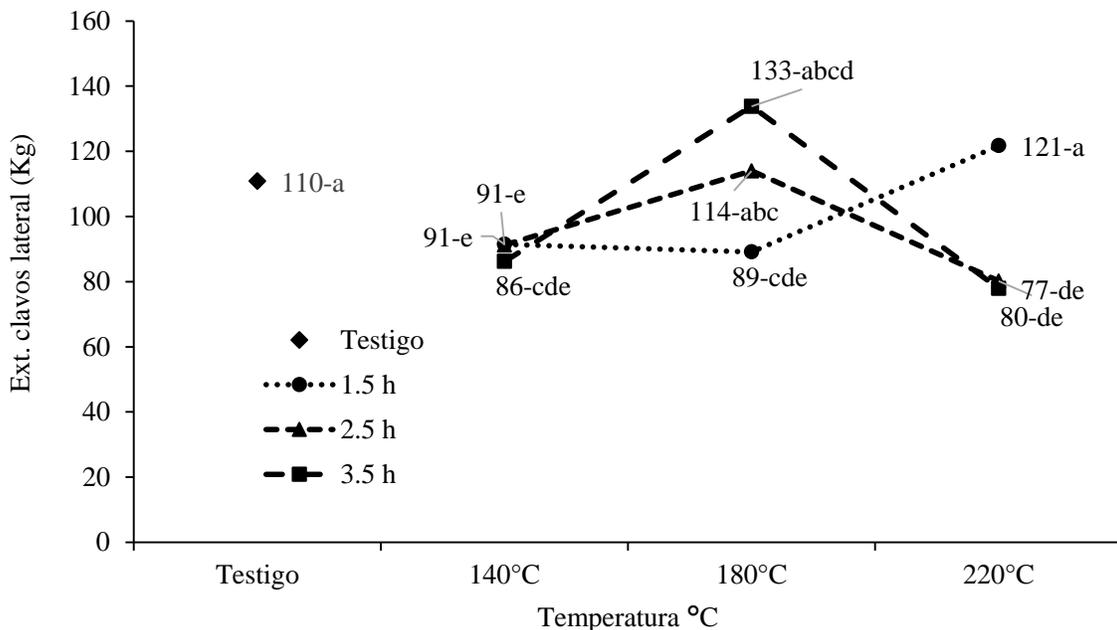


Figura 7.32. Efecto del termotratamiento en la extracción de clavos lateral.

(abc) Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza

### 7.8.6. Extracción de clavos longitudinal.

En la resistencia a la extracción de clavos en el sentido longitudinal únicamente se encontraron valores que indicaron un incremento de resistencia que va desde un 27.9% para las condiciones de termotratamiento más bajas hasta un 62.1% para las condiciones máximas (220 °C con 3.5 horas) como se puede apreciar en la Tabla 7.24 y las Figura 7.33 y 7.34. Estos valores son similares a los que reporta Rivero y Moya (2006) para madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca) procedente de plantación forestal comercial de 8 años de edad, ellos reportan una resistencia de 61.25 y 70 Kg para el sentido lateral y longitudinal respectivamente.

