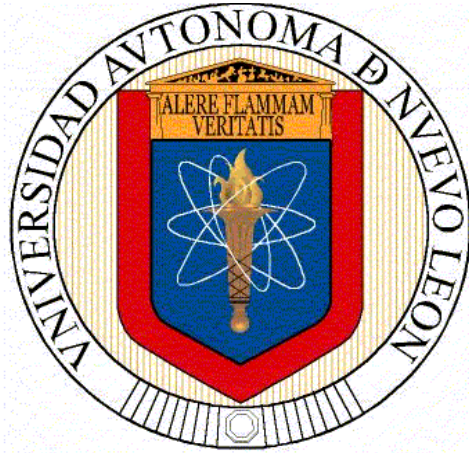


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**TESIS**

**APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS TERMICOS EN  
LA MADERA DE *Pinus durangensis* Martínez Y *Quercus  
sideroxyla* Humb. & Bonpl.**

**PRESENTA  
ALEJANDRO ANTONIO QUIÑONES VALLES.**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**NOVIEMBRE, 2015.**

## HOJA DE FIRMAS

APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS TERMICOS EN LA MADERA  
DE *Pinus durangensis* Martínez Y *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl.

TESIS DE MAESTRÍA

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

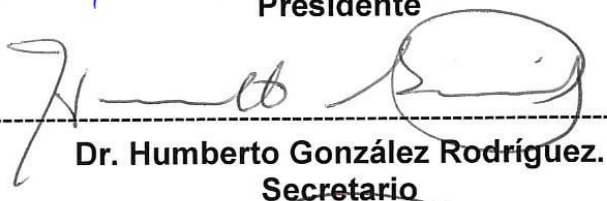
PRESENTA

ALEJANDRO ANTONIO QUIÑONES VALLES

Aprobación de Tesis



Dr. Fortunato Garza Ocañas.  
Presidente



Dr. Humberto González Rodríguez.  
Secretario



Dr. Horacio Villalón Mendoza.  
Asesor



M.C. Verónica Bustamante García.  
Asesor externo

NOVIEMBRE, 2015.

## **AGRADECIMIENTOS**

*El presente trabajo es un esfuerzo de las instituciones y personas, que de una u otra manera contribuyeron para la realización de esta investigación, estando presentes en todo momento, por lo cual agradezco infinitamente su apoyo y colaboración.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de maestría dentro de la Facultad de Ciencias Forestales UANL.*

*A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León por permitirme la oportunidad de formar parte del Programa de Maestría en Ciencias Forestales, en especial a su cuerpo académico de profesores-investigadores quienes con su experiencia y amplio conocimiento han sido pieza fundamental para mi formación profesional.*

*Al Dr. Artemio Carrillo Parra por su paciencia, consejos y su invaluable amistad, apoyándome en todo momento con su completa disponibilidad y apoyo, durante mi estadía en la carrera.*

*Al Dr. Fortunato Garza Ocañas por su apoyo, consejos, colaboración y revisiones en el presente trabajo.*

*Al Dr. Humberto González Rodríguez por su apoyo y colaboración en el presente trabajo.*

*A la M.C. Verónica Bustamante García que sin duda fue de gran ayuda en la elaboración de este trabajo el cual no hubiera sido posible sin su apoyo, consejos, revisiones y disponibilidad en todo momento.*

*A todos mis compañeros y amigos de la Facultad de Ciencias Forestales, los cuales estuvieron presentes en todo momento, en especial a mis amigos René Alejandro Martínez Barrón, Luis Fernando Bueno Luna y amigo y hermano Andrés Abraham Quiñones Valles, por hacer placentera mi estancia en mi formación académica.*

*También agradezco a todo el personal de la Facultad de Ciencias Forestales, en especial del área de posgrado a las secretarías Yesi Sánchez y Nubia Ramos por su disponibilidad y apoyo en este proceso.*

*Para todas las personas mencionadas y no mencionadas, que de alguna forma u otra contribuyeron en esta etapa de mi desarrollo profesional, les expreso mis más sincero agradecimiento.*

## **DEDICATORIAS**

*A mis padres José Guadalupe Quiñones Delgado y Silvia Patricia Valles Valdez, ya que con gran sacrificio se esforzaron para darme estudio. Los consejos que nunca olvidare, el apoyo y amor incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida.*

*A cada uno de mis hermanos Silvia, Alma, Andrés, Ángel, Albert y Arturo por su apoyo y consejos que me han dado.*

*A mi hija Alin Alexa Quiñones Hernández que es mi motivo de seguir adelante cada día y mi razón de ser.*

*A mi abuelita que en paz descanse la Sra. Silveria Delgado Medrano † por su amor y consejos que los llevo en el corazón.*

*A todas las personas que creyeron en mi, ya que con sus consejos y palabras de apoyo me brindaron fuerza para salir adelante.*

*A Dios por darme fuerza, voluntad, amor, sabiduría y salud para salir adelante en los momentos más difíciles.*

## TABLA DE CONTENIDO

HOJA DE FIRMAS .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
DEDICATORIAS .....	iv
TABLA DE CONTENIDO .....	v
INDICE DE FIGURAS .....	vii
INDICE DE CUADROS .....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT .....	xiv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
2.1 Importancia de la aplicación de los tratamientos térmicos.....	3
2.2 Desarrollo de los procesos de la modificación térmica.....	4
2.3 Trabajos realizados con tratamientos térmicos .....	6
3. JUSTIFICACIÓN .....	11
4. HIPOTESIS .....	11
5. OBJETIVOS.....	11
5.1. Objetivo general .....	11
5.2. Objetivos particulares.....	11
6. MATERIALES Y MÉTODOS .....	12

6.1 Características geográficas de lugar de origen de la madera .....	12
Clima .....	13
Precipitación.....	13
Edafología .....	14
Topografía .....	14
Hidrografía.....	14
Vegetación .....	15
Bosque de Pino .....	15
Bosque de Pino-Encino .....	15
6.2 Descripción de las especies .....	15
<i>Pinus durangensis</i> Martínez .....	15
<i>Quercus sideroxyla</i> Humb. & Bonpl.....	17
6.3 Tratamiento térmico .....	18
6.4 Propiedades físicas .....	19
6.5 Durabilidad ante hongos xilófagos. ....	22
Determinación de la pérdida de masa.....	24
Índices de durabilidad .....	25
6.6 Propiedades mecánicas .....	25
7. RESULTADOS.....	28
7.1 Propiedades físicas .....	28

7.2 Durabilidad ante hongos xilófagos .....	39
7.3 Propiedades mecánicas .....	46
8. DISCUSIÓN .....	54
8.1 Propiedades físicas .....	54
8.2 Durabilidad ante hongos xilófagos .....	54
8.3 Propiedades mecánicas .....	55
9. CONCLUSIONES .....	56
10. RECOMENDACIONES .....	58
11. LITERATURA CONSULTADA .....	58
ANEXO .....	64

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Localización del predio de colecta de la madera. ....	13
Figura 2. <i>Pinus durangensis</i> Martínez. ....	17
Figura 3. <i>Quercus sideroxylla</i> Humb & Bonpl. ....	18
Figura 4. Elaboración y acondicionamiento de probetas. ....	19
Figura 5. Medición de las probetas y aplicación del experimento. ....	20
Figura 6. Elaboración y acondicionamiento de probetas para el experimento de pérdida de masa. ....	23
Figura 7. Probetas de madera de <i>Pinus Durangensis</i> y <i>Quercus sideroxylla</i> con tratamiento térmico expuestas a hongos xilófagos de <i>Trametes versicolor</i> y <i>Coniophora puteana</i> después del término del experimento. ....	24

Figura 8. Maquina universal de pruebas mecánicas con manufactura japonesa de la marca SHIMADZU modelo AG-IC.....	26
Figura 9. Porcentaje de la madera de <i>Pinus durangensis</i> sometida a tratamientos térmicos de 180°C y 150°C en diferentes tiempos de residencia.	29
Figura 10. Porcentaje de hinchamiento radial de la madera de <i>Pinus durangensis</i> sometida a los tratamientos térmicos de 180°C y 150°C en diferentes tiempos de residencia. ....	30
Figura 11. Porcentaje de hinchamiento longitudinal de madera de <i>Pinus durangensis</i> sometida a los tratamientos térmicos de 180°C y 150°C en diferentes tiempos de residencia. ....	31
Figura 12. Porcentaje de contenido de humedad de madera de <i>Pinus durangensis</i> sometida a los tratamientos térmicos de 180°C y 150°C en diferentes tiempos de residencia. ....	32
Figura 13. Porcentaje de hinchamiento tangencial de madera de <i>Quercus sideroxyla</i> sometida a los tratamientos térmicos de 180°C y 150°C en diferentes tiempos de residencia.....	34
Figura 14. Porcentaje de hinchamiento radial de madera de <i>Quercus sideroxyla</i> sometida a los tratamientos térmicos de 180°C y 150°C en diferentes tiempos de residencia.....	35
Figura 15. Porcentaje de hinchamiento longitudinal de madera de <i>Quercus sideroxyla</i> sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° y 150 ° C en diferentes tiempos de residencia.....	36
Figura 16. Porcentaje de contenido de humedad de madera de <i>Quercus sideroxyla</i> sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° y 150 ° C en diferentes tiempos de residencia.....	37



Figura 17. Porcentaje de pérdida de masa en la madera de <i>Pinus durangensis</i> sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° y 150 ° C en diferentes tiempos de residencia y expuesta al hongo <i>Trametes versicolor</i> . .....	40
Figura 18. Porcentaje de pérdida de masa en la madera de <i>Pinus durangensis</i> sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° y 150 ° C en diferentes tiempos de residencia y expuesta al hongo <i>Coniophora puteana</i> . .....	41
Figura 19. Porcentaje de pérdida de masa en la madera <i>Quercus sideroxylla</i> sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° y 150 ° C en diferentes tiempos de residencia y expuesta al hongo <i>Trametes versicolor</i> . .....	42
Figura 20. Porcentaje de pérdida de masa en la madera <i>Quercus sideroxylla</i> sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° y 150 ° C en diferentes tiempos de residencia y expuesta al hongo <i>Coniophora puteana</i> . .....	43
Figura 21. Porcentaje de pérdida de masa en madera de <i>Fagus sylvatica</i> expuesta a hongos xilófagos <i>Trametes versicolor</i> y <i>Coniophora puteana</i> para validación del experimento.....	44
Figura 22. Resultado de MOE en la madera de <i>Pinus durangensis</i> expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.....	46
Figura 23. Resultado de MOR en la madera de <i>Pinus durangensis</i> expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.....	47
Figura 24. Resultado de compresión en la madera de <i>Pinus durangensis</i> expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.....	48
Figura 25. Resultado de la prueba de dureza Janka en la madera de <i>Pinus durangensis</i> expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.....	49

Figura 26. Resultado de MOE en la madera de <i>Q. sideroxyla</i> expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.....	50
Figura 27. Resultado de MOR en la madera de <i>Q. sideroxyla</i> expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.....	51
Figura 28. Resultado de compresión en la madera de <i>Q. sideroxyla</i> expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.....	52
Figura 29. Resultado de la prueba de dureza Janka en la madera de <i>Quercus sideroxyla</i> expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.....	53

## **INDICE DE CUADROS**

Cuadro 1. Clasificación del hinchamiento de la madera. ....	21
Cuadro 2. Clasificación de la madera de acuerdo a su anisotropía.....	22
Cuadro 3. Índices de durabilidad según la UNE EN350-1 (1995).....	25
Cuadro 4. Clasificación y resultados de hinchamiento y coeficiente de anisotropía de la madera de <i>Pinus durangensis</i> tratada térmicamente a temperaturas de 180°C y 150°C y tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos. ....	33
Cuadro 5. Clasificación y resultados de hinchamiento y coeficiente de anisotropía de la madera de <i>Quercus sideroxyla</i> tratada térmicamente a temperaturas de 180 ° C y 150 ° C y tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos. ....	38

Cuadro 6. Clasificación y resultados de porcentaje de pérdida de masa en la madera de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla* con aplicación de tratamientos térmicos expuestos a hongos xilófagos a temperaturas de 180 ° C y 150 ° C y tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos..... 45

Cuadro 7. Resultado del análisis de varianza factorial de hinchamiento de la madera de *P. durangensis* en dirección tangencial, radial y longitudinal, y contenido de humedad sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° C y 150 ° C y a los tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos. .... 64

. Cuadro 8. Resultado del análisis de varianza factorial de hinchamiento de la madera de *Quercus sideroxyla* en dirección tangencial, radial y longitudinal, y contenido de humedad sometida a los tratamientos térmicos de 180°C y 150°C y los tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos..... 64

Cuadro 9. Resultado del análisis de varianza factorial de pérdida de masa en la madera de *P. durangensis* y *Q. sideroxyla* expuesta a hongos xilófagos con tratamientos térmicos de 180 ° C y 150 ° C y a los tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos..... 64

Cuadro 10. Resultado del análisis de varianza factorial de MOE, MOR, compresión y dureza Janka en la madera de *Q. sideroxyla* expuesta a tratamiento térmico de 180 ° C y 150 ° C y a los tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos..... 65

## RESUMEN

Con la finalidad de incrementar la estabilidad dimensional en la madera de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla* se aplicaron 180 ° C y 150 ° C a 360 probetas de 20 x 20 x 10 mm para determinar el cambio dimensional de acuerdo a la norma DIN 52 184. Las temperaturas se aplicaron en tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos, más un tratamiento testigo al que no se aplicó temperatura. El tratamiento que mostro mayor estabilidad dimensional para ambas especies fue a un tiempo de residencia de 150 minutos y temperatura de 180 ° C. La madera de *P. durangensis* mostró hinchamiento de 1.99 % y 3.1 % en las direcciones radial y tangencial, respectivamente. Éstas están clasificadas como contracción muy pequeña de acuerdo a la norma DIN 52 184. La madera de *Q. sideroxyla* presentó hinchamientos de 1.99 % y 7.48 % en las direcciones radial y tangencial, respectivamente. Estos hinchamientos son clasificados como muy pequeños y moderados. La madera de *P. durangensis* se clasifica como estable de acuerdo a su coeficiente de anisotropía de 1.56 y la madera de *Q. sideroxyla* como muy inestable con un coeficiente de 3.75 esto, al ser sometidas a los tratamientos de 180 ° C y 150 minutos de residencia, de acuerdo a la norma DIN 52 184.

Se realizo un estudio para evaluar la durabilidad de la madera de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla* frente hongos xilófagos. Se aplicó un tratamiento térmico de 180 ° C y 150 ° C a 432 probetas de 30 x 10 x 5 mm en sentido longitudinal, radial y tangencial respectivamente, para determinar la durabilidad de acuerdo a la norma EN 113. Las probetas fueron expuestas a hongos xilófagos de *Trametes versicolor* y *Coniophora puteana*, dejando probetas testigo sin tratamiento de las especies de *Pinus* y *Quercus*, también se utilizo la especie *Fagus sylvatica* como indicador de pérdida de masa para validar el experimento. El tratamiento aplicado a la madera de *P. durangensis* y expuesto al hongo *Trametes versicolor* muestra pérdida de masa que varía desde 4.01 y 8.38 % y clasificada como durabilidad 1. La madera de *Pinus durangensis* expuesta al hongo *Coniophora puteana* muestra valores más

variables que van desde 6.82 a 21.49% y la madera es clasificada como 1 excepto para el tratamiento de 150°C y tiempo de 30 minutos. La madera de *Quercus sideroxyla* con tratamiento térmico expuesta al hongo *Trametes versicolor* muestra pérdida de masa de 17.01 a 20.24%, mayor que el control de 11.91%, en ambos tratamientos y en todos los tiempos de residencia, clasificada como durabilidad 2 excepto para el control que es durabilidad 1. La madera de *Quercus sideroxyla* expuesta al hongo *Coniophora puteana* mostro valores de 2.43 y 8.22% en pérdida de masa , los cuales no superan el control de 11.91% y es clasificada como 1. Los análisis de varianza no muestran diferencias significativas ( $p>0.05$ ) en ninguno de los tratamientos aplicados.

Se realizo un estudio para evaluar las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla* sometidas a tratamientos térmicos de 150 y 180°C en diferentes tiempos de residencia los cuales fueron 30, 60, 90, 120 y 150 minutos. Los resultados obtenidos de análisis de varianza factoriales indican para el MOE y MOR no se ven afectados por el tratamiento más sin embargo hay variaciones para ambas especies sin observar diferencias significativas ( $p>0.05$ ), en las pruebas de compresión se observo un efecto positivo en las dos especies estudiadas mostrando diferencias significativas ( $p<0.05$ ) y para las pruebas de dureza Janka se observo una disminución en los valores de la especie de *Quercus sideroxyla* mostrando diferencias significativas ( $p<0.05$ ) en la interacción Tiempo\*Temperatura, para la especie de *Pinus durangensis* se observo un aumento de los valores encontrando diferencias significativas ( $p<0.05$ ) en las variables temperatura y tiempo.

## ABSTRACT

In order to increase the dimensional stability of wood of *Pinus durangensis* and *Quercus sideroxyla*, temperatures of 180 ° C and 150 ° C were applied to 360 specimens of 20 x 20 x 10 mm. The later was made to determine the dimensional change according to DIN 52 184. The temperatures applied in residence times of 30, 60, 90, 120 and 150 minutes, and a control treatment without applying temperature. The treatment that showed a greater dimensional stability for both species was that with a residence time of 150 minutes at 180 ° C. *P. durangensis* wood showed swelling of 1.99% and 3.1% in the radial and tangential directions, respectively. These swellings are classified as very small and moderate *P. durangensis* wood is classified as stable according to their coefficient of 1.56 and anisotropy of wood *Q. sideroxyla* as very unstable with a coefficient of 3.75 when subjected to a treatment of 180 ° C and 150 minutes of residence, according to DIN 52 184.

A study was conducted to evaluate the durability of the wood of *Pinus durangensis* and *Quercus sideroxyla* against wood decaying fungi, heat treatment at 180 ° C and 150 ° C was applied to 432 specimens of 30 x 10 x 5 mm in the longitudinal, radial and tangential respectively, this to determine the durability according to EN 113. The specimens were exposed to the wood decaying fungi *Trametes versicolor* and *Coniophora puteana*, leaving untreated control specimens of species of *Pinus* and *Quercus*, *Fagus sylvatica* species was also used as an indicator of mass loss to validate the experiment. The treatment applied to the wood of *P. durangensis* and exposed to the fungus *Trametes versicolor* showed a mass loss ranging from 4.01 and 8.38% and one classified as durable. Wood *Pinus durangensis* exposed to fungus *Coniophora puteana* variables showed values ranging from 6.82 to 21.49% and the wood is classified as 1 except for the treatment of 150 ° C and 30 minutes. The wood of *Quercus sideroxyla* with heat treatment exposed to the fungus *Trametes versicolor* showed a mass loss of 17.01 to 20.24%, higher than the control of 11.91% in both treatments and in all times of residence, classified as durability 2

except for control 1 which it is durability. The wood of *Quercus sideroxyla* exposed to the fungus *Coniophora puteana* showed mass loss values of 2.43 and 8.22%, which does not exceed the control 11.91% and is rated as 1. The analysis of variance showed no significant differences ( $p > 0.05$ ) in any of the treatments applied.

A study was conducted to evaluate the mechanical properties of the wood of *Pinus durangensis* and *Quercus sideroxyla* subjected to heat treatment of 150 to 180 ° C in different residence times which were 30, 60, 90, 120 and 150 minutes. The results of factor analysis of variance indicated for the MOE and MOR are not affected by the treatment but there are more variations for both species without observing significant differences ( $p > 0.05$ ). In compression tests positive effect is observed in both species studied showed significant differences ( $p < 0.05$ ) and Janka hardness tests was observed a decrease in the values of the species *Quercus sideroxyla* showing significant differences ( $p < 0.05$ ) in the interaction Time \* Temperature, for the species *Pinus durangensis* increased values found significant differences ( $p < 0.05$ ) in the variables temperature and time was observed.

# 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la industria maderera en México cuenta con dos géneros aprovechados principalmente, los cuales son el pino con 4.6 millones de m<sup>3</sup> rollo aproximadamente con un 79% de la producción total del país. El encino por su parte contribuye con 0.5 millones de m<sup>3</sup> rollo cerca del 9% de la producción total, colocando a estos dos géneros como los más importantes en la producción maderable del país (SEMARNAT, 2014).

Los bosques de pino-encino de México son una de las principales fuentes de materia prima para la industria maderera del país, en particular la madera de pino constituye el principal producto forestal obtenido de estas áreas. No obstante la mayoría de los aprovechamientos forestales se llevan a cabo a nivel genérico, a pesar de que en México existen aproximadamente 52 especies de pino y en el estado de Durango 20, cada especie tiene características biológicas, ecológicas y físicas propias, aun es incipiente la diferenciación que se hace para manejarlas y aprovecharlas por especie (García y González, 1998).

La durabilidad natural de la madera se define como la capacidad que ésta presenta para resistir la acción del intemperismo y el ataque de organismos biológicos que la deterioran, tales como bacterias, algas, hongos, insectos y perforadores marinos, para estudiar, evaluar y clasificar la durabilidad natural de la madera de las especies forestales susceptibles de aprovechamiento, es necesario llevar a cabo pruebas específicas que proporcionen datos adecuados sobre el deterioro de la madera. (Honorato *et al.*, 2001).

Se han demostrado en múltiples experimentos que la durabilidad de la madera contra los hongos xilófagos se puede mejorar considerablemente mediante la modificación térmica de la madera (Militz, 2008). El conocimiento sobre la resistencia natural de la madera al ataque de organismos xilófagos, se torna en un requisito muy importante para su correcta utilización además de aportar información valiosa para proponer acciones encaminadas a disminuir su descomposición (Silva *et al.*, 2004).



La durabilidad natural de la madera es la resistencia que presenta la madera al ser degradada por insectos, microorganismos y otros factores abióticos, se considera que la durabilidad de la madera depende de la conjunción de algunas propiedades intrínsecas que mantienen bajo el contenido de humedad y la presencia de algunas sustancias químicas que impiden el desarrollo de organismos (Eaton & Hale, 1993; Råberg *et al.*, 2005).

El contenido de humedad y la densidad son quizás las propiedades físicas de la madera de mayor importancia, cambios en el contenido de humedad de la madera producen cambios dimensionales, la pérdida de humedad en valores menores al punto de saturación de la fibra produce contracciones, en forma contraria ganancia de humedad a valores hasta el punto de saturación de la fibra produce hinchamientos, adicionalmente éstos cambios de humedad modifica el peso específico y por consecuencia la densidad de la madera (Muñoz y Moreno, 2013).

El tratamiento térmico, como un método de modificación de madera, sirve para mejorar las propiedades de calidad natural de la madera, como la estabilidad dimensional y resistencia a la biodegradación y equipar el material de madera con nuevas propiedades (Mazela *et al.*, 2004).

Los tratamientos térmicos actualmente son una alternativa a los tratamientos químicos de preservación de la madera, por ser ambientalmente más amigables, mejorando en cierta medida la durabilidad del material (Kocaefe *et al.*, 2006). La aplicación de tratamientos térmicos a altas temperaturas puede mejorar la resistencia a la degradación ocasionada por ataque de agentes xilófagos (Juacida y Quintanar, 1992).

Se ha encontrado que la modificación de estas especies maderables también es difícil, y muestran una pérdida de peso relativamente alta. En general, la pérdida de resistencia mecánica es dependiente de las condiciones de procesamiento y está dictada predominantemente por la temperatura de tratamiento en combinación con la especie en cuestión (Militz 2008). Los resultados indican que el desempeño mecánico está en función de la temperatura de tratamiento, la tasa de incremento de

la temperatura, el medio de la conducción del calor, la especie maderable, el contenido inicial de humedad, el tamaño de los elementos a modificarse y no todas las propiedades mecánicas se ven afectadas en la misma magnitud (Hill 2006; Mouras *et al.*, 2002).

El presente trabajo de investigación busca determinar el efecto del tratamiento térmico a diferentes tiempos de residencia en el hinchamiento, coeficiente de anisotropía, pérdida de masa ante la acción degradadora de hongos xilófagos de *Trametes versicolor* y *Coniophora puteana* y pruebas mecánicas (MOE, MOR, Dureza y Compresión) de la madera de *P. durangensis* Martínez y *Q. sideroxyla* Humb. & Bonpl como método para incrementar la durabilidad natural e incrementar su valor económico como producto para la construcción.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1 Importancia de la aplicación de los tratamientos térmicos.**

La aplicación del calor para modificar las propiedades de la madera no es una técnica nueva. Desde 1920, Tiemann demostró en el laboratorio que al secar la madera a altas temperaturas, se disminuía el CH en equilibrio, y consecuentemente los cambios dimensionales ante variaciones en las condiciones ambientales de humedad relativa. Diversos estudios se llevaron a cabo a lo largo del siglo XX en Alemania primero por Kollmann, y después por otros investigadores como Burmester, Rusche y Giebeler, y también en los Estados Unidos, principalmente Stamm y Seborg, todos ellos con resultados prometedores, pero sin que hubiera interés para desplegar comercialmente cualquiera de las tecnologías desarrolladas (Hill 2006).

El tratamiento térmico en maderas duras y suaves, se ha divulgado para mejorar algunas de sus características tales como su durabilidad biológica y su estabilidad dimensional, este proceso evita el uso de conservantes en la madera, que constituyen una alternativa atractiva "no biocida" a tratamientos de conservación clásica (Esteves *et al.*, 2008).

Aunque es un mercado relativamente pequeño todavía, la madera modificada térmicamente ha tenido un crecimiento explosivo especialmente en Europa. La madera modificada térmicamente tiene amplias perspectivas de uso en el largo plazo (Bluth 2010). Aunque los niveles de producción de madera térmicamente modificada son aún reducidos en comparación con el volumen total de madera procesada en el mundo, el incremento en el volumen y en la cantidad de productos que se están elaborando con este tipo de madera es constante, junto con precios cada vez más atractivos; al mejorar la calidad de las maderas modificadas, surgen nuevas aplicaciones y, con ello, la mayor aceptación de los consumidores (Bluth 2010).

## **2.2 Desarrollo de los procesos de la modificación térmica**

Los esfuerzos recientes en el tratamiento térmico de la madera han llevado al desarrollo de varios tratamientos, procesos y materiales producidos a través de tratamientos térmicos los cuales se han introducido en el mercado europeo.

De acuerdo con Millitz, (2008) estas son algunas de las principales tecnologías de modificación térmica de la madera:

- Madera Termo tratada Plato (PLATO BV, Holanda).

Este proceso fue inventado en la década de los 80 por Shell (Ruyter 1989) y ahora es explotado por Plato Company en Holanda. PLATO utiliza una estrategia de combinar una termohidrolisis con una etapa de curado en seco. En el primer paso del proceso, la madera verde o madera secada al aire se trata a temperaturas de entre 160 ° C - 190 ° C bajo sobrepresión (presión supraatmosférica). El tiempo de proceso depende de la especie de madera, del espesor, la forma de la madera, etc. y utiliza un paso inicial de termólisis (4-5 horas), seguido de una etapa de secado intermedio (3-5 días) y un acondicionamiento final (14-16 horas).

- Proceso Retification.

Este proceso fue desarrollado por la Escuela de Ingeniería de Saint-Etienne (Francia) Vernois (2001) y transferido a nivel industrial por Four et Brûleurs REY. La compañía New Option Wood explota el proceso, el cual comienza con la madera relativamente

seca (aprox. 12%) y se calienta hasta 200 °C - 240 ° C en una atmósfera de nitrógeno (por debajo de 2% de oxígeno) (Duchez, 1998).

- Bois Perdure.

Este procedimiento fue desarrollado por BCI-MBS (Francia). El proceso comienza con la madera en verde, posteriormente se produce un rápido proceso de secado y calentamiento hasta 200 °C - 240 °C bajo atmósfera de vapor que procede del agua de la propia madera.

- OHT (Proceso de termo tratado en aceite)

Desarrollado por la compañía Menz Holz, Alemania (Vernois, 2004). El proceso se lleva a cabo en un recipiente de proceso cerrado. Después de cargar el tanque con la madera, el aceite se bombea desde el tanque de almacenamiento al recipiente de proceso. El aceite caliente se mantiene a altas temperaturas (entre 180 °C y 260 °C) y circula alrededor de la madera. Antes de la descarga el aceite caliente se bombea de nuevo al recipiente de almacenamiento. Para obtener diferentes productos se pueden utilizar diferentes temperaturas.

- Proceso ThermoWood (Stora, Finforest, Finlandia)

Un proceso de modificación térmica a escala industrial se ha desarrollado en Finlandia, bajo el nombre comercial de ThermoWood. Hoy en día, el proceso se ha licenciado a los miembros de la Asociación Finlandesa ThermoWood. El proceso ThermoWood consiste en tres etapas. En la primera etapa, la madera se seca en una estufa de secado de alta temperatura. La temperatura se incrementa gradualmente hasta los 130°C, y en este lapso se lleva a cabo el secado a alta temperatura. En la segunda etapa, la temperatura se incrementa hasta 185 – 230°C. La temperatura se mantiene allí por 2 a 3 h, dependiendo de la aplicación final del material. La tercera etapa es la del enfriamiento y acondicionamiento. Esta etapa final reduce la temperatura usando un sistema de aspersores de agua, y cuando la temperatura llega a 80-90°C, la madera se rehumedece y acondiciona para llevarla a un contenido de humedad de entre 4 y 6%. La temperatura interna de la madera se

utiliza para regular el incremento de temperatura en la estufa. La madera utilizada puede ser recién aserrada o secada en estufa.

- Westwood (EEUU)

El Sistema de Westwood permite ajustar el proceso a la especie, tamaño de la madera, contenido de humedad inicial, composición y la geometría de las piezas a tratar. Este proceso permite obtener un resultado predecible, lo que es especialmente importante para el tratamiento de maderas duras. En el tratamiento la temperatura aire se eleva a unos 210-230°C y se mantiene durante unas 2-3 horas. Aunque la tecnología fue diseñada específicamente para las maderas duras, también ha sido empleada con éxito en maderas blandas.

- Tratamiento Stellac (Finlandia)

El tratamiento Stellac es similar al tratamiento ThermoWood, y se corre en condiciones ambientales. El proceso se lleva a cabo en una estufa de secado de acero inoxidable hermética. Durante el primer paso, la temperatura se incrementa hasta los 100°C, y le sigue una fase de acondicionamiento. El tratamiento térmico en sí toma lugar a temperaturas de hasta 250 °C por varias horas. El tiempo total del proceso es de cerca de 24 h.

### **2.3 Trabajos realizados con tratamientos térmicos**

El tratamiento térmico en la madera induce a modificaciones químicas principal de la pared celular de la componentes madera. La red de la lignina es modificada (Alen *et al.* 2002; Tjeerdsma y Militz, 2005), la relación entre la celulosa es cambiante, cristalina y amorfa, las hemicelulosas están fuertemente degradadas, esto conduce a la formación de material carbonoso dentro de la madera (Nguila *et al.* 2007).

Estos cambios químicos modifican el color de la madera (Mitsui *et al.* 2001; Bekhta y Niemz, 2003) y confieren propiedades a un nuevo material, como estabilidad dimensional mejorada (Mouras *et al.* 2002; Ayadi *et al.* 2002), resistencia fungicida, menor afinidad para el agua debido al aumento de la hidrofobicidad superficial en la madera (Kocaeffe *et al.* 2008).

El tratamiento térmico reduce ciertas propiedades mecánicas, pero la estabilidad dimensional y la durabilidad biológica de la madera aumenta con el tratamiento térmico. Además, el tratamiento da resultado en cambios favorables en las propiedades físicas de la madera, tales como la reducción de la contracción y el hinchamiento, baja el contenido de humedad de equilibrio, una mayor resistencia a la intemperie, un color decorativo oscuro y mejor durabilidad (Yildiz *et al.*, 2006).

El tratamiento térmico que realizaron (Chaouch *et al.*, 2010) en dos de especies de coníferas (pinos y abetos de plata) y tres especies de madera (álamo, haya y fresno) a 230 ° C bajo nitrógeno durante tiempos diferentes para llegar a pérdidas de masa de 5, 10 y 15%. Los especímenes tratados térmicamente fueron expuestos a descomposición por hongos utilizando el hongo de pudrición marrón *Poria placenta* para la degradación determinada, así como la composición elemental de madera inicial. El estudio mostro una buena correlación entre la pérdida de masa, la composición elemental y la durabilidad ante hongos, lo que confirma la posibilidad de predecir la decadencia durabilidad de maderas tratadas con calor sobre la base de su contenido de carbono.

En otro estudio el tratamiento térmico con *Pinus nigra* a 120° C, 150° C, y 180° C durante 2, 6, y 10 h en una pequeña unidad de calentamiento controlada (Gunduz *et al.*, 2008) evaluaron las propiedades físicas y tecnológicas. Sobre la base de las conclusiones de este estudio, los resultados mostraron diferencias significativas en la densidad, hinchamiento, resistencia a la compresión, dureza Janka y valores de rugosidad superficial disminuyó con el aumento de la temperatura y tiempo de tratamiento.

Una investigación realizada por (Mazela *et al.*, 2004) en *Pinus sylvestris L.* sometida a un tratamiento térmico e hidrotermal con el objetivo de determinar la resistencia de la madera expuesta a hongos. Las muestras de la madera fueron expuestas a temperaturas de 160, 190 y 220 ° C durante 6 y 24 horas. Los hongos utilizados en el ensayo fueron: *Coniophora puteana*, *Gleophyllum trabeum*, *Poria placenta* y *Coriolus versicolor*. Los resultados obtenidos mostraron que la madera modificada en

la atmósfera de vapor de agua a la temperatura de 220 ° C durante 24 horas se caracterizó por la resistencia más alta contra los organismos seleccionados.

Un experimento realizado por (Kesik *et al.*, 2014) en cuatro especies de madera, las cuales fueron algarrobo negro (*Robinia pseudoacacia L.*), aliso común (*Alnus glutinosa L.*), enebro occidental (*Juniperus oxycedrus L.*) y ciruelo (*Prunus domestica L.*). Fueron expuestas a niveles de temperatura de 130 y 160 ° C para 3 y 7 horas, donde se estudiaron el hinchamiento, calidad de superficie y dureza Janka. Los resultados muestran mejor estabilidad dimensional en las cuatro especies, mayor calidad de barrido en la superficie y en las pruebas de dureza actúa de forma negativa mayormente en la temperatura de 160 ° C y tiempo de 7 horas.

Por su parte (Bekhta y Niemz, 2003) realizaron un estudio donde se investigó el efecto del tratamiento térmico en las propiedades mecánicas, estabilidad dimensional y el color de abeto (*Picea abies*). Los especímenes de la madera fueron acondicionadas a diferentes humedades relativas (50, 65, 80 y 95%) sometidos a tratamiento térmico a 200 ° C durante 2, 4, 8, 10 y 24 h y en 100, 150 y 200 ° C durante 24 h. Se midieron los cambios de color en el sistema de color Minolta Croma-Meter CR-300. Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad se determina de acuerdo con DIN 52186. Los resultados muestran principalmente, en el oscurecimiento de los tejidos de madera, la mejora de la estabilidad dimensional y la reducción de las propiedades mecánicas de la madera.

En el presente trabajo, (Medina *et al.*, 2013) utilizaron probetas de madera de *Pinus elliotii var. elliotii* que fueron sometidas a tres temperaturas distintas (130; 150 y 170 °C) durante tres tiempos diferentes (10 horas; 20 horas; 30 horas). La variable respuesta fue el hinchamiento volumétrico. El resultado obtenido sugiere que, en las condiciones del experimento, tanto la temperatura como el tiempo modificaron el grado de hinchamiento volumétrico. Al aumentar la temperatura y el tiempo, se observó una mejora en la estabilidad dimensional.

En esta línea, el trabajo (Hermoso *et al.*, 2013) se centran en el estudio de las propiedades mecánicas por métodos destructivos y no destructivos de la madera de

*Pinus radiata* proveniente del País Vasco tras ser tratada térmicamente a 210°C, a 190°C y sin tratar. Los resultados demuestran que estos tratamientos afectan a la resistencia de la madera incrementalmente a la temperatura a la que hayan sido expuestas, no así a su rigidez.