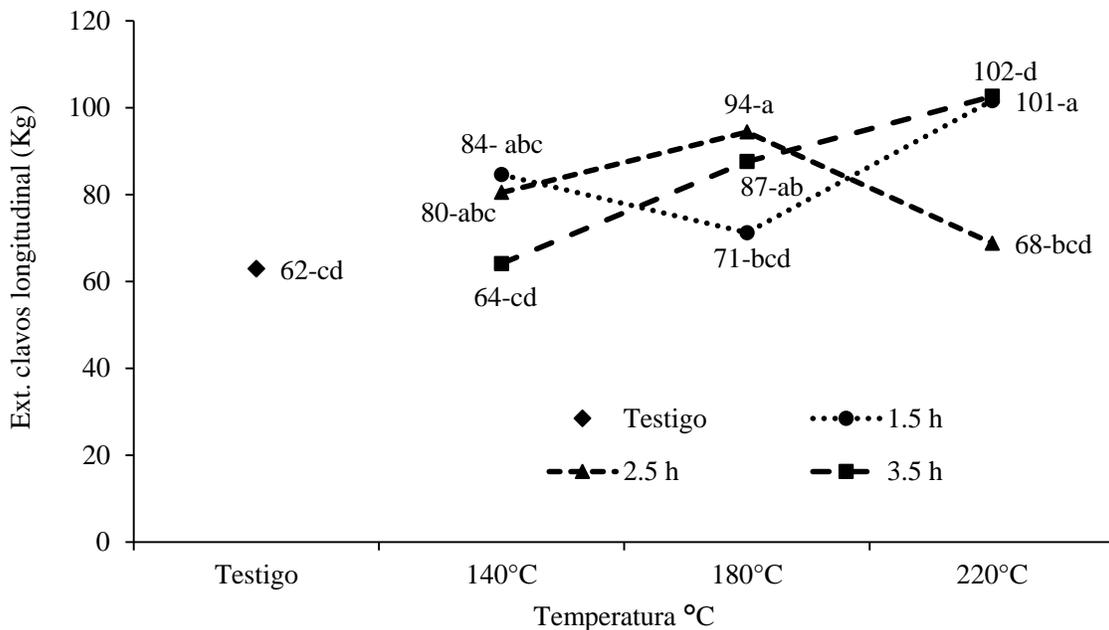


Figura 7.33. Efecto del termotratamiento en la extracción de clavos longitudinal.

<sup>(abc)</sup> Letras diferentes significa que hay diferencia estadística significativa utilizando un 0.05% de nivel de confianza



Figura 7.34. Extracción de clavos en probetas termotratadas.

## 8. CONCLUSIONES.

La densidad presenta un aumento del 3 a 5% cuando se utilizan condiciones de 140 °C, sin embargo, se tiene una pérdida de 8.4% cuando se utilizan 220 °C por 3.5 horas.

Existe una pérdida de masa significativa a partir de las condiciones en donde se utilizan 180 °C incrementando esta en relación al tiempo y la temperatura.

Cuando son utilizadas temperaturas de 140 y 180 °C para el termotratamiento, no se tienen resultados tan aceptables en la estabilidad de la madera, ya que se tiene al parecer un aumento y no una disminución en la higroscopicidad.

Existe una tendencia al incremento en hinchamiento durante los tiempos donde se utilizó temperatura de 180 °C. Esta reacción posiblemente se debió a que es a estas temperaturas cuando se eliminan compuestos que no son afines al agua y que al ser eliminados están a la vez liberando espacios en la madera.

El tratamiento con 220 °C fue el que presentó los mejores resultados en cuanto a estabilidad dimensional sin embargo, cuando se utilizan condiciones normales con presencia de oxígeno la madera sufre una degradación considerable.

La dureza lateral únicamente se puede evaluar con las condiciones más bajas de termotratamiento utilizadas. Las temperaturas y tiempos mayores a 180 °C se descartan debido a que las piezas sufren un deterioro significativo al grado que no pueden ser ensayadas.

El módulo de ruptura (MOR) se reduce significativamente con temperaturas superiores a los 180 °C y tiempos mayores a 2.5 horas, por lo cual esta madera no puede ser utilizada en estructuras grandes que estarán sujetas a fuerzas en flexión.

La resistencia en compresión (MOR) presentó un aumento del 17% cuando se utilizan temperaturas de 140 °C, sin embargo, disminuye en relación al aumento del tiempo y la temperatura decreciendo un 21% al utilizar 220 °C por 3.5 horas.

La resistencia a la extracción de clavos en ambos sentidos presentó un incremento al utilizar temperaturas de 180 °C, sin embargo, al igual que las otras pruebas mecánicas disminuye al utilizar temperaturas de 220 °C.

El termotratamiento muestra un área potencial interesante para la elaboración de productos sólidos con características específicas para ser utilizados en exteriores en donde estarán en contacto con todos los agentes que causan el deterioro de la madera. Todas las maderas que no tienen un valor comercial redituable pueden ser termotratadas lo cual aumenta su valor, como es el caso de la madera de *Eucalyptus nitens*.