En este estudio (Yildiz *et al.*, 2006) se examinaron los efectos del tratamiento térmico sobre resistencia a la compresión de madera de abeto (*Picea orientalis*) y los cambios en la estructura química de la madera tratada se determinaron mediante el análisis de contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina. El tratamiento térmico se aplicó sobre las muestras de ensayo en un horno a cuatro temperaturas diferentes (130, 150, 180 y 200 ° C) y tres tiempos diferentes (2, 6 y 10 h) a presión atmosférica. Los resultados indican que los efectos del tratamiento térmico sobre los valores de compresión generalmente mostraron una disminución con el aumento de la duración y de la temperatura. Se observó que las hemicelulosas fueron los componentes de células de madera más degradado por el tratamiento térmico.

El objetivo del estudio de (Salca y Hiziroglu, 2014) fue evaluar el efecto del tratamiento térmico sobre la rugosidad superficial y la dureza de cuatro especies de madera, el aliso negro (*Alnus glutinosa L.*), el roble rojo (*Quercus falcata Michx.*), el pino del sur (*Pinus taeda L.*) y álamo amarillo (*Liriodendron tulipifera*). Las muestras fueron expuestas al calor esquemas de tratamiento que tienen dos niveles de temperatura y la exposición de 120 y 190 ° C durante 3 y 6 h, respectivamente. La estructura anatómica de las muestras también se observó por microscopio electrónico de barrido y se determinó algunos daños de la pared celular debido a tratamiento térmico. Los resultados de este estudio demostraron que el tratamiento térmico resultó en efecto adverso sobre características de dureza de las muestras. Por otro lado, la calidad superficial de las muestras de todas las especies se mejoró como resultado de tratamiento térmico.

El estudio de (Sanzana, 2011) fue determinar el efecto en una termohidrólisis a una temperatura máxima de 160° C y tiempos de 1, 3 y 5 horas, a través de la pérdida de masa de madera de *Pinus radiata* contra el ataque de hongos xilófagos. El grado de deterioro de las muestras de madera se evaluó según la norma ASTM 2017-05.



Después de dieciséis semanas los mejores resultados fueron a las maderas tratadas por 5 horas a 160 ° C; en *Gloeophyllum trabeum* produjo una pérdida de la masa promedio de 10%, y en el hongo *Poria placenta* la pérdida de masa un 6%. Los cambios producidos por la termohidrólisis de las propiedades de la madera de *Pinus radiata* mejora el comportamiento de la madera frente a hongos degradadores de la madera.

En la investigación que realizaron (Tomak *et al.*, 2014), tuvo como objetivo investigar los cambios en el contenido de humedad, color, rugosidad de la superficie, resistencia a la compresión paralela a la fibra, módulo de ruptura y el módulo de elasticidad con tratamiento térmico, en especies de la madera de cenizo (*Fraxinus excelsior L.*), abeto (*Picea orientalis L.*), iroko (*Chlorophora excelsa*), y pino silvestre (*Pinus sylvestris L.*), durante meteorización natural para dos años. Se encontró contenido de humedad de las muestras tratadas térmicamente es menor que la de las muestras de control para todos los períodos de exposición. Tratamiento térmico cambió significativamente el color original de la madera, así como los factores de la intemperie. Factores de meteorización naturales causaron una disminución de todas las propiedades de resistencia. La tasa de reducción en las propiedades de resistencia de muestras tratadas térmicamente era relativamente menor que la de las muestras de control. El tratamiento térmico también mejora la estabilidad del color y la calidad de la superficie de las muestras después de la intemperie.

En esta investigación (Ortega, 2011), evaluó la modificación térmica de la madera de *Hevea brasiliensis* a temperaturas de 230 ° C por 4 y 8 horas. Donde se vio incrementada la resistencia a la biodegradación y mejora de estabilidad dimensional. Lo anterior, a expensas de la reducción en algunas propiedades mecánicas, pero a niveles que todavía es factible utilizar el material en aplicaciones no estructurales donde se requiera una resistencia moderada contra la biodegradación.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

El presente trabajo pretende mejorar las propiedades de durabilidad natural que posee la madera de *Pinus durangensis* Martínez y *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl como material para la construcción y reducir las desventajas que este presenta frente a otros.

Se busca la mejora de estabilidad dimensional, reducción de biodegradación frente a hongos xilófagos y evitar la disminución en las propiedades mecánicas. Aunado a esto se busca que la industria maderable se vea beneficiada con tecnologías que van encaminadas a un mejoramiento en sus productos y con ello se vea reflejado en cuanto a ganancias económicas.

### **4. HIPOTESIS**

El uso de diferentes temperaturas, tiempos de residencia en los tratamientos térmicos en la madera de las especies *Pinus durangensis* Martínez y *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl no afecta la estabilidad dimensional, la resistencia ante hongos xilófagos y no reduce las propiedades mecánicas.

### **5. OBJETIVOS**

#### **5.1. Objetivo general**

Aplicar y evaluar un tratamiento térmico en la madera de *Pinus durangensis* Martínez y *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. a temperaturas de 150 ° C y 180 ° C y a tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

#### **5.2. Objetivos particulares**

- Determinar el porcentaje de hinchamiento y clasificar el coeficiente de anisotropía de la madera de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxylla* al someterla a los tratamientos térmicos de 150 ° C y 180 ° C a 30, 60, 90, 120 y 150 minutos de residencia.

- Clasificar la durabilidad natural de la madera al en términos de pérdida de masa de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla* al someterla a los tratamientos térmicos de 150 ° C y 180 ° C a 30, 60, 90, 120 y 150 minutos de residencia, frente a la acción degradadora de hongos xilófagos.
- Evaluar las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla* sometida a un tratamiento térmico de 150 ° C y 180 ° C a 30, 60, 90, 120 y 150 minutos de residencia.

## **6. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **6.1 Características geográficas de lugar de origen de la madera**

El predio donde se obtuvo la madera de ambos géneros se ubica en el macizo montañoso denominado Sierra Madre Occidental dentro del Municipio de Pueblo Nuevo, el acceso es sobre la carretera Durango-Mazatlán en el Km.147 hasta el entronque de Borbollones, para de ahí recorrer 12 km de terracería hasta el Poblado Borbollones. Con ubicación geográfica 23° 46' 12.10" N y 105° 42' 31.30" O, altitud de 2676 m y exposición sureste.

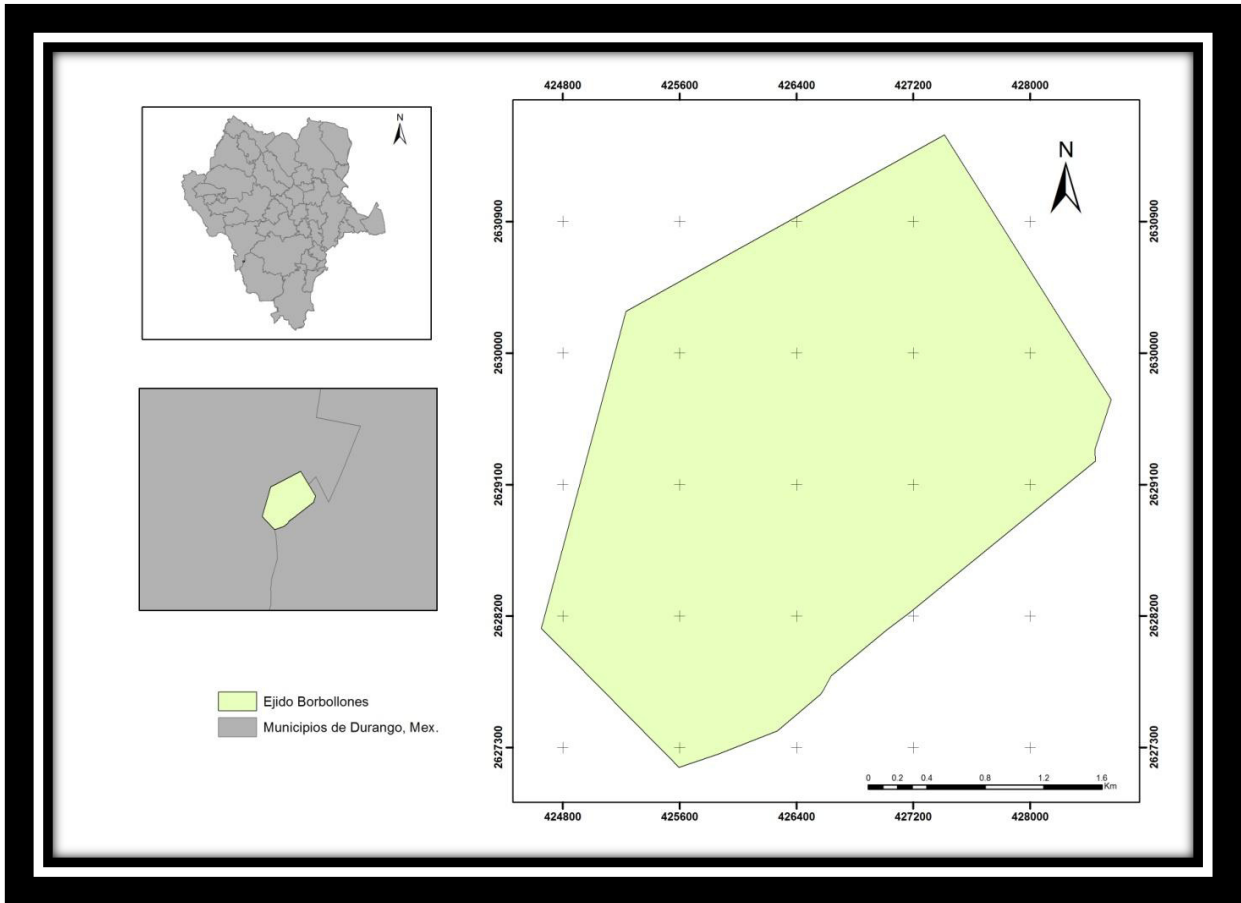


Figura 1. Localización del predio de colecta de la madera.

## Clima

Los tipos de clima que se encuentran en el predio se describen a continuación, semicálido subhúmedo, con lluvias en verano, con precipitación del mes más seco menor de 40 mm. y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 (agrupa los subtipos más húmedos de los semicálidos subhúmedos) y clima templado subhúmedo con lluvias en verano con un porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2 mm.

## Precipitación

Este componente es uno de los principales descriptores del clima. Es un término genérico para describir algún tipo de condensación atmosférica de vapor de agua, que posteriormente precipita en forma de agua, nieve, granizo, escarcha, etc. Los patrones de distribución en espacio y tiempo de la precipitación, conjuntamente con

la temperatura son utilizados para realizar la caracterización del clima local. El régimen de lluvias presentadas en la región es escaso aunque con intensidad en ciertas épocas del año, principalmente en Junio, Julio, Agosto y Septiembre, siendo su precipitación promedio media anual de 1200 mm.

### **Edafología**

Existen dos tipos de suelo en el predio los cuales se describen a continuación. Litosol, es un suelo de distribución muy amplia, se encuentra en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, son suelos sin desarrollo, con profundidad menor a 10 cm, tiene características muy variables, según el material que los conforma. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona donde se encuentre, pudiendo ser desde moderada a alta. El cambisol es un suelo joven poco desarrollado de cualquier clima, excepto zonas áridas; en el subsuelo tiene una capa con terreno que presenta un cambio con respecto al tipo de roca subyacente, con alguna acumulación de arcilla, calcio, etc. Susceptibilidad de moderada a alta a la erosión.

### **Topografía**

Se ubica en la Provincia de la Sierra Madre Occidental, la subprovincia está ubicada en la gran meseta y cañones duranguenses, la clasificación del sistema de topoformas en mesetas y el tipo de sistema de topoformas es clasificada como sierra baja.

### **Hidrografía**

Los arroyos que existen dentro del predio, clasificados como permanentes y temporales, entre los que destacan Arroyo de Las Papas, Arroyo de las Casas, Arroyo del Agua Caliente, Arroyo del Carmen, Arroyo del Zapato y Arroyo de los Guindos.

## **Vegetación**

Las comunidades vegetales más importantes del Predio están compuestas por bosques mezclados con especies del género *Pinus* y *Quercus*, además de algunas especies arbustivas, siendo los tipos de vegetación más representativos los siguientes:

### **Bosque de Pino**

Este tipo de vegetación está constituido por especies arbóreas de fuste recto, de talla baja y mediana, altura de 8 a 25 m., excepcionalmente más de 30 m., hoja acicular en fascículos, perenne, caracterizado por la dominancia del género *Pinus* y su distribución es amplia en todas las cadenas montañosas del país.

### **Bosque de Pino-Encino**

Esta comunidad es la que ocupa la mayor parte de la superficie forestal de las partes superiores de los sistemas montañosos del país. Está constituida por la mezcla de diferentes especies de pino (*Pinus* spp.) y encino (*Quercus* spp.), ocupando muchas condiciones comprendidas dentro del área general de distribución de los pinos.

## **6.2 Descripción de las especies**

### ***Pinus durangensis* Martínez**

De acuerdo con García y González, (2003) es un árbol de fuste recto de 15 a 40 m de altura y hasta de 1 a 1.5 m de D.A.P.; copa redondeada y compacta en los árboles maduros, con ramas péndulas a horizontales, frecuentemente sigmoideas; árboles jóvenes con copa de forma cónica. La madera es ligera, suave, de color amarillento, de excelente calidad. La corteza es gruesa en el tronco, escamosa, rompiéndose en grandes, irregulares y alargadas placas y fisuras poco profundas, de color café volviéndose gris oscuro con el tiempo. Las acículas están en fascículos de 4,5,6,7 y raramente 8, de 14-24 cm de longitud y 0.7-1.1 mm de ancho, rectas o ligeramente curvadas, laxas o algo rígidas, de color verde amarillento o verde pálido, pero brillantes, márgenes finamente aserrados; estomas en 2 a 3 hileras sobre la

superficie dorsal, 2 a 4 hileras sobre cada cara ventral; canales resiníferos 2 a 3 ocasionalmente 4, medios o raramente uno de ellos interno; paredes exteriores del endodermo engrosadas; hipodermo irregular, con intrusiones hacia el clorénquima; haces fibrovasculares, contiguos pero su carácter dual evidente, o a veces separados. Los conos son solitarios, o en verticilos de 2 a 4, con pedúnculos cortos, caen sólo después de varios años, de 5-9(-11) x 4-6(-7) cm, ovoides con la base redondeada cuando están completamente abiertos, de color amarillento a café. Conillos solitarios o en grupos de 2,3 y 4 sobre pedúnculos firmes; con pequeñas escamas gruesas y con una espina aguda y erecta. Las semillas de 5-6 x 4-4.5 mm, con ala articulada de 14-20 x 6-9 mm, de color gris, sub triangulares, con ala de color amarillento. La distribución en México se encuentra en montañas del occidente de la República Mexicana, desde Chihuahua en la Sierra Madre Occidental, hasta Oaxaca en la Sierra Madre del Sur.



Figura 2. *Pinus durangensis* Martínez.

***Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl.**

De acuerdo con Arizaga *et al.*, (2009) es un árbol de 15 a 30 m de altura y con un diámetro del tronco de 20 a 65 cm.; hoja oblanceolada de 4.5 a 11 cm de largo por 1.5 a 4.5 cm de ancho; margen con 1 a 6 aristas a cada lado; haz verde amarillento ligeramente lustroso; envés blanco-amarillento y tomentoso. Corteza café oscuro, fruto: bianual, solitario o en pares; bellota ovoide de 10 a 15 mm de largo por 7 a 10 mm de diámetro. Se usa principalmente para leña, carbón y extracción de celulosa para papel. Su mecanismo de propagación es por bellotas producidas de noviembre a enero. Su hábitat es principalmente en laderas, en bosques de pino-encino y bosque tropical subcaducifolio entre 1,900 a 2,200 msnm y sobre suelos pedregoso y someros. Su distribución geográfica se clasifica como endémica de México; se



distribuye en Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Jalisco, Nayarit, Nuevo León, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas y Zacatecas.



Figura 3. *Quercus sideroxyla* Humb & Bonpl.

### **6.3 Tratamiento térmico**

Las probetas se introdujeron durante diez días en una cámara bioclimática con control de temperatura (20.5 ° C) y humedad relativa (65 %) para homogeneizar el contenido de humedad a 12 %. Las probetas fueron medidas y pesadas en esta condición en dirección, tangencial, radial y longitudinal. Posteriormente, las probetas de cada lote fueron sometidas a un tratamiento térmico que consistió en aplicar 150 °C y 180 °C en una mufla marca Thermo scientific modelo f48010 a los tiempos de

residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos, también se dejaron probetas como testigo para evaluar el experimento.

#### 6.4 Propiedades físicas

Treinta probetas de cada uno de los dos lotes y de cada árbol; es decir, 180 probetas por especie se elaboraron con las dimensiones de 20 x 20 x 10 mm en sus direcciones tangencial, radial y longitudinal, respectivamente. Los cortes se orientaron perfectamente con respecto a sus anillos anuales según lo señalado por Talavera *et al.*, (2002). Los índices de hinchamiento de la madera se determinaron con base en la norma DIN 52 184 (1979), ver figura 4 y figura 5.



Figura 4. Elaboración y acondicionamiento de probetas.



Figura 5. Medición de las probetas y aplicación del experimento.

Una vez realizado lo anterior las probetas se colocaron en vasos de precipitado conteniendo agua destilada por 24 horas para buscar la absorción de la misma, para incrementar la absorción de agua también se colocaron en una bomba de vacío por 40 minutos. Finalmente, las probetas fueron medidas y pesadas para determinar el porcentaje de hinchamiento a partir de la fórmula [1] y contenido de humedad según lo establece la norma DIN 52 184. Donde el hinchamiento máximo, es definido como el aumento de las dimensiones lineales (tangencial, radial y longitudinal) que sufre una pieza de madera al pasar de un estado seco a otro completamente húmedo.

[1]

$$\alpha = \frac{L_2 - L_1}{L_1} * 100$$

Dónde:

$\alpha$  = Hinchamiento en %.

$L_1$  = Dimensión en mm de alguno de los ejes (t, r, l) de la madera a un contenido de humedad inicial (C.H.<sub>1</sub>).

$L_2$  = Dimensión en mm de alguno de los ejes (t, r, l) de la madera a un contenido de humedad máximo (C.H.<sub>2</sub>), mismo que será mayor a C.H.<sub>1</sub>.

Para la determinación del contenido de humedad en cada uno de los diferentes tratamientos se utilizó la fórmula [2]:

[2]

$$C.H. = \frac{P_2 - L1_1}{P_2} * 100$$

Dónde:

C.H. = Contenido de humedad en %.

$P_1$  = Peso verde en gramos a una temperatura de 20.5 °C.

$P_2$  = Peso seco de la probeta en gramos a una temperatura ambiente.

Para clasificar los valores de hinchamiento de la madera se utilizó la base de datos presentada en Prospect, Ver 2.1, (1997), (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación del hinchamiento de la madera.

Categoría	Hinchamiento	
	Radial (%)	Tangencial (%)
Muy pequeña	< 3.0	< 5.0
Pequeña	3.1-4.0	5.1-6.5
Moderada	4.1-5.0	6.6-8.0
Ligeramente grande	5.1-6.0	8.1-9.5
Grande	> 6.0	>9.5

La anisotropía en hinchamiento se determinó al relacionar la contracción tangencial con la contracción radial. La clasificaron se realizó de acuerdo al estudio reportado por Ordóñez *et al.* (1990) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Clasificación de la madera de acuerdo a su anisotropía

Categoría	Anisotropía de la contracción
Muy estable	<1.5
Estable	1.5 - 2.0
Moderadamente estable	2.0-2.5
Inestable	2.5-3.0
Muy inestable	> 3.0

### 6.5 Durabilidad ante hongos xilófagos.

La prueba de durabilidad de la madera sometida a los tratamientos térmicos se realizó con la Norma Europea 113 (EN 113, 1996) que consiste en exponer la madera a la acción degradadora de los hongos xilófagos *Coniophora puteana* y *Trametes versicolor*. El tamaño de las probetas fue de 30 x 10 x 5 mm en sentido longitudinal, radial y tangencial respectivamente. Los porcentajes de pérdida de masa fueron indicadores de la durabilidad.

Las probetas se esterilizaron en un autoclave (Market Forget Industries) durante 20 minutos, a una temperatura de 120 ° C. Las probetas se colocaron en cajas petri de 150 mm x 15 mm con solución de 50 ml de agar malta solidificado (Figura 14), posteriormente en cada caja petri se colocó un inóculo de un cm del hongo y 6 probetas elegidas totalmente al azar de los cuales se les había aplicado un tratamiento térmico. Las cajas petri con las muestras se incubaron en un cuarto de cultivo con ambiente controlado, por un periodo de 12 semanas, a una temperatura de 20 ± 2 ° C y una humedad relativa de 65±5%.

Para determinar el porcentaje de pérdida de masa en la madera de *P. durangensis* y *Q. sideroxylla* se utilizaron 108 probetas por cada hongo y cada especie de madera, se colocaron 6 probetas en cajas petri las cuales contenía 5 piezas de madera de una de las especies y una de *Fagus Sylvatica*, esta sirvió como testigo para evaluar el grado de colonización de el hongo, en total se utilizaron 432 probetas (incluyendo probetas con tratamiento térmico y control), adicionalmente se utilizaron 88 probetas de *F. Sylvatica* para determinar el grado de actividad de los hongos. El efecto de

lixiviación, que es el arrastre de compuestos producido en la madera por la humedad ambiental, se midió al colocar 36 probetas de la madera de *P. durangensis*, 36 de *Q. sideroxylla* y 18 probetas de *F. sylvatica* en el medio de cultivo.



Figura 6. Elaboración y acondicionamiento de probetas para el experimento de pérdida de masa.

Al término del ensayo, se midió la pérdida de masa. Los valores obtenidos se ajustaron al restar la pérdida de masa que se ocasiono por efecto de la lixiviación de los compuestos de la madera. Según la Norma Europea EN 113 considera válido un ensayo de degradación producida por hongos, cuando la pérdida de masa para la especie testigo de *F. sylvatica* es mayor a 12% (Figura 15).

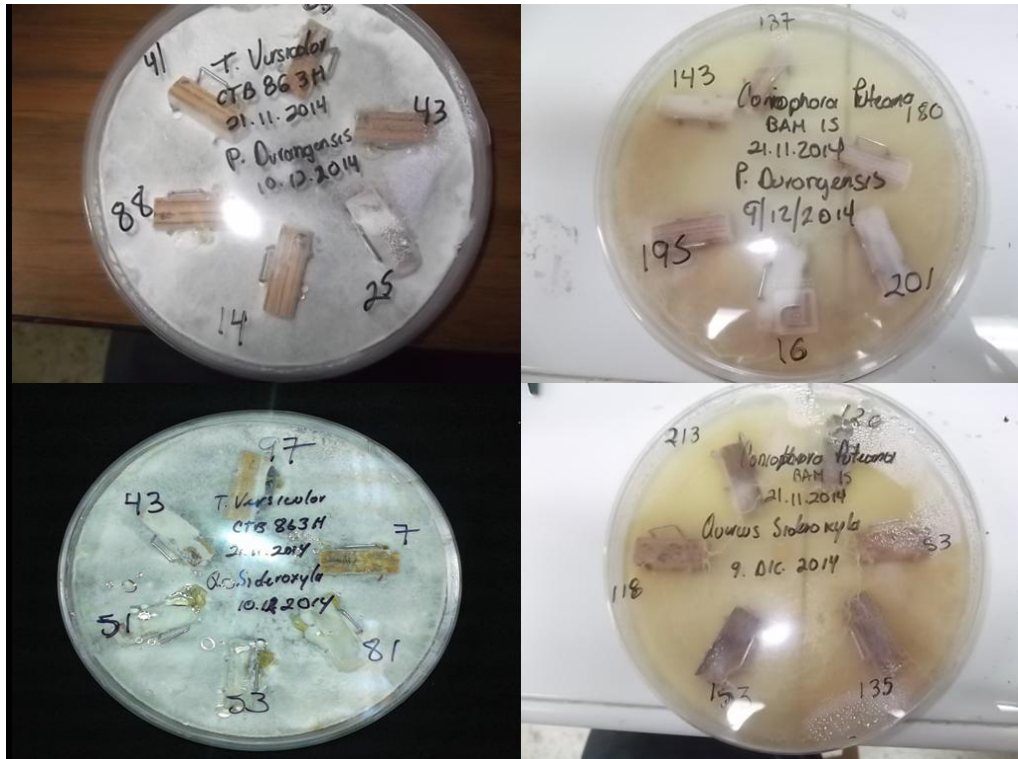


Figura 7. Probetas de madera de *Pinus Durangensis* y *Quercus sideroxylla* con tratamiento térmico expuestas a hongos xilófagos de *Trametes versicolor* y *Coniophora puteana* después del término del experimento.

### Determinación de la pérdida de masa

Este procedimiento consistió en determinar la reducción de masa de las probetas de madera expuestas a hongos xilófagos, al obtener la diferencia en porcentaje de la masa de madera en condición seca al inicio del experimento y la masa encontrada después de 12 semanas. La pérdida de masa [3] fue determinada mediante la siguiente fórmula:

[3]

$$P.M. = \frac{M_i - M_f}{M_i}$$

Donde:

P.M. = Pérdida de masa (%)

$M_i$  = masa anhidra de la probeta al inicio del ensayo (g)

$M_f$  = masa anhidra de la probeta al final del ensayo (g)

### Índices de durabilidad

Una vez finalizado el ensayo, las pérdidas promedio de masa se ubicaron en la clasificación propuesta por la UNE EN 350-1 cuyos rangos de resistencia al ataque de hongos de pudrición se visualizan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Índices de durabilidad según la UNE EN350-1 (1995).

Clase	Pérdida de peso promedio (%)	Índice de durabilidad
1	Menor a 15	Muy durable
2	15 a 30	Durable
3	30 a 60	Medianamente durable
4	60 a 90	Poco durable
5	Mayor a 90	No durable

### 6.6 Propiedades mecánicas

Las pruebas mecánicas se realizaron después de colocar las probetas en una cámara bioclimática durante 14 días con un control de temperatura de 20.5° C y una humedad relativa de 65% para homogeneizar a un 12 %. Después de que presentaron peso constante, se realizaron las pruebas mecánicas de modulo de elasticidad, modulo de ruptura, compresión y dureza janka en las maderas de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxylla*, los ensayos se realizaron con la maquina universal de pruebas mecánicas de la marca SHIMADZU modelo AG-IC con una capacidad de 100 kN.





Figura 8. Máquina universal de pruebas mecánicas con manufactura japonesa de la marca SHIMADZU modelo AG-IC.

Para las pruebas de MOE [4] y MOR [5] se utilizaron un total de 180 probetas por especie con dimensiones de 20 X 20 | X 230 mm según la norma DIN 52 186. Donde se utilizan la siguientes formulas:

[4]

$$MOE_{\text{stat}} = \frac{l^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$MOE_{\text{stat}}$  = módulo estático de elasticidad de flexión en tres puntos (N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta F$  = Carga (N)

$l$  = lapso de duración de la muestra (mm)

$\Delta f$  = desviación (mm)

$b$  = ancho de la muestra (mm)

$h$  = espesor de la muestra (mm)

[5]

$$MOR = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$MOR$  = Modulo de ruptura (N/mm<sup>2</sup>)

$F$  = carga (N)

$l$  = largo de la pieza (mm)

$b$  = ancho de la muestra (mm)

$h$  = espesor de la muestra (mm)

Para las pruebas de compresión en dirección a las fibras se utilizaron 180 probetas de 20 X 20 X 10 mm según la norma DIN 52 185 para determinar que peso pueden soportar antes de la falla en la madera.

Para la prueba de dureza Janka se utilizaron 180 probetas de 50 X 50 X 50 mm según la norma ASTM D143-94, donde se utiliza una bola de acero con un diámetro

de 11,284 mm que sangra en una pieza de ensayo a una profundidad equivalente a la de la hemisferio, produciendo un área de proyección de 1 cm<sup>2</sup>.

## **7. RESULTADOS**

### **7.1 Propiedades físicas**

#### *Pinus durangensis*

Se realizaron análisis de varianza factoriales con una confiabilidad de 95 %, con el programa estadístico SPSS 22.0 para los valores de hinchamiento en dirección tangencial, radial y longitudinal en el contenido de humedad a diferentes temperaturas 150 ° C y 180 ° C con un tiempo de residencia 30, 60, 90, 120 y 150 minutos en las especies de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxylla*.

En las figuras 6, 7 y 8 se puede observar el porcentaje de hinchamiento de la madera de *Pinus durangensis* sometida a los tratamientos térmicos a temperaturas de 180 ° C y 150 ° C en las direcciones tangencial, radial y longitudinal y tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120, 150 minutos.

La figura 9 muestra que el porcentaje de hinchamiento en sentido tangencial es menor en la temperatura de 180 ° C en todos los tiempos de residencia. El análisis de varianza (Cuadro 7) muestra que no existe diferencia significativa en tiempo ( $p>0.05$ ), existe alta diferencia significativa ( $p<0.001$ ) en temperatura, y que no hay diferencias significativas ( $p>0.05$ ) en las interacciones Tiempo\*Temperatura.

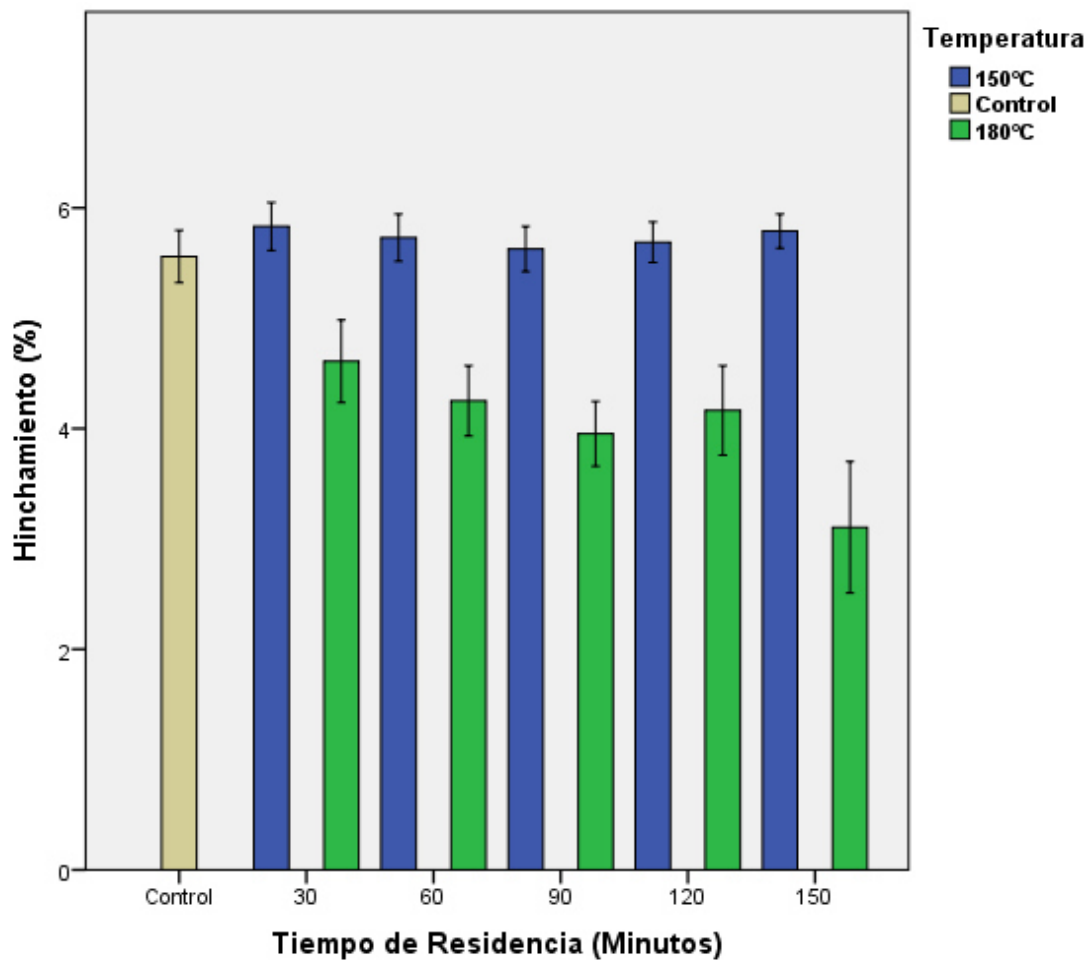


Figura 9. Porcentaje de la madera de *Pinus durangensis* sometida a tratamientos térmicos de 180°C y 150°C en diferentes tiempos de residencia.

La figura 10 muestra porcentajes más bajos en el hinchamiento en sentido radial después del tratamiento de 180 ° C mostrando el nivel más bajo en el tiempo de residencia de 120 minutos. El análisis de varianza (Cuadro 7) no muestra diferencia significativa ( $p>0.05$ ) para tiempo, tampoco en la interacción Tiempo\*Temperatura, sin embargo muestra que hay diferencia significativa ( $p<0.05$ ) en la variable de temperatura.

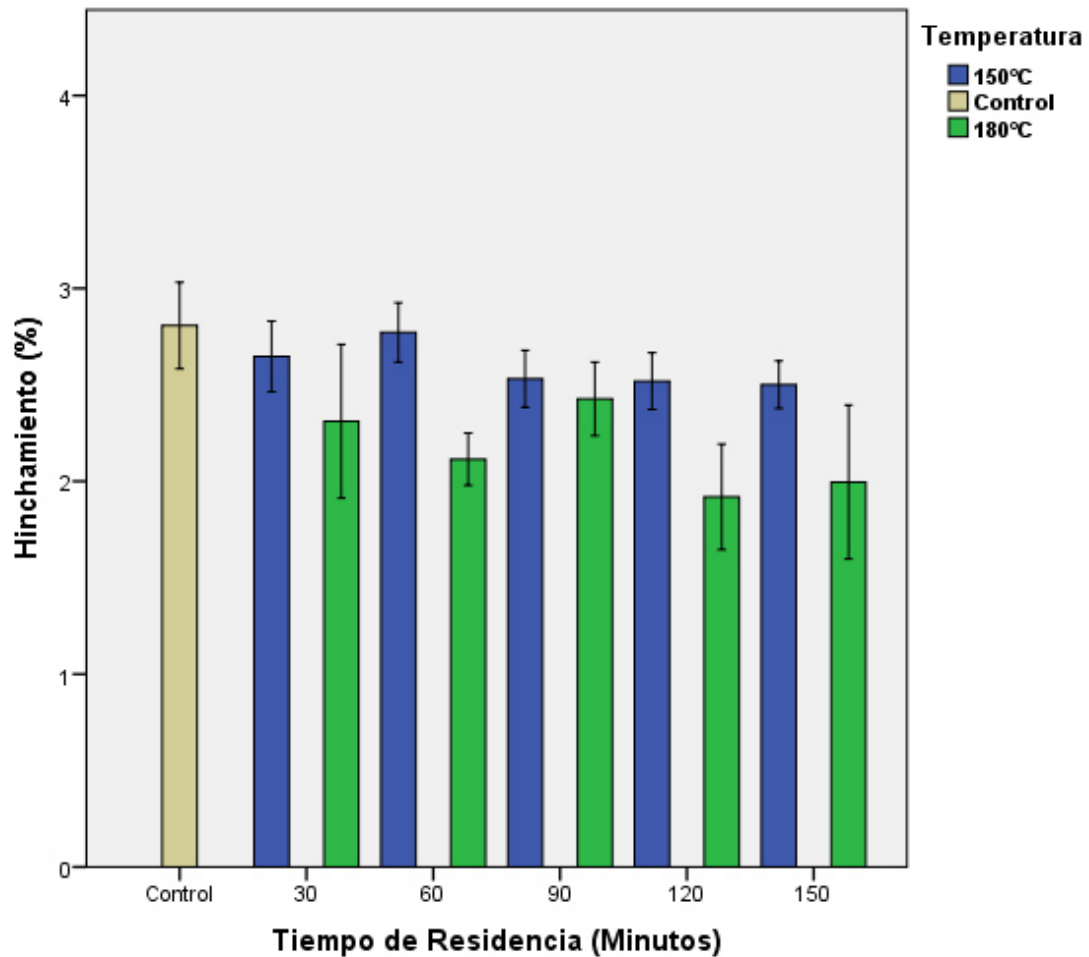


Figura 10. Porcentaje de hinchamiento radial de la madera de *Pinus durangensis* sometida a los tratamientos térmicos de 180°C y 150°C en diferentes tiempos de residencia.