El comportamiento que tuvo la madera de *Eucalyptus nitens* en base a los resultados de las pruebas realizadas, la clasifican como una madera que fácilmente podría ser utilizada para la elaboración de estructuras pequeñas que se utilizan por lo general en exteriores como es el caso de juegos para jardines, cercos para yardas y jardines, pasarelas, porches, contornos de piscinas, pisos de regaderas, barreras acústicas, lambrín entre otros.

## 9. RECOMENDACIONES

Tabla 7.26. Recomendaciones para el uso del termotratamiento

Tiempo	Temperatura			Aspectos
	140 °C	180 °C	220 °C	
1.5 h	J	M	P	1. Color 2. Absorción de agua 3. Contracción e hinchamiento 4. Resistencia mecánica 5. Dureza 6. Extracción de clavos
2.5 h	K	N	Q	
3.5 h	L	O	R	
Usos	Aspectos		Termotratamiento recomendado	
<i>Fachadas</i>	1, 2, 3, 4, 6		M, N, O, P	
<i>Puertas para exteriores</i>	1, 2, 3, 4, 5, 6		M, N, O, P	
<i>Ventanas</i>	1, 2, 3, 6		M, N, O, P	
<i>Suelos de terrazas</i>	1, 2, 3, 4, 5, 6		N, O, P	
<i>Suelos de patios</i>	1, 2, 3, 4, 5, 6		N, O, P	
<i>Suelos de piscinas</i>	1, 2, 3, 4,		O, P,	
<i>Muebles de jardín</i>	1, 2, 3, 4, 6		M, N, O, P	
<i>Juegos infantiles</i>	1, 2, 3, 4, 6		M, N, O	
<i>Pasarelas</i>	1, 2, 3, 4, 6		N, O, P	
<i>Barreras acústicas</i>	1, 2, 3		P, Q, R	
<i>Recubrimientos de techos y paredes</i>	1, 2, 3, 4, 6		N, O, P, Q	
<i>Lambrín</i>	1, 2, 3, 6		M, N, O	
<i>Suelos de pisos de interior</i>	1, 2, 3, 4, 6		M, N, O	
<i>Saunas</i>	1, 2, 3, 4, 6		N, O, P	
<i>Mamparas separadoras</i>	1, 2, 3, 4		O, P, Q	
<i>Celosías para exteriores</i>	1, 2, 3, 4, 5, 6		O, P	
<i>Comedores al aire libre</i>	2, 3, 4, 6		P, Q	
<i>Recubrimientos para jardines</i>	1, 2, 3, 6		N, O, P, Q	
<i>Señalamientos en vías carreteras</i>	2, 3, 6		O, P, Q	
<i>Depósitos para la basura</i>	1, 2, 3, 4		O, P, Q	
<i>Pérgolas</i>	1, 2, 3, 4, 5, 6		M, N, O	

Tratamientos con temperaturas de 140 °C no se recomiendan debido a su baja efectividad.

Debido a que es una madera de fibra corta y clara se utiliza para la elaboración de papel.

Gracias a que es una madera de color claro, es apta para la aplicación de termotratamiento ya que las tonalidades que se llegan a alcanzar son muy similares a las de algunas maderas finas que se comercializan a precios elevados en el mercado.

La madera presentó una gran cantidad de defectos ocasionados durante el secado tales como grietas, rajaduras y apanalamientos lo cual se debe a que es una madera joven que presenta gran variedad de tamaños de fibra.