La figura 11 muestra porcentajes más bajos en el hinchamiento en sentido radial después del tratamiento de 180 °C mostrando el niveles de hinchamiento más bajos después del tiempo de residencia de 60 minutos excepto en el primer tiempo de residencia de 30 minutos. El análisis de varianza (Cuadro 7) no muestra diferencia significativa ( $p>0.05$ ) para tiempo, temperatura, tampoco en la interacción Tiempo\*Temperatura.

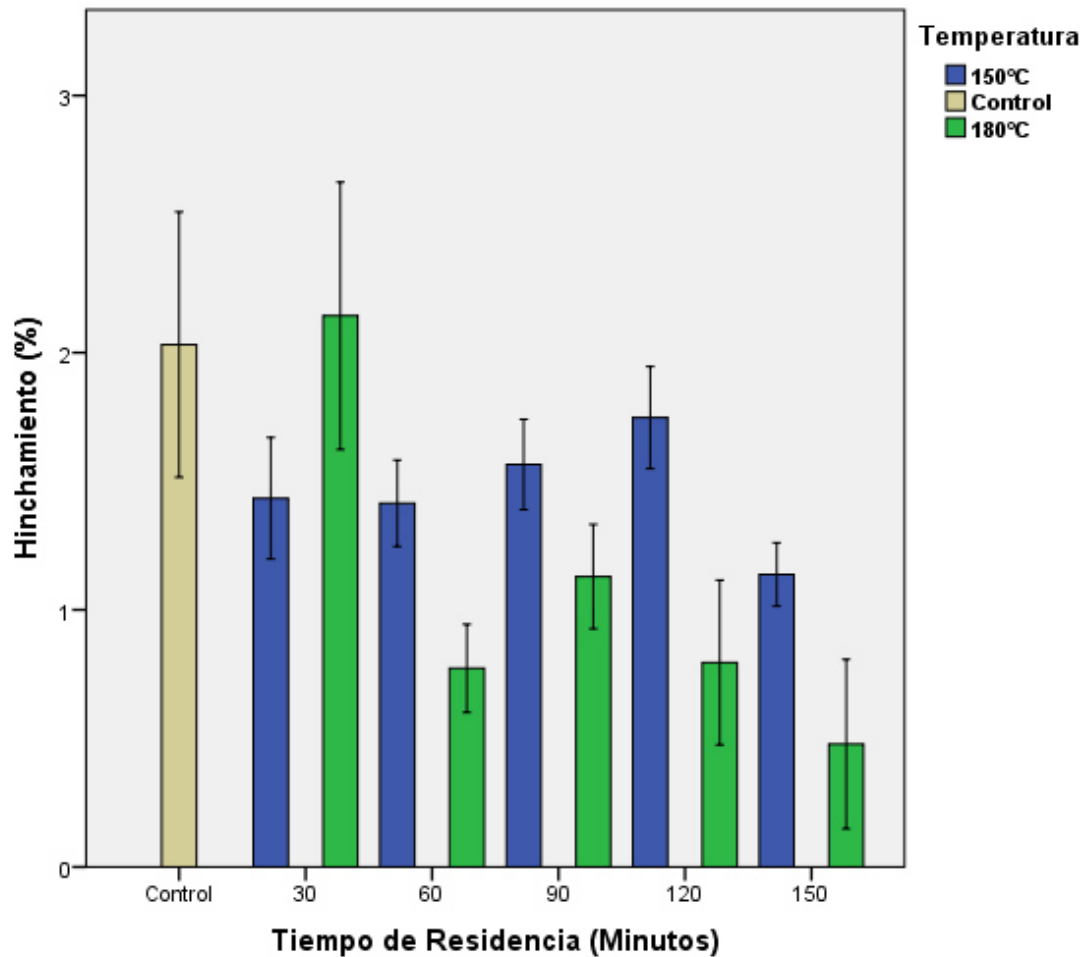


Figura 11. Porcentaje de hinchamiento longitudinal de madera de *Pinus durangensis* sometida a los tratamientos térmicos de 180°C y 150°C en diferentes tiempos de residencia.

La figura 12 muestra el contenido de humedad después del tratamiento térmico aplicado, donde se observa que el porcentaje de contenido de humedad disminuye conforme avanza el tiempo de residencia en la temperatura de 180°C. El análisis de varianza (Cuadro 7) muestra diferencia altamente significativa ( $p < 0.001$ ) para la temperatura y el mismo análisis no muestra diferencia significativa para ( $p > 0.05$ ) tiempo y la interacción Tiempo\*Temperatura.

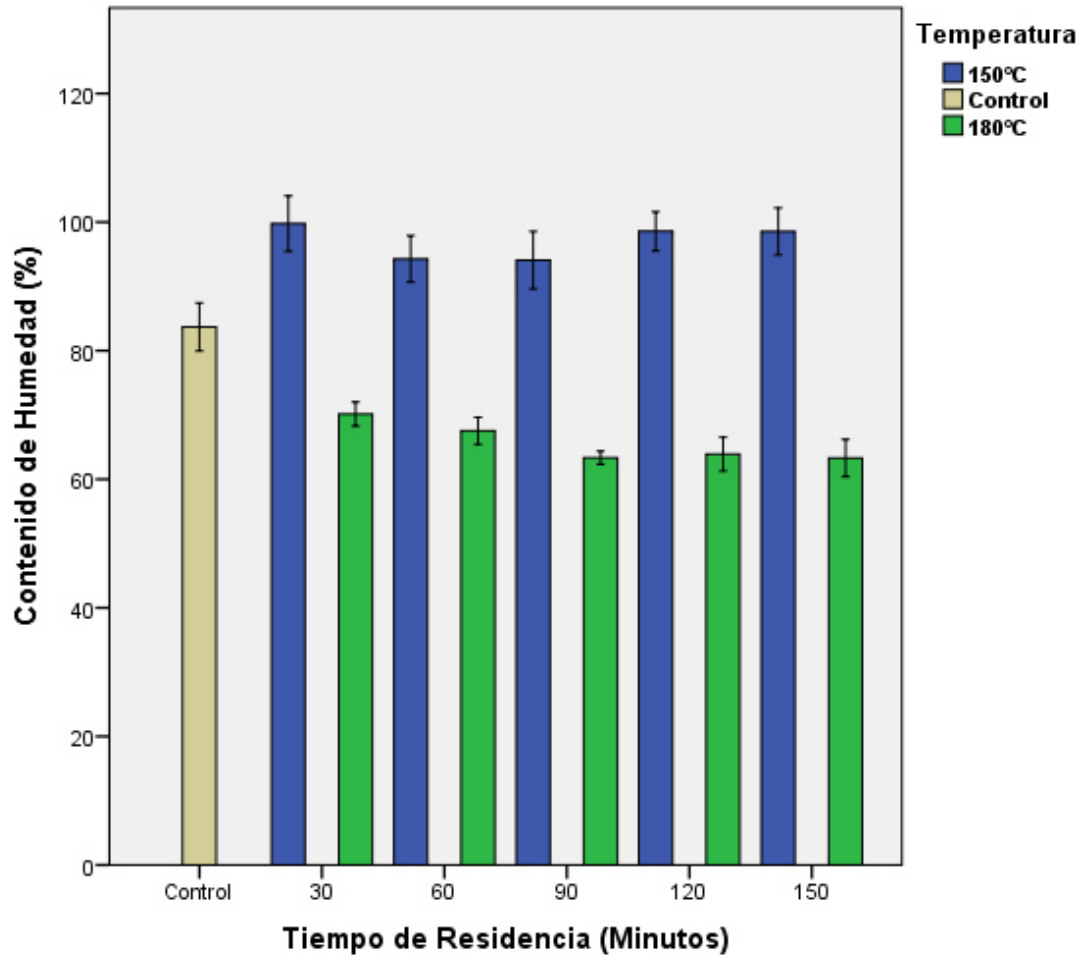


Figura 12. Porcentaje de contenido de humedad de madera de *Pinus durangensis* sometida a los tratamientos térmicos de 180°C y 150°C en diferentes tiempos de residencia.

Cuadro 4. Clasificación y resultados de hinchamiento y coeficiente de anisotropía de la madera de *Pinus durangensis* tratada térmicamente a temperaturas de 180°C y 150°C y tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

Temperatura	Tiempo de residencia	Hinchamiento tangencial	Clasificación del hinchamiento tangencial	Hinchamiento radial	Clasificación del hinchamiento radial	Coefficiente de Anisotropía	Clasificación de acuerdo a su anisotropía
150°C	Control	5.65	Pequeña	2.8	Muy Pequeña	2.02	Moderadamente estable
	30	5.83	Pequeña	2.64	Muy Pequeña	2.21	Moderadamente estable
	60	5.73	Pequeña	2.77	Muy Pequeña	2.07	Moderadamente estable
	90	5.62	Pequeña	2.53	Muy Pequeña	2.22	Moderadamente estable
	120	5.68	Pequeña	2.51	Muy Pequeña	2.26	Moderadamente estable
	150	5.7	Pequeña	2.3	Muy Pequeña	2.48	Moderadamente estable
180°C	30	4.9	Muy Pequeña	3.11	Pequeña	1.58	Estable
	60	4.14	Muy Pequeña	2.11	Muy Pequeña	1.96	Estable
	90	3.95	Muy Pequeña	2.42	Muy Pequeña	1.63	Estable
	120	4.16	Muy Pequeña	1.91	Muy Pequeña	2.18	Moderadamente estable
	150	3.1	Muy Pequeña	1.99	Muy Pequeña	1.56	Estable



*Quercus sideroxyla*

La figura 13 muestra que el porcentaje de hinchamiento en sentido tangencial es menor en la temperatura de 180 °C en todos los tiempos de residencia. El análisis de varianza (Cuadro 8) muestra que existe diferencia significativa en tiempo ( $p < 0.05$ ), alta diferencia significativa ( $p < 0.001$ ) en temperatura, el mismo análisis muestra que existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en las interacciones Tiempo\*Temperatura.

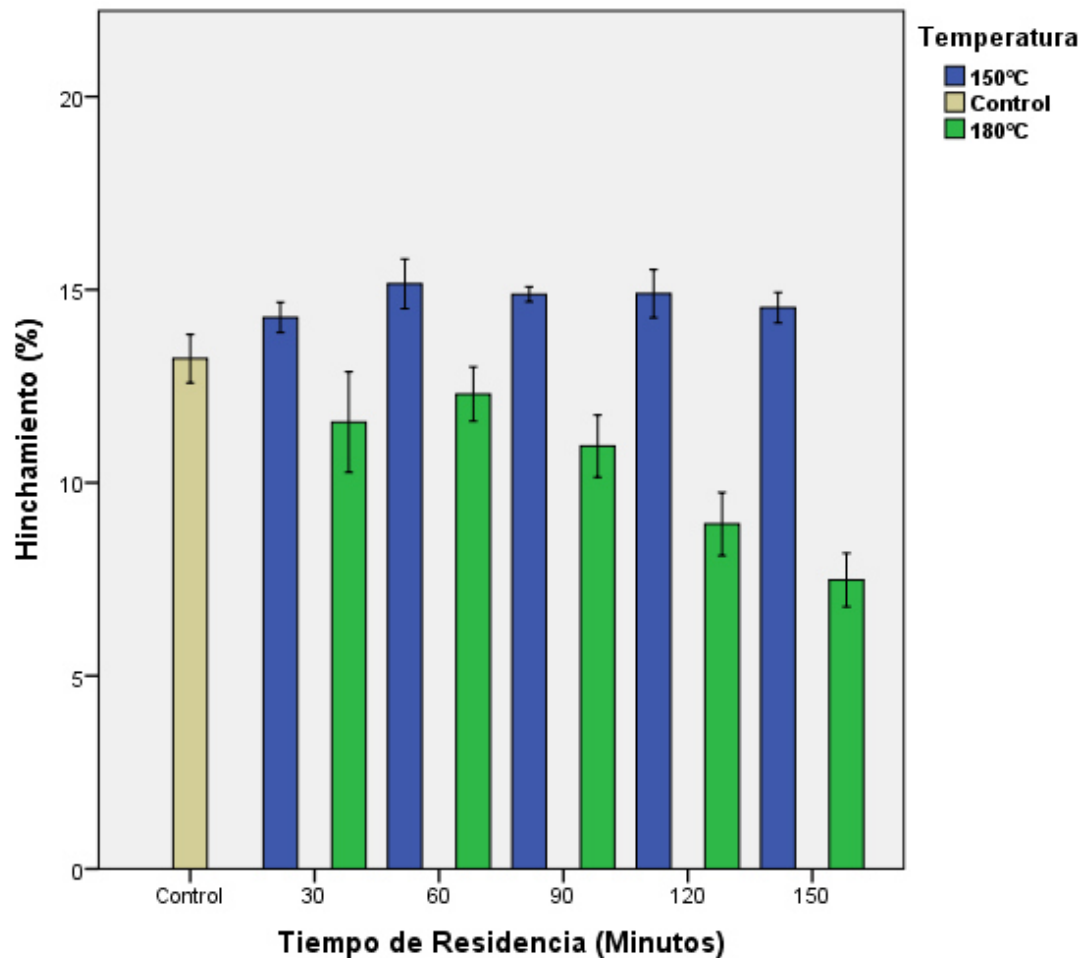


Figura 13. Porcentaje de hinchamiento tangencial de madera de *Quercus sideroxyla* sometida a los tratamientos térmicos de 180°C y 150°C en diferentes tiempos de residencia.

La figura 14 muestra que el porcentaje de hinchamiento en sentido radial es menor en la temperatura de 180 °C en todos los tiempos de residencia. El análisis de varianza (Cuadro 8) muestra que no existe diferencia significativa en la variable tiempo ( $p>0.05$ ), en la variable temperatura muestra alta diferencia significativa ( $p<0.001$ ), el análisis muestra que no existe diferencia significativa ( $p>0.05$ ) en las interacciones Tiempo\*Temperatura.

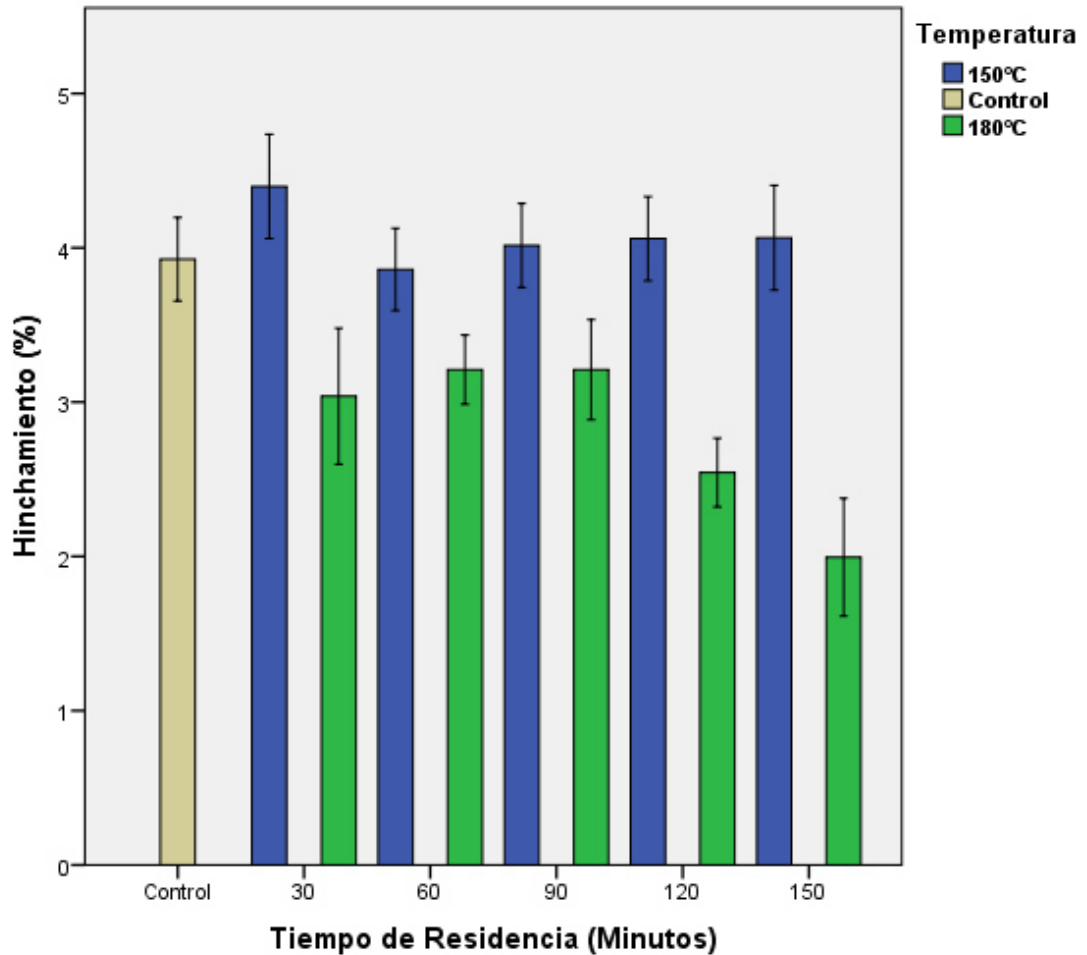


Figura 14. Porcentaje de hinchamiento radial de madera de *Quercus sideroxylla* sometida a los tratamientos térmicos de 180°C y 150°C en diferentes tiempos de residencia.

La figura 15 muestra que el porcentaje de hinchamiento en sentido longitudinal es variable pero a partir del tiempo de residencia de 90 minutos se aprecia una ligera tendencia de menor hinchamiento en la temperatura de 180 °C. El análisis de varianza (Cuadro 8) muestra que no existe diferencia significativa en la variable tiempo ( $p>0.05$ ), en la variable temperatura no muestra diferencia significativa ( $p>0.05$ ), el mismo análisis muestra diferencia significativa ( $p<0.05$ ) en las interacciones Tiempo\*Temperatura.

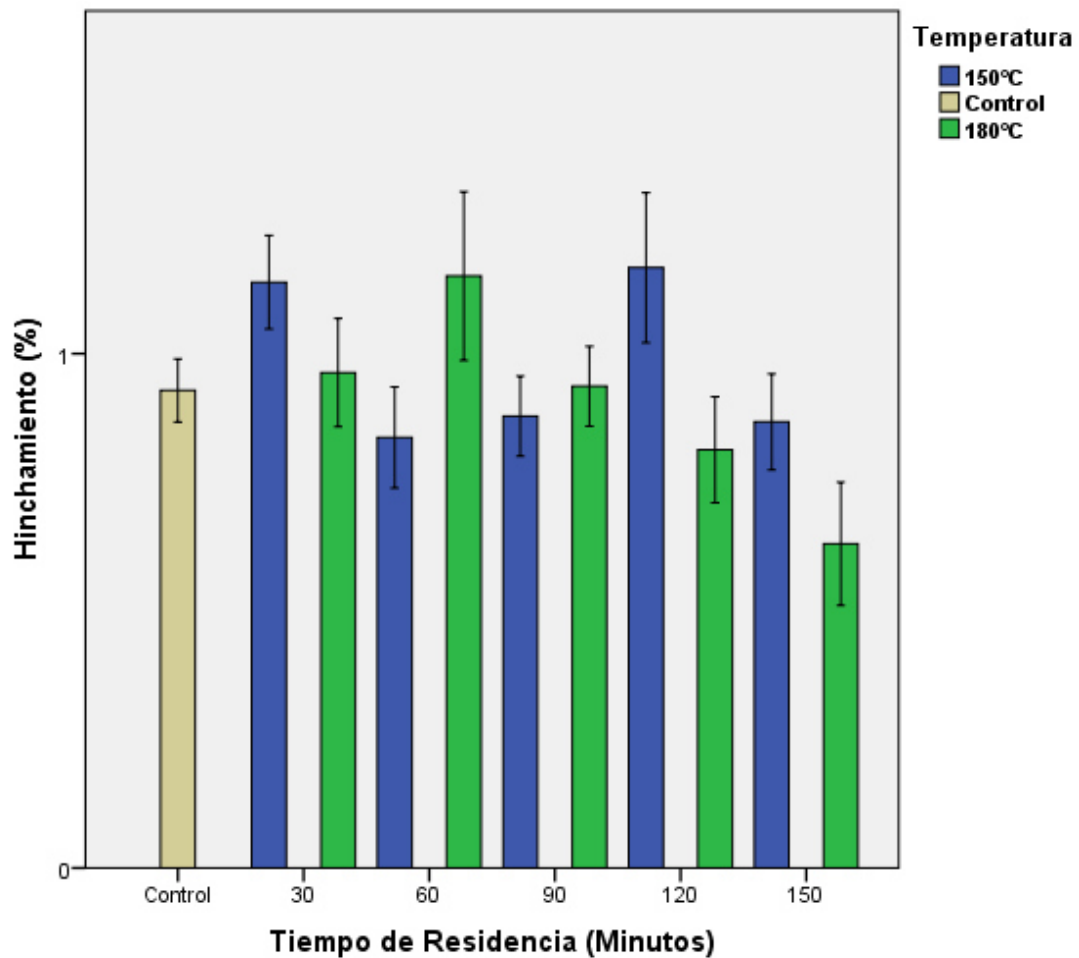


Figura 15. Porcentaje de hinchamiento longitudinal de madera de *Quercus sideroxyla* sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° C y 150 ° C en diferentes tiempos de residencia.

La figura 16 muestra el contenido de humedad después del tratamiento térmico aplicado, donde se observa que el porcentaje de contenido de humedad disminuye conforme avanza el tiempo de residencia a la temperatura de 180°C. El análisis de varianza (Cuadro 8) no muestra diferencia significativa ( $p>0.05$ ) para la variable tiempo, el mismo análisis muestra diferencia altamente significativa para la variable temperatura ( $p<0.0001$ ) y para la interacción Tiempo\*Temperatura no muestra diferencia significativa ( $p>0.05$ )

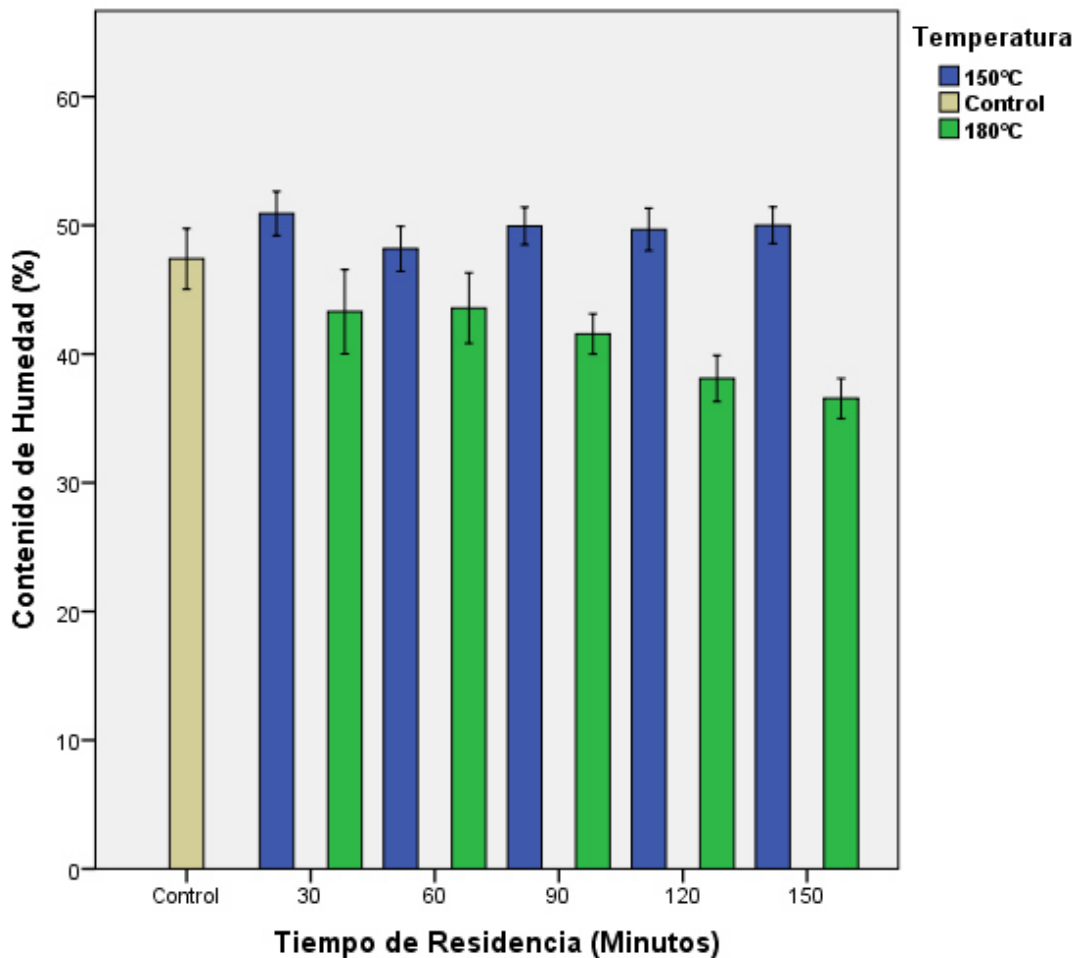


Figura 16. Porcentaje de contenido de humedad de madera de *Quercus sideroxyla* sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° C y 150 ° C en diferentes tiempos de residencia.

Cuadro 5. Clasificación y resultados de hinchamiento y coeficiente de anisotropía de la madera de *Quercus sideroxyta* tratada térmicamente a temperaturas de 180 ° C y 150 ° C y tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

Temperatura	Tiempo de residencia	Hinchamiento tangencial	Clasificación del hinchamiento tangencial	Hinchamiento radial	Clasificación del hinchamiento radial	Coficiente de Anisotropía	Clasificación de acuerdo a la anisotropía
150°C	Control	13.21	Grande	3.9263	Pequeña	3.37	Muy inestable
	30	14.28	Grande	4.3978	Moderada	3.25	Muy inestable
	60	15.15	Grande	3.8597	Pequeña	3.93	Muy inestable
	90	14.88	Grande	4.0154	Moderada	3.71	Muy inestable
	120	14.89	Grande	4.0591	Moderada	3.67	Muy inestable
	150	8.93	Ligeramente Grande	4.0653	Moderada	2.20	Moderadamente estable
180°C	30	11.57	Grande	3.038	Pequeña	3.81	Muy inestable
	60	12.30	Grande	3.2106	Pequeña	3.83	Muy inestable
	90	10.95	Grande	3.2105	Pequeña	3.41	Muy inestable
	120	8.93	Ligeramente Grande	2.5437	Muy pequeña	3.51	Muy inestable
	150	7.48	Moderada	1.9946	Muy pequeña	3.75	Muy inestable

## 7.2 Durabilidad ante hongos xilófagos

Se realizaron análisis de varianza factoriales con una confiabilidad de 95 %, con el programa estadístico SPSS 22.0 para los valores de pérdida de masa al exponerlos a hongos xilófagos, en los tratamientos térmicos con temperaturas 150 °C y 180 °C con un tiempo de residencia 30, 60, 90, 120 y 150 minutos en las especies de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla*.

En las figuras 17, 18, 19 y 20 se puede observar el porcentaje de pérdida de masa en la madera de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla* sometida a tratamientos térmicos y temperaturas de 180 °C y 150 °C en las tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120, 150 minutos.

*Pinus durangensis*

La figura 17 muestra el menor porcentaje de pérdida de masa de 4.06 % en la temperatura de 180°C y tiempo de residencia de 60 minutos más sin embargo no muestra ninguna tendencia o efecto de forma normal. El análisis de varianza (Cuadro 9) no muestra diferencia significativa ( $p>0.05$ ) en las variables tiempo y temperatura, tampoco muestra diferencia significativa ( $p>0.05$ ) en las interacciones Tiempo\*Temperatura.

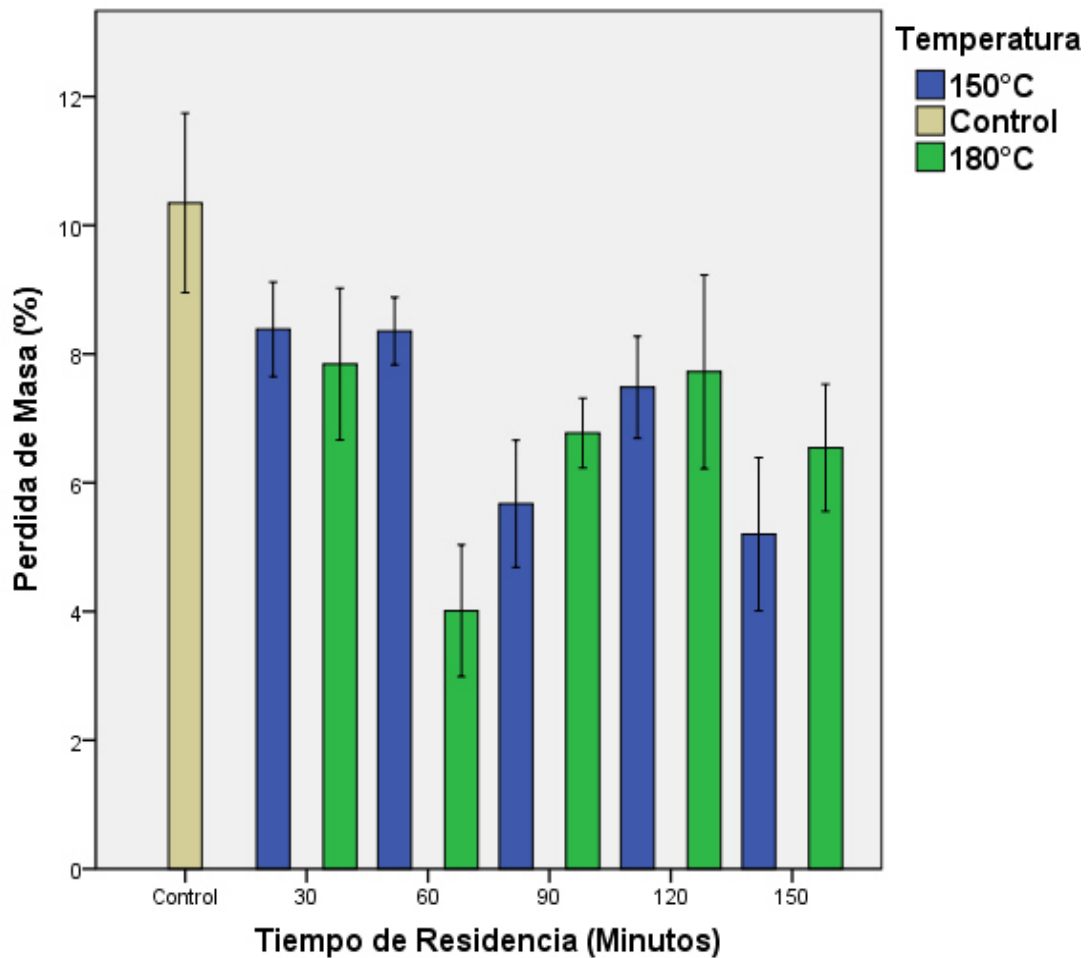


Figura 17. Porcentaje de pérdida de masa en la madera de *Pinus durangensis* sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° y 150 ° C en diferentes tiempos de residencia y expuesta al hongo *Trametes versicolor*.

La figura 18 muestra el menor porcentaje de pérdida de masa en la temperatura de 180°C y tiempo de residencia de 90 minutos con un porcentaje de 6.25 %. El análisis de varianza (Cuadro 9) muestra que no hay diferencia significativa ( $p>0.05$ ) en la variable tiempo, para la variable temperatura si muestra diferencia significativa ( $p<0.05$ ), en el mismo análisis muestra que no hay diferencia significativa ( $p>0.05$ ) en las interacciones tiempo\*temperatura.

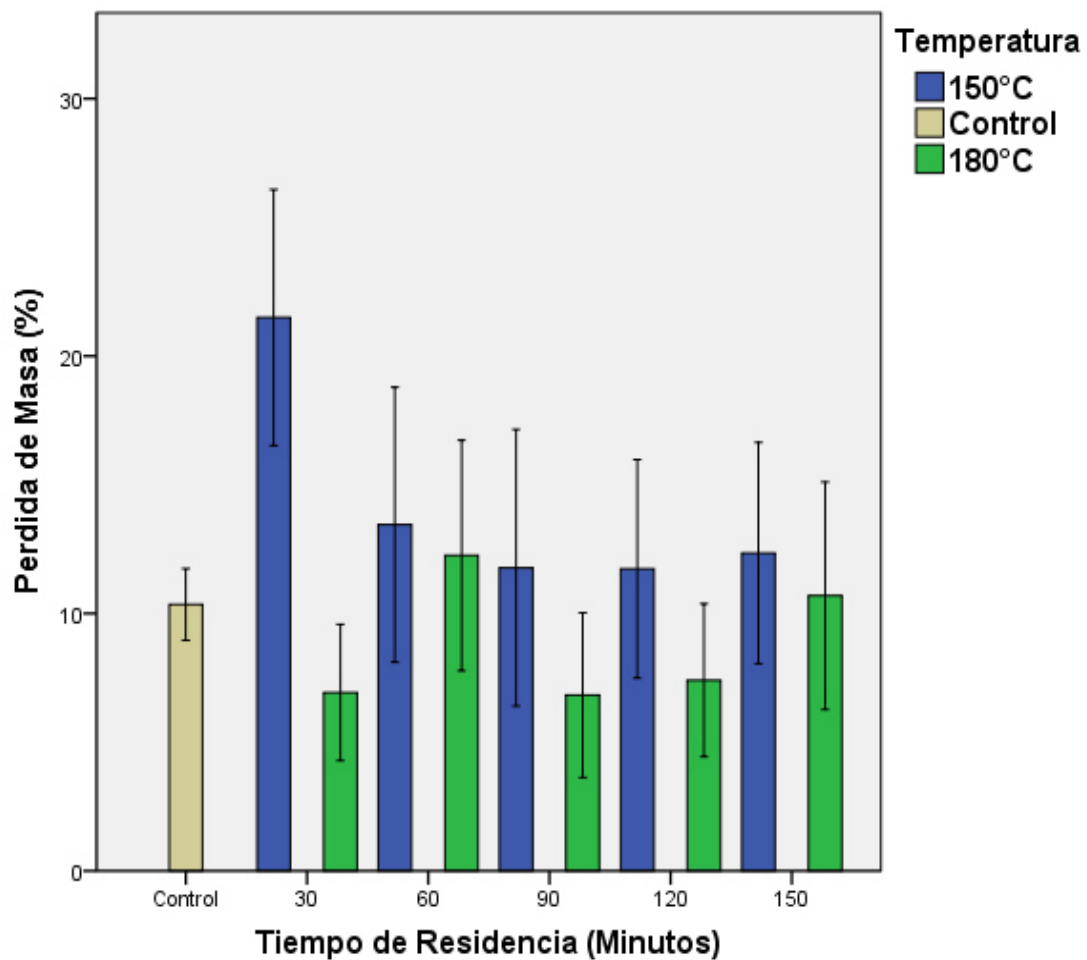


Figura 18. Porcentaje de pérdida de masa en la madera de *Pinus durangensis* sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° y 150 ° C en diferentes tiempos de residencia y expuesta al hongo *Coniophora puteana*.



*Quercus sideroxyla*

La figura 19 muestra que el porcentaje de pérdida de masa no se reduce con la aplicación del tratamiento térmico, incluso la madera muestra una mayor pérdida de masa por el ataque de el hongo en comparación con el control. El análisis de varianza (Cuadro 9) muestra que no hay diferencia significativa ( $p>0.05$ ) en la variable tiempo, para la variable temperatura muestra no existe diferencia significativa ( $p>0.05$ ), en el mismo análisis muestra que no existe diferencia significativa ( $p>0.05$ ) en las interacciones Tiempo\*Temperatura.