## 10. BIBLIOGRAFÍA.

- Alfonso, V. (1987). Caracterização anatómica do lenho e da casca das principais espécies de *Eucalyptus* L' Herit, cultivados no Brasil. Instituto de Biociências da Universidade de Sao Paulo.
- Ananías, R., A., Díaz, C., Leandro, L. (2009). Estudio preliminar de la contracción y el colapso en *Eucalyptus nitens*. Madera Ciencia y Tecnología. 11(3):251-262.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2009). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. D 143-09.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2014). Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates.
- Ates, S. Akyildiz, M., H. Ozdemir, H. (2009). Effects of heat treatment on Calabrian Pine (*Pinus brutia* Ten.) wood. BioResources. 4(3), 1032-1043.
- Beall, F., C. Blankhorn, P., R. Moore, G., R. (1974). Carbonized wood physical properties and use as an SEM preparation. Wood Science 6 (3), 212–219.
- Bhuiyan, M., D. (2001). Shizuoka University. Faculty of Agriculture. Bolletin of the Faculty of Agriculture. 0559-8850.
- Bhuiyan, T., R. Hirai, N. Sobue, N. (2002). Effect of intermittent heat treatment on crystallinity in wood cellulose. J wood Sci 47:336-341.
- Bhuiyan, T., R. Hirai, N., Sobue, N. (2000). Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. J Wood Sci 46:431-436.
- Brito, J., O. Barrichelo, L., E. (1979). Comportamentos isolados da lignina e da cellulose da madeira frente à carbonização. Circular Técnica IPEF. Piracicaba 28, 1–4.
- Brito, J., O. Silva, F., G. Leao, M., M. Almeida, G. (2008). Chemical composition changes in *Eucalyptus* and *Pinus* Woods submitted to heat treatment. Bioresource Technol; 99:8545–8548.
- Calonego, F., Severo, E., Ballarin, A. (2012). Physical and mechanical properties of thermally modified Wood from *E. grandis*. Wood Prod. 70:453-460.
- Calonego, F., W. Severo, E., T.D. Furtado, E., L. (2010). Decay resistance of thermally-modified *Eucalyptus grandis* Wood at 140°C, 160°C, 180°C, 200°C y 220°C. Bioresource Technology. 9391-9394.
- César, B., D. (2012). Modificación térmica de madera de *Eucalyptus grandis* a escala industrial por el proceso brasileño VAP HolzSysteme®. Tesis Doctoral. Sector de Ciencias Agrarias. Centro de Ciencias Forestales de la Madera. Universidad de Paraná.

- Chaouch, M., Pétrissans, M., Pétrissans, A., Gérardin, P. (2010). Use of wood elemental composition to predict heat treatment intensity and decay resistance of different softwood and hardwood species. *Wood Sci Technol.* 2255-2259.
- COFOM (Comisión Forestal del Estado de Michoacán). (2003). Programa de plantaciones forestales de Michoacán Bosques y Selvas de Michoacán. Año 1. Vol. 1. Época 1. N°. 3. Morelia. Michoacán. 6-7 pp.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2008). Situación Actual y Perspectivas de las Plantaciones Forestales Comerciales en México.
- Derya, S., Bilgin, G. (2008). The effects of heat treatment on physical properties and surface roughness of red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) *Wood.Bioresource Technology.* 2008. 2846-2851.
- Dyer, S. (1992). Wood anatomical descriptions of selected eucalypt species and hybrids growing in South Africa, and a key to their identification. Forestry Branch: Department of Water Affairs and Forestry. FOR-DEA, p. 520.
- Espinoza-Herrera, R. (2008). Thermal Degradation and Thermal Conductivity of Gypsum-Cement Particleboard. *Wood and Fiber Science.* 41(1). pp. 13-21.
- Esteves, B., Velez Marques, A., Domingos, I., Pereira, H. (2007). Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and Eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science and Technology.* 41:193-207.
- Fengel, D. Wengener, G. (1989). *Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions*, Walter de Gruyter and Co. Berlín, New York, p.613.
- García, R., A. Carvalho, A., M. Latorraca, J., V., F. Matos, J., L., M. Santos, W., A. and Silva, R., F., M. (2012). “Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden Wood using stress wave method,” *Wood Sci. Technol.* 46(1-3), 41-52.
- Gökham, G., Súleyman, K., Derya, S., K. (2008). The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyani Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood. *Bioresource Technology.* 2275-2280.
- Gomes, P., A. Oliveira, J., B. (1980). Teoria da carbonização da madeira. In: *Uso da madeira ara fins energéticos*, CETEC, Belo Horizonte, pp. 27–42.
- González, P., Schneid, E., Gatto, D., Stangerlin, D., Beltrame, R. (2013). Thermal modification of *Eucalyptus grandis* Wood: variation of colorimetric parameters. *Madera Ciencia y Tecnología.* 15(1): 57-64.

- Guedira, F. (1988). Pyrolise lente de la biomasse: comportement compare des tourteux d'olives, de la bagasse de canne a sucre et la sciure de bois (Pin maritime). Maroc, Thèse (Docteur) – Université Mohamed, p. 122.
- Gunduz, G., Korkut, S., Korkut., D. (2008). The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyani Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp *pallasiana* var.*pallasiana* ) wood. *Bioresource Technol*; 99:2275–80.
- Guridi, G. (2003). Temario de Anatomía de la Madera I. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Haykiri-Açma, H. (2003). Combustion characteristics of different biomass materials. *Energy Convers. Manag.* 44, 155–162.
- Hillis, W., E. (1984). Higt temperature and chemical effects on wood stability. Part 1. General considerations. *Wood Sci Technol*; 18:281-293.
- Homan, W., Tjeerdsma, B., Beckers, E., Jorissen, A. (2000). Structural and other properties of modified wood. In: World Conference on Timber Engineering, British Columbia, Canada. Proceedings British Columbia, Canada, p. 8.
- Inari, G., N. Petrissans, M., Gerardin, P. (2007). Chemical reactivity of heat-treated wood. *Wood Sci Technol* 41:157-168.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Determination of static hardness. ISO 3350.1a Ed.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Determination of density for physical and mechanical tests. ISO 3131.1a Ed.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Determination of radial and tangential shrinkage. ISO 4469.1a Ed.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Determination of radial and tangential swelling. ISO 4859.1a Ed.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Determination of ultimate strength in static bending. ISO 3133.1a Ed.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Testing in compression perpendicular to grain. ISO 3132.1a Ed.
- Jämsä, S., Viitaniemi, P. (2001). Heat treatment of wood-better durability without chemical. In: Rapp AO (ed.) Review on heat treatments of wood. Hamburg BFH, pp 19-24.

- Kamdem, D., P. Pizzi, A. Jermannaud, A. (2002). Durability of heat-treated wood. *Holz Roh Werkst* 60:1-6.
- Kibblewhite, R., P. Johnson, B., I. Shelbourne, C., J. (2000<sup>a</sup>). Kraft pulp qualities of *Eucalyptus nitens*, *E. Globulus*, and *E. Maidenii*, at ages 8 and 11 years. *New Zealand Journal of Forestry Science*, v. 30 (3): 447-457.
- Kibblewhite, R., P. Riddell, M., J. Shelbourne, C., J. A. (2000<sup>b</sup>). Variations in wood, Kraft fibre, and handsheet properties among 29 trees of *Eucalyptus regnans*, and comparison with *E. nitens* and *E. fastigata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*, v. 30 (3): 458-474.
- Kilbblewhite, R., P. Johnson, B., I. y Ashelbourne, C., J. A. (2001). Kraft pulp qualities of *Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus maidennii*, at ages 8 and 11 years. *New Zeland Journal of Forestry Science*. 30(3): 447-457.
- Korkut, D., S. Guller, B. (2008). The effects of heat treatment on physical properties and surface roughness of red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) wood. *Bioresorce Technol*; 99(8):2846–51.
- Korkut, S. (2008). The effects of heat treatment on some technological properties in Uludag fir (*Abies bornmuellerinana* Mattf.) Wood. *Building and environment*. 422-428.
- Korkut, S. (2012). Performance of three thermally treated tropical Wood species commonly used in Turkey. *Industrial Crops and Products*. 355 – 362.
- Korkut, S. Samil, M. Sevim, D. Gurleyen, T. (2008). The effects of heat treatment on technological properties in Red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) Wood. *Bioresorce Technology*. 1538-1543.
- Korkut, S., Akgul, M., Dundar, T. (2008). The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood. *Bioresource Technology*. 1861-1868.
- Lachemet, J., Younsi, A., Kocaefe, R. (2011). 3d-Transient modeling of heat and mass transfer during heat treatment of wood. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 717-722.
- Lanchas, H., A. (2011). Madera termotratada usos y aplicaciones En: Seminario sobre la utilización de madera termotratada. Universidad Michoacana, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Morelia, Michoacán., México. pp. 2 – 24.
- López, P. Fuentes, S. Borja de la R. Honorato, S. (2003). Anatomical, Physical and Mechanical Characteristics of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh Wood from “Ing. Mario Ávila” Plantación en Texcoco, México. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco. México.