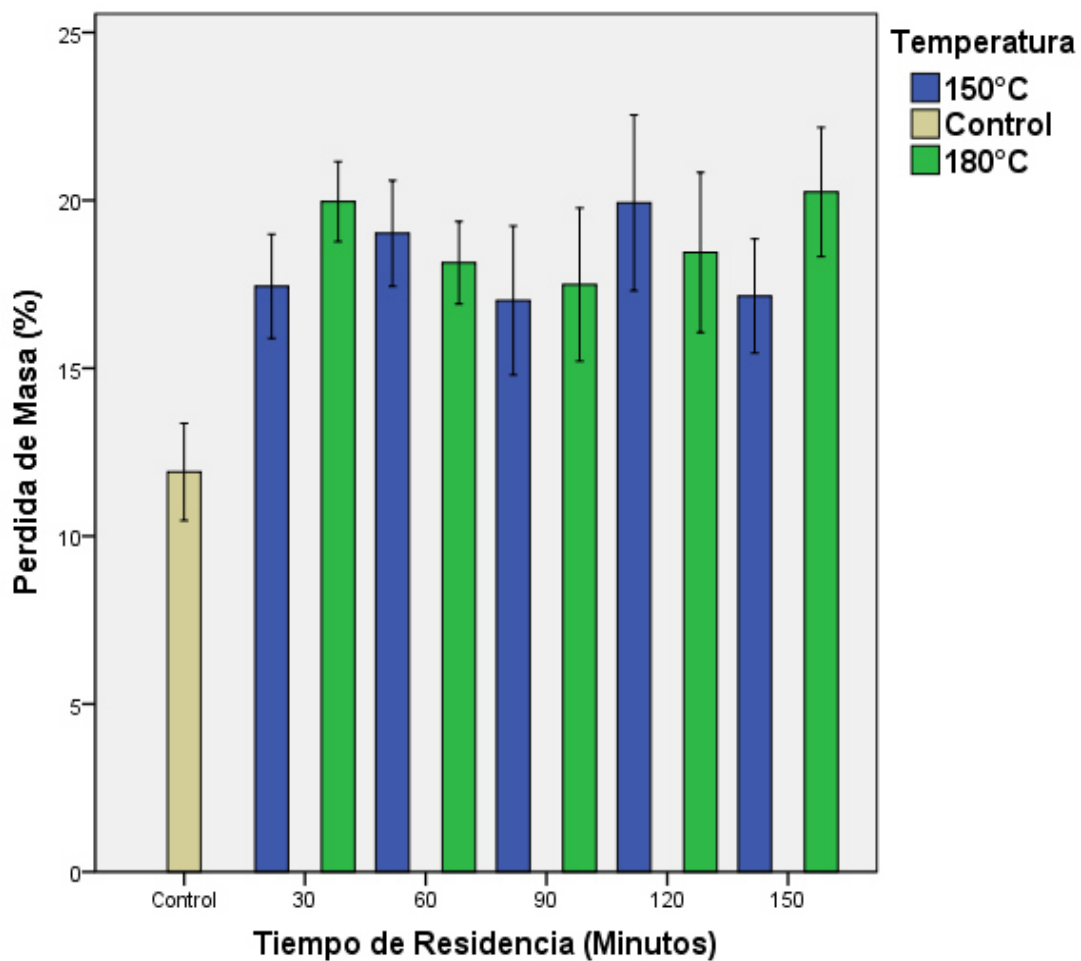


Figura 19. Porcentaje de pérdida de masa en la madera *Quercus sideroxyla* sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° y 150 ° C en diferentes tiempos de residencia y expuesta al hongo *Trametes versicolor*.

La figura 20 muestra que el porcentaje de pérdida de masa en la temperatura de 180 ° C es menor en todos los tiempos de residencia en comparación con el control y la temperatura de 150 ° C. El análisis de varianza (Cuadro 9) muestra que no hay diferencia significativa ( $p>0.05$ ) en la variable tiempo, para la variable temperatura muestra no existe diferencia significativa ( $p>0.05$ ), en el mismo análisis muestra que no existe diferencia significativa ( $p>0.05$ ) en las interacciones Tiempo\*Temperatura.

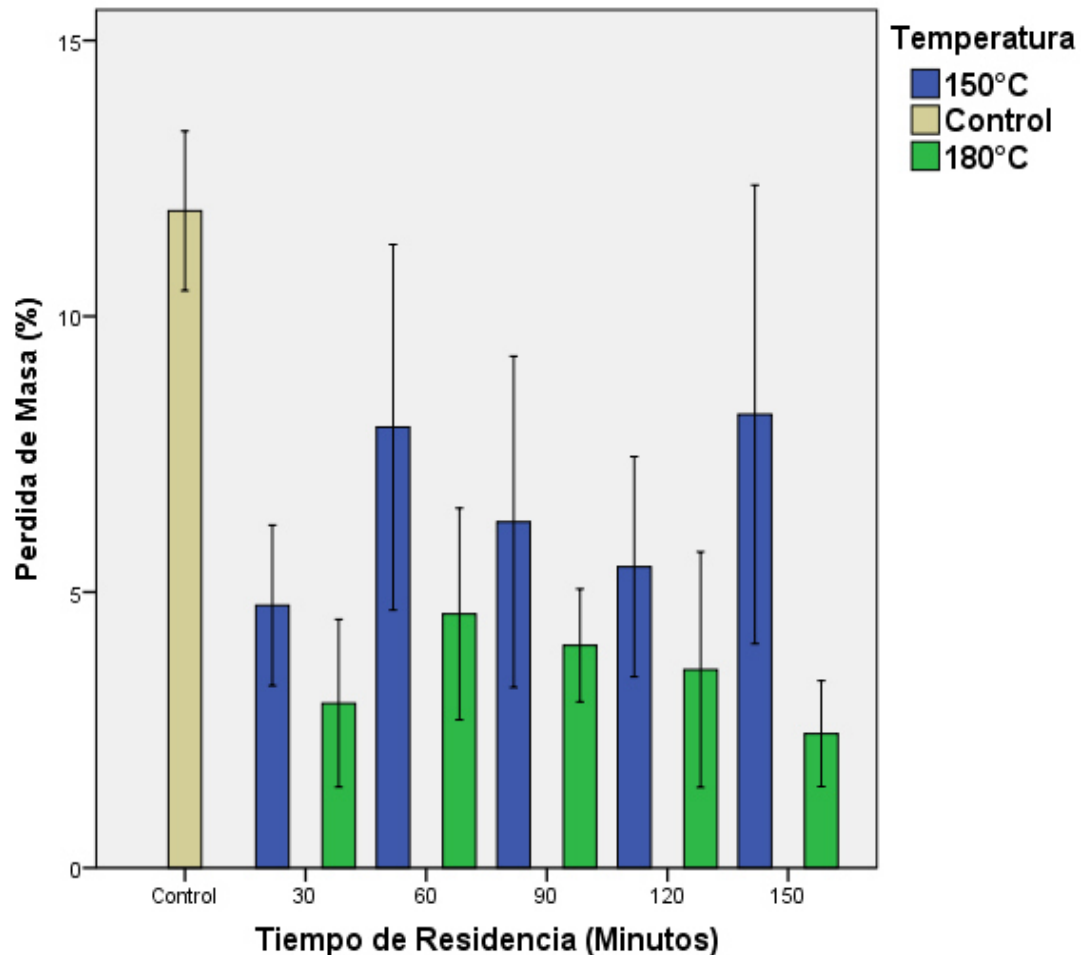


Figura 20. Porcentaje de pérdida de masa en la madera *Quercus sideroxylla* sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° y 150 ° C en diferentes tiempos de residencia y expuesta al hongo *Coniophora puteana*.

La figura 21 muestra el porcentaje de pérdida de masa en *Fagus Sylvatica* expuesto a los hongos degradadores de madera de *Coniophora puteana* y *Trametes versicolor*, las cuales son mayores del 12 % para hacer valido el experimento.

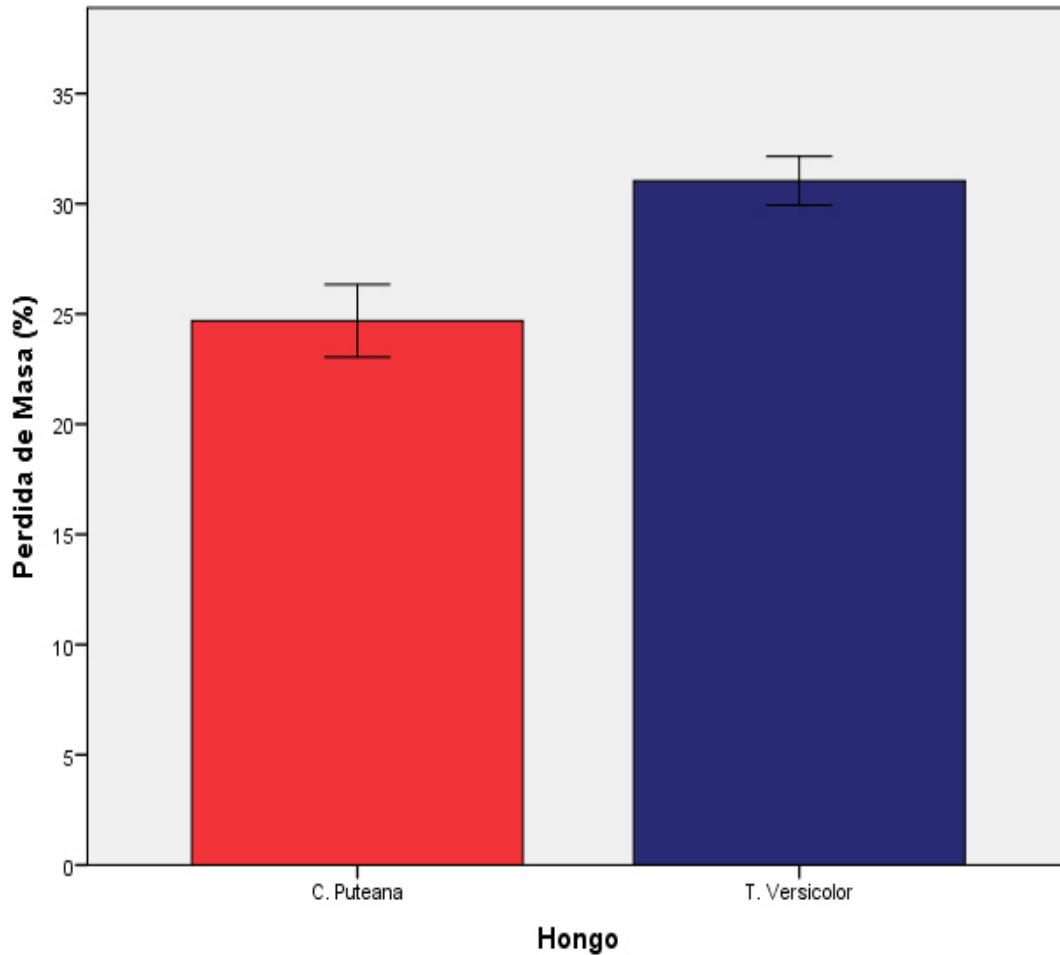


Figura 21. Porcentaje de pérdida de masa en madera de *Fagus sylvatica* expuesta a hongos xilófagos *Trametes versicolor* y *Coniophora puteana* para validación del experimento.

Cuadro 6. Clasificación y resultados de porcentaje de pérdida de masa en la madera de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla* con aplicación de tratamientos térmicos expuestos a hongos xilófagos a temperaturas de 180 ° C y 150 ° C y tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

Temperatura	Tiempo de residencia (Minutos)	<i>T. versicolor</i> <i>P. durangensis</i>		<i>C. puteana</i> <i>P. durangensis</i>		<i>T. versicolor</i> <i>Q. sideroxyla</i>		<i>C. puteana</i> <i>Q. sideroxyla</i>	
		Pérdida de masa (%)	Clase	Pérdida de masa (%)	Clase	Pérdida de masa (%)	Clase	Pérdida de masa (%)	Clase
Control	Control	10.347	1	10.347	1	11.9107	1	11.9107	1
	30	8.385	1	21.4959	2	17.4379	2	4.7586	1
	60	8.356	1	13.447	1	19.016	2	7.9879	1
150°C	90	5.673	1	11.7737	1	17.0183	2	6.2731	1
	120	7.484	1	11.734	1	19.9229	2	5.4594	1
	150	5.201	1	12.3459	1	17.151	2	8.2229	1
	30	7.844	1	6.9309	1	19.9628	2	2.9837	1
180°C	60	4.012	1	12.2528	1	18.1436	2	4.6027	1
	90	6.772	1	6.8277	1	17.4894	2	4.0322	1
	120	7.724	1	7.4054	1	18.4482	2	3.5948	1
	150	6.543	1	10.6898	1	20.2469	2	2.4332	1

### 7.3 Propiedades mecánicas

La figura 22 muestra que el valor de MOE es diferente según los distintos tratamientos aplicados teniendo el valor más bajo en el tratamiento de 180°C y 120 minutos de residencia con un valor de 5075 N/mm<sup>2</sup> y el valor más alto en la misma temperatura y un tiempo de 90 minutos con un valor de 6563 N/mm<sup>2</sup>. El análisis factorial (Cuadro 10) muestra que no existen diferencias significativas ( $p>0.05$ ) en la variable tiempo, la variable temperatura indica que no existen diferencias significativas ( $p>0.05$ ) y sin embargo el mismo análisis muestra diferencias significativas ( $p<0.05$ ) en la interacción Tiempo\*Temperatura.

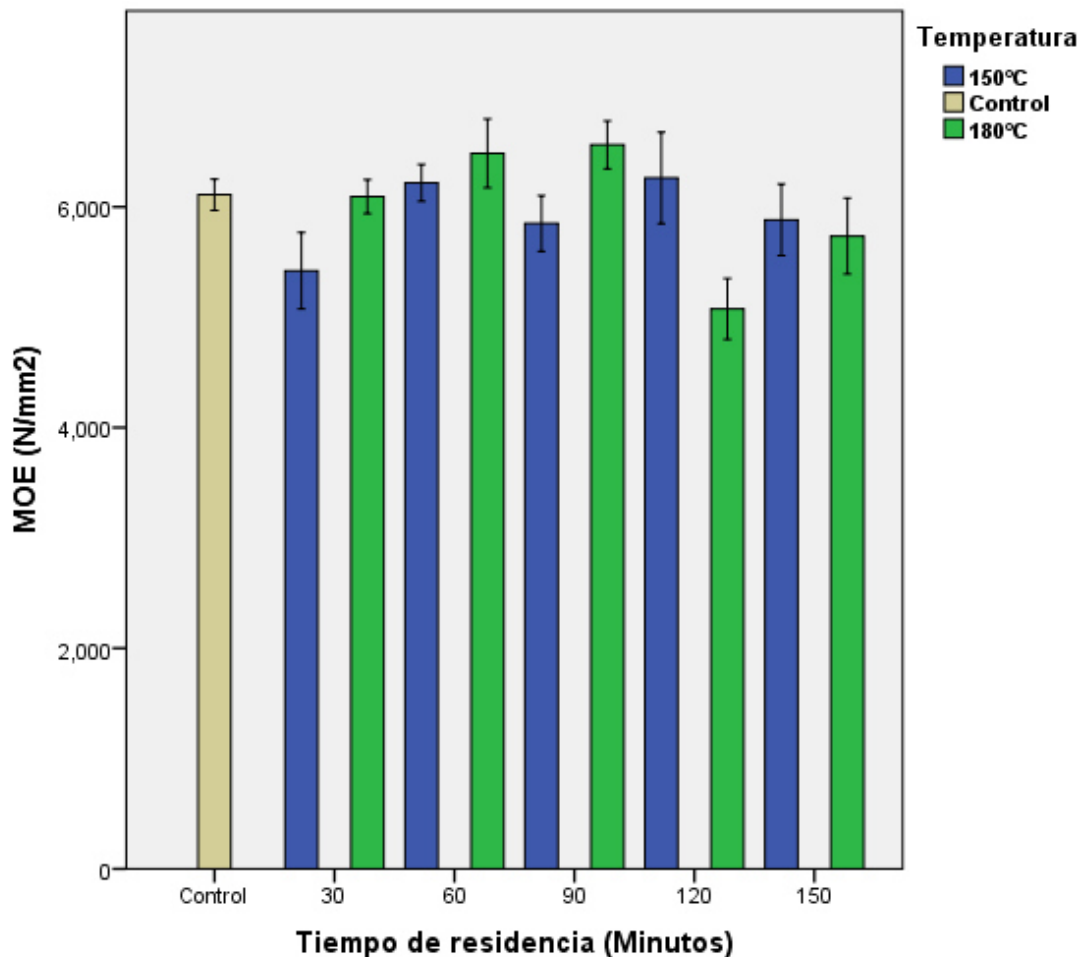


Figura 22. Resultado de MOE en la madera de *Pinus durangensis* expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

La figura 23 muestra los resultados de MOR es variante en los diferentes tratamientos aplicados obteniendo el valor más bajo en el tratamiento térmico de 180°C y 120 minutos de residencia con un valor de 114 N/mm<sup>2</sup> y el valor más alto en la misma temperatura en el tiempo de residencia de 90 minutos con un valor de 134 N/mm<sup>2</sup>. El análisis de varianza (Cuadro 10) no muestra diferencias significativas ( $p>0.05$ ) para las variables de tiempo, temperatura y tampoco para las interacciones de Tiempo\*Temperatura.