- Mamleev, V. Bourbigot, S. Le Bras M, Yvon J. (2009). The facts and hypotheses relating to the phenomenological model of cellulose pyrolysis. Interdependence of the steps. *J Anal Appl Pyrolysis* 84:1-17.
- Mazela, B. Zakrzewski, R. Grzes Kowiak, W. Cofta, G. and Bartkowiak, M. (2004). Resistance of thermally modified wood to basidiomycetes,” *Wood Technol.* 7(1), 253-262.
- Mburu, F., Dumarcay, S., Bocquet, J., Petrissans, M., Gérardin, P. (2008). Effect of chemical modifications caused by heat treatment on mechanical properties of *Grevillea robusta* Wood. *Polymer Degradation and Stability.* 401-405.
- Metsä-Kortelainen, S. Anitikainen, T. Viitaniemi, P. (2005). The water absorption of sapwood and heartwood of *Scots pines* and *Norway spruce* heat-treated at 170, 190, 210 and 230 °C. *Holz Roh-Werkst.* 64 (3), 192–197.
- Muñoz, F. Bellerín, A. Gacitúa, W. (2013). Variability of physical, morphological and thermal properties of *Eucalyptus nitens* bark fiber. *Maderas Ciencia y Tecnología.* 15(1): 17-30.
- Muñoz, F. Sáenz, R. Orozco, G. Benavides, S. y Prieto, J. (2010). Evaluación de plantaciones forestales comerciales en el trópico seco del estado de Michoacán. Folleto Técnico Núm. 21. SAGARPA. INIFAP. CIRPAC. Campo Experimental Uruapan, Michoacán, México. 54 p.
- Oliveira, S. Freitas, C. (1970). Eucaliptos da Namaacha. Universidade de Lourenc, o Marques. Separata da Revista de Ciências Agronómicas 3, Série B, pp. 1–230.
- Órfao, J. Antunes, F. Figueiredo, J. (1999). Pyrolysis kinetics of lignocellulosic material—three independent reaction model. *Fuel* 78:349-358.
- Peláez-Samaniego, M. Yadama, V. Lower, E. Espinoza-Herrera, R. (2013). A review of Wood thermal pretreatments to improve wood composite properties. *Wood Sci Technol.* 47:1285-1319.
- Pirralho, M. Flores, D. Sousa, V. Quilhó, T. Knapic, S. Pereira, H. (2014). Evaluation on paper making potential of nine *Eucalyptus* species based on Wood anatomical features. *Industrial Crops and Products.* 327-334.
- Priadi, T. Hiziroglu, S. (2013). Characterization of heat treated wood species. *Materials & Desing.* 575-582.
- Quilhó, T. Miranda, I. Pereira, H. (2006). Within-tree variation in wood fibre biometry and basic density of the urograndis eucalypt hybrid (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*). *IAWA Journal*, Vol. 27(3). 243-254.

- Repellin, V. Guyonnet, R. (2005). Evaluation of heat-treated wood swelling by differential scanning calorimetry in relation to chemical composition. *Holzforschung* 59(1):28-34.
- Rivero, M., J. y Moya, R., R. (2006). Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (Teca), proveniente de plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia. *Revista Forestal*. 3(9): 4-6.
- Rowell, R. Lange, S. McSweeny, J. Davis, M. (2002). Modification of Wood fiber using steam. In: Proceeding of the 6th Pacific RIM bio-based composites symposium and workshop of the chemical modification of cellulose, vol 2, Portland, OR.
- Rozas, C. Sánchez, P. (2005). Secado de *Eucalyptus nitens* y *globulus* y su aprovechamiento en blocks, pisos y muebles. *Maderas. Ciencia y Tecnología*. 7(02): 2-24.
- Salas, L. (2005). Impregnabilidad de la madera de *Eucalyptus nitens*. Tesis de Ingeniería. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Chile.
- Sánchez, A. (2012). Caracterización de la madera del nuevo híbrido *Eucalyptus grandis*, Hill ex Maiden x *Eucalyptus tereticornis*, Smith, su aptitud de usos en Argentina. Tesis doctoral. Ingeniería de Montes. Universidad de Valladolid. Argentina.
- Severo, E. Calonego, F. Sansígolo, C. (2012). Physical and chemical changes in juvenile and mature Woods of *Pinus elliottii* var. *elliottii* by thermal modification. *Wood Prod.* 70:741-747.
- Sharma, S. Rao, R. Shukla, S. Kumar, P. Sudheendra, R. Sujatha, M. Dubey, Y. (2005). Wood quality of coppiced *Eucalyptus tereticornis* for value addition. *IAWA J.* 26 (1), 137–147.
- Simpson, W. (1996). Method to estimate dry-kiln schedules and species groupings: Tropical and temperate hardwoods. Res. Pap. FPL–RP–548. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 57 p.
- Tribaud, S. Charrier, F. Malvestio, J. Charrier, B. Moubarik, A. Castéra, P. Grelier, S. (2012). *Wood Sci Technol.* 46:487-501.
- Unsal, O. Korkut, S. Atik, C. (2003). The effect of heat treatment on some properties and colour in eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehn.) wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2: 145–152.
- Valencia, B. y Cabrera P. (2007). Análisis Económico de Opciones Productivas para Plantaciones de *Eucalyptus nitens* en el Sur de Chile. *INFOR*. 3(1):2-20.
- Veenin, T. Fujita, M. Nobuchi, T. Siripatanadilok, S. (2005). Radial variations of anatomical characteristics and specific gravity in *Eucalyptus camaldulensis* clones. *IAWA J.* 26 (3), 353–361

- Vernois, M. (2001). Heat treatment of wood in France: state of the art. In: Rapp, A.O. (Ed.), Review on Heat Treatments of Wood. In: Special Seminar: Environmental Optimisation of Wood Protection, Antibes, France. Proceedings. Antibes, France: Cost Action E 22, pp. 39–46.
- Vovelle, C. Mellottee, H. (1982). Modelisation de la pyrolyse oxydante ou nonoxydante de bois ou de déchets végétaux à partir de leurs composants. In: Palz, W., Chartier, P. (Eds.), Energy from biomass, second ed. Applied Sciences, London, pp. 925–929.
- Waskett, P. Selmes, R. (2001). Opportunities for UK Grown Timber: Wood Modification State of the Art Review. Building Research Establishment. 203–343, p. 83.
- Weiland, J. Guyonnet, R. (2003). Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. Holz Roh Werkst 61:216-220.
- White, R. Dietenberger, M. (2001). Wood Products: thermal degradation and fire. In: Buschow, K. H. J., Cahn, R. W., Flemings, M.C., Ilshner, B., Kramer, E. J., Mahajan, S. (Edc.), Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Amsterdam.
- Yang, H. Yan, R. Chen, H. Lee, D. Zheng, C. (2007). Characteristic of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel 86, 1781 – 1788.

## 11. ANEXOS.

### 10.1. (ANOVA) absorción de agua 2 horas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	9	901.70	100.18	4.81	<.0002
Error	40	833.24	20.83		
Total	49	1734.94			

### 10.2. (ANOVA) absorción de agua 24 horas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	9	7641.05	849.00	5.33	<.0001
Error	40	6366.56	159.16423		
Total	49	14007.62			

### 10.3. (ANOVA) contracción radial 2 horas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	9	21.53	2.39	7.37	<.0001
Error	40	12.98	0.32		
Total	49	34.52			

### 10.4. (ANOVA) contracción radial 24 horas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	9	53.38	5.93	6.74	<.0001
Error	40	35.21	0.88		
Total	49	88.60			

### 10.5. (ANOVA) contracción tangencial 2 horas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	9	93.53	10.39	15.24	<.0001
Error	40	27.27	0.68		
Total	49	120.81			

### 10.6. (ANOVA) contracción tangencial 24 horas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	9	93.53	10.39	15.24	<.0001
Error	40	27.27	0.68		
Total	49	120.81			

10.7. (ANOVA) hinchamiento radial 2 horas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	9	26.45	2.93	6.76	<.0001
Error	40	17.38	0.43		
Total	49	43.83			

10.8. (ANOVA) hinchamiento radial 24 horas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	9	53.86	5.98	5.15	0.0001
Error	40	46.52	1.163		
Total	49	100.39			

10.9. (ANOVA) hinchamiento tangencial 2 horas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	9	30.52	3.39	3.58	0.0024
Error	40	37.90	0.94		
Total	49	68.43			

10.10. (ANOVA) hinchamiento tangencial 24 horas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	9	115.56	12.84	14.69	<.0001
Error	40	34.96	0.87		
Total	49	150.53			

10.11. (ANOVA) extracción de clavos lateral.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	9	13351.88	1483.54	3.95	0.0012
Error	39	14638.60	375.34		
Total	48	27990.48			

10.12. (ANOVA) extracción de clavos longitudinal.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr > F
Tratamientos	9	10519.50	1168.83	4.64	0.0003
Error	40	10067.00	251.67		
Total	49	20586.50			

### 10.13. Secuela de secado utilizada como guía.

NOMBRE CIENTÍFICO <i>Eucalyptus nitens</i>			HUMEDAD INICIAL 120%						DENSIDAD 0.59 g/cm <sup>3</sup>	
ESPESOR 8/4			NOMBRE COMÚN Eucalipto			HUMEDAD FINAL 12%				
ETAPA DE SECADO	ETAPA DE TEMPERATURA	ETAPA DE DEPRESION	C.H	T.B.S.	DEPRESION	T.B.H	H.R.	C.H.E.	DECLIVE O GRADIENTE DE SECADO	
			DE: > A:	°C	°C	°C	%	%		
1	1		40	40	37	2	36	90	19	2
2	1	1	40	35	37	2	36	86	17	2
3	1	2	35	30	37	3	35	80	15	2
4	2	3	30	25	43	6	38	70	12	3
5	3	4	25	20	49	14	35	40	6	4
6	4	5	20	15	54	22	32	22	5	4
7	5	6	15	12	65	25	41	23	4	4



### 10.1. Probetas termotratadas a diferentes temperaturas.



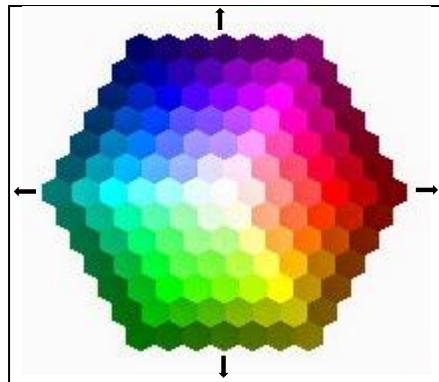
10.2. Probetas en inmersión en agua.

10.3. Cambio de coloración.

Valores de  $(-\Delta L)$  = las muestras se oscurecen.

Valores de  $(-\Delta b)$  = Cambio de color hacia azul.

Valores de  $(-\Delta a)$  = Cambio de color hacia verde.



Valores de  $(+\Delta a)$  = cambio de coloración hacia rojo.

Valores de  $(+\Delta b)$  = Cambio de color hacia Amarillo.

10.4. Colores que se alcanzan con el termotratamiento y que son similares a otras maderas.



La madera de *Eucalyptus nitens* termotratada alcanza colores similares a los de la Parota, el Tzalam y el Nogal.



La madera de *Eucalyptus nitens* termotratada a diferentes temperaturas.