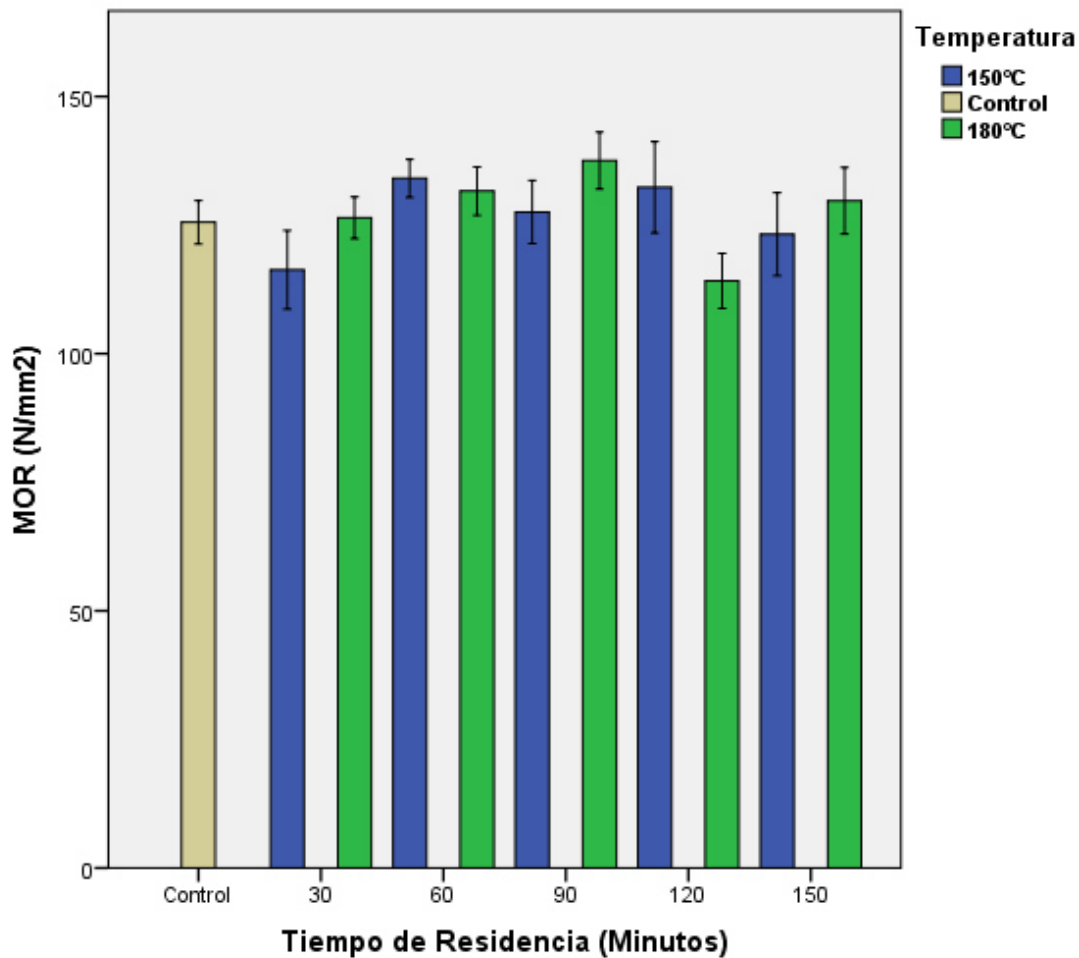


Figura 23. Resultado de MOR en la madera de *Pinus durangensis* expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

La figura 24 muestra el aumento en los valores de compresión más altos para la temperatura de 150°C en el tiempo de residencia de 120 minutos con un valor de 46.56 N/mm<sup>2</sup> y el valor más bajo en la temperatura de 180°C y el tiempo de residencia de 30 minutos con un valor de 27.80 N/mm<sup>2</sup>. El análisis de varianza factorial muestra (Cuadro 10) para la variable tiempo muestra diferencias significativas (p<0.05), de igual manera en el análisis muestra diferencia significativa (p<0.05) para temperatura y el mismo análisis muestra que no existe diferencia significativa (p>0.05) para la interacción Tiempo\*Temperatura.

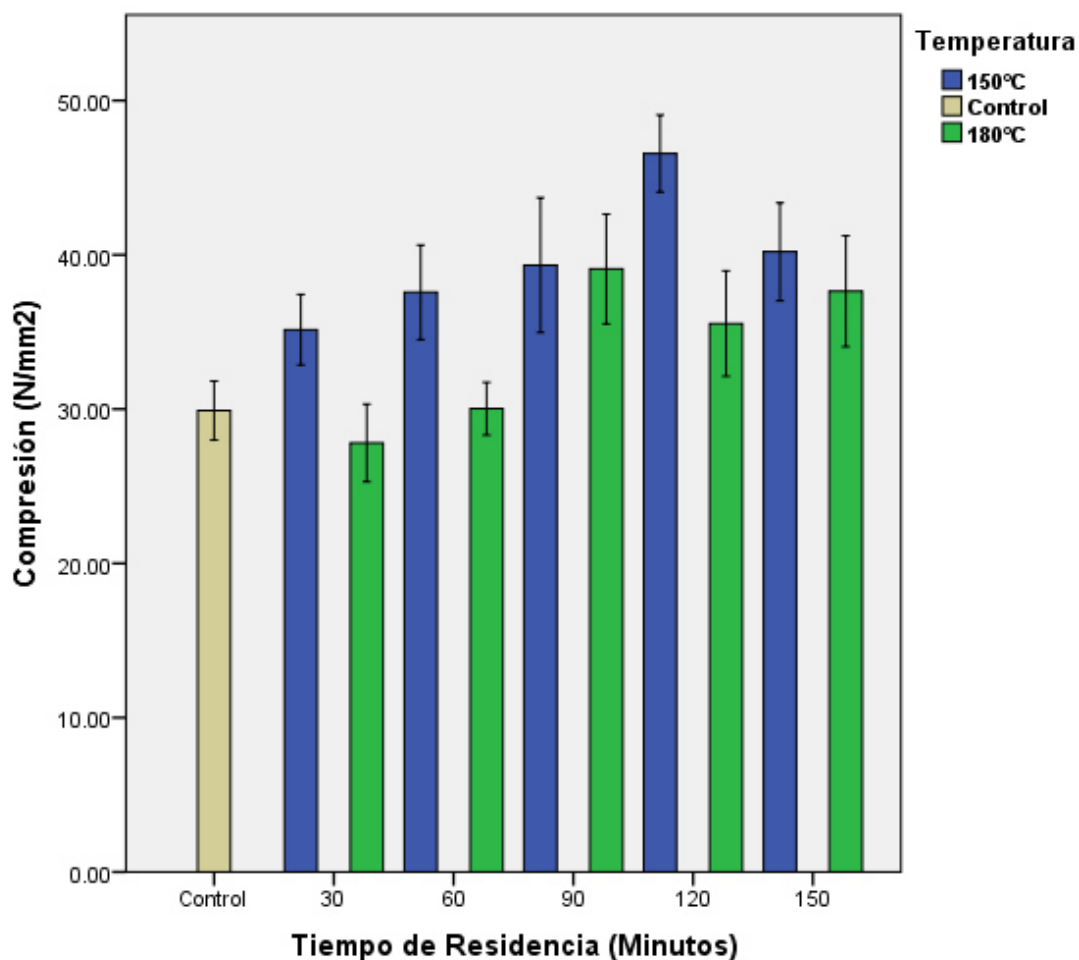


Figura 24. Resultado de compresión en la madera de *Pinus durangensis* expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

La figura 25 muestra que los valores de dureza Janka están por encima del control en todo el tratamiento mostrando el valor más alto en la temperatura de 180°C y el tiempo de residencia de 150 minutos con un valor de 3780 N/mm<sup>2</sup> y el más bajo es de 3126 N/mm<sup>2</sup> en la temperatura de 180°C y tiempo de residencia de 90 minutos. El análisis de varianza (Cuadro 10) muestra diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en las variables de tiempo y temperatura, el mismo análisis muestra que para la interacción Tiempo\*Temperatura no existe diferencia significativa ( $p > 0.05$ ).

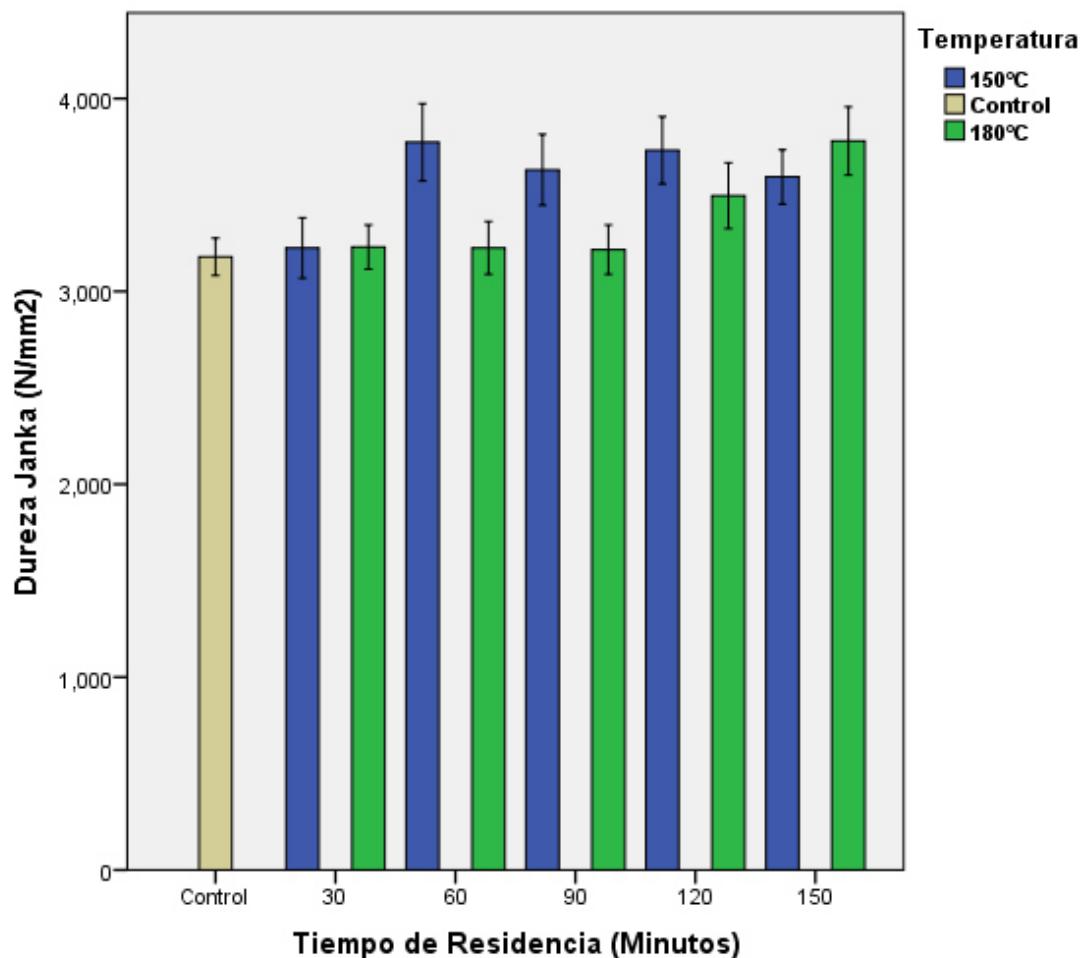


Figura 25. Resultado de la prueba de dureza Janka en la madera de *Pinus durangensis* expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.



La figura 26 muestra los valores de MOE variables en la aplicación del tratamiento teniendo el valor más bajo en la temperatura de 180°C y tiempo de residencia 120 minutos con un valor de 5075 N/mm<sup>2</sup>. El análisis de varianza factorial (Cuadro 11) no muestra diferencias significativas ( $p>0.05$ ) para las variables de tiempo y temperatura, en el mismo análisis muestra que existen diferencias significativas ( $p<0.05$ ) en la interacción Tiempo\*Temperatura..

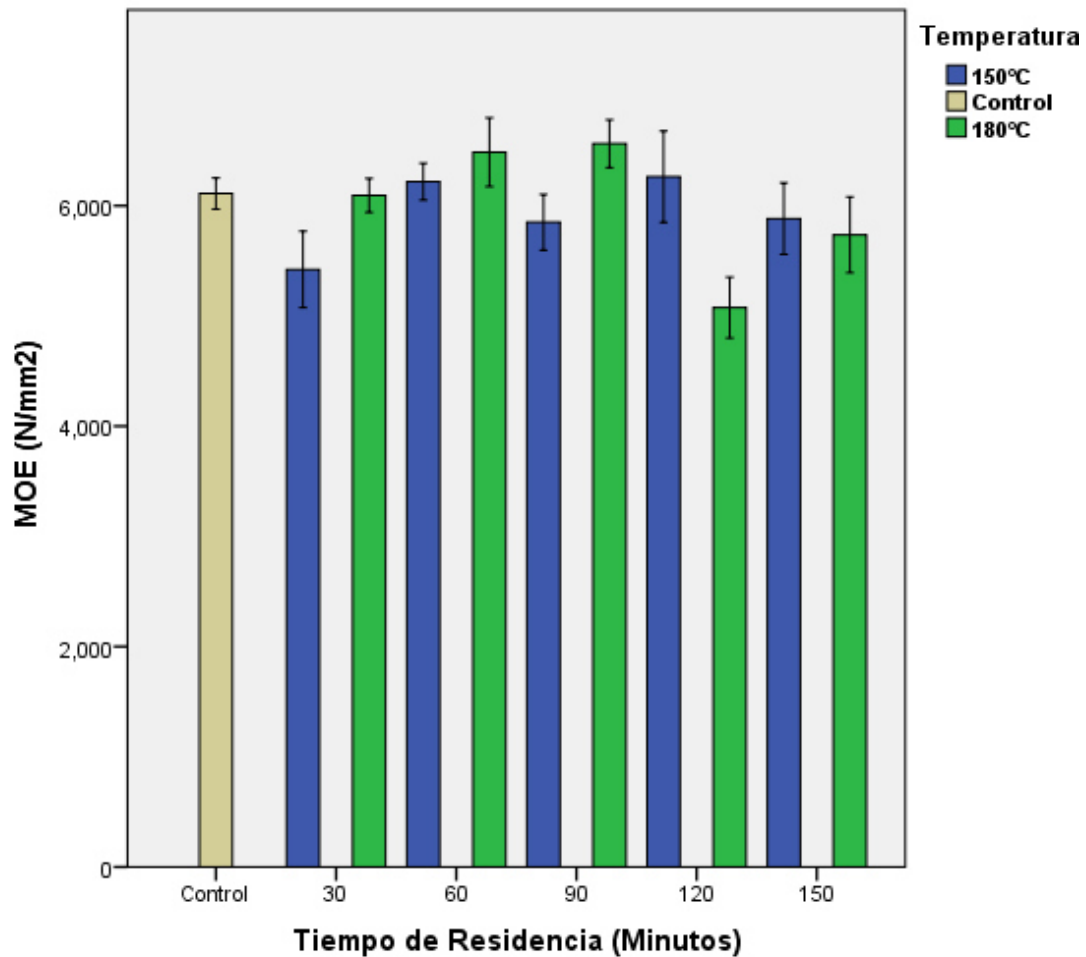


Figura 26. Resultado de MOE en la madera de *Q. sideroxylla* expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

La figura 27 muestra los valores de MOR variables en la aplicación del tratamiento teniendo el valor más bajo en la temperatura de 180°C y tiempo de residencia 120 minutos con un valor de 114 N/mm<sup>2</sup>. El análisis de varianza factorial (Cuadro 11) indica que no existen diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) para ninguna de las variables estudiadas como es tiempo, temperatura y la interacción Tiempo\*Temperatura.

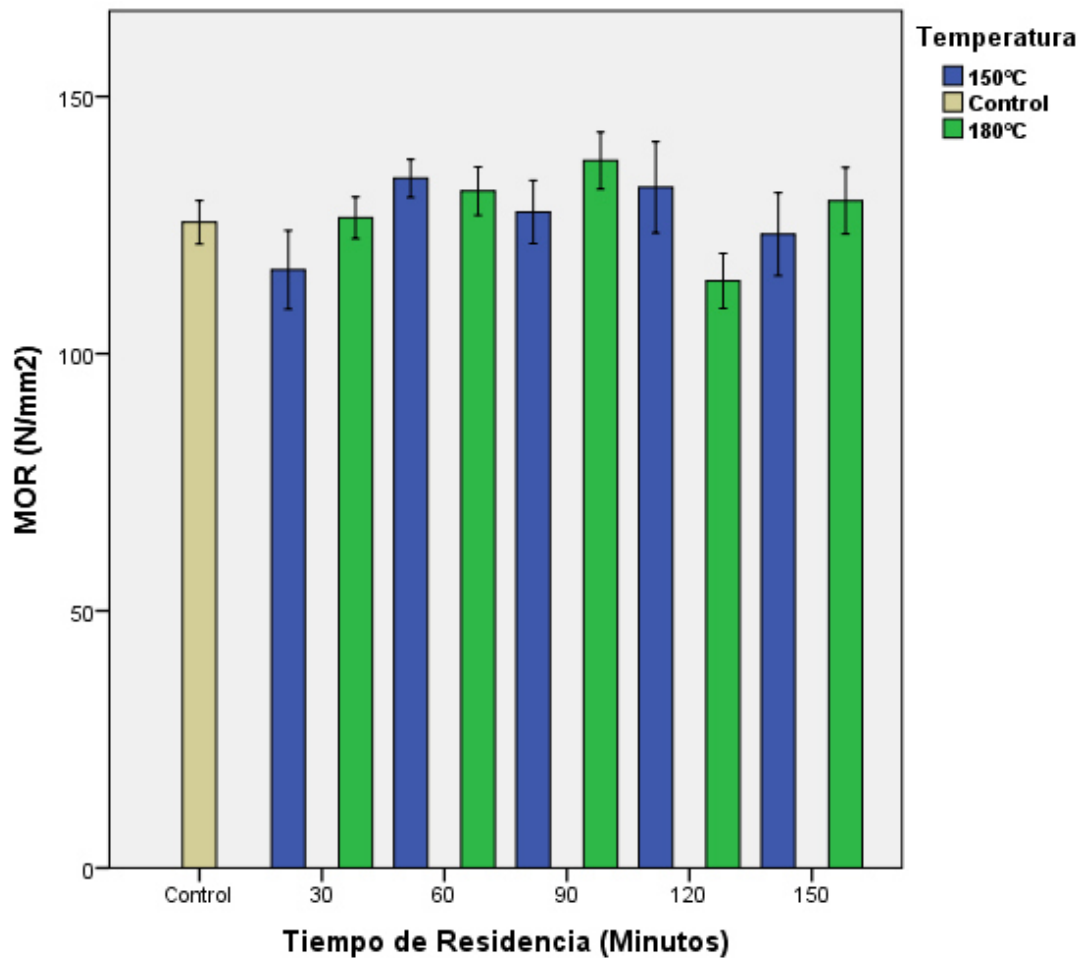


Figura 27. Resultado de MOR en la madera de *Q. sideroxylla* expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

La figura 28 indica que los resultados de compresión al inicio de los tratamientos están por debajo de las pruebas de control más sin embargo en los dos últimos tiempos de residencia se da un ligero aumento en estos valores para ambas temperaturas, el valor más alto fue de 48.10 N/mm<sup>2</sup> en la temperatura de 180°C y 150 minutos de residencia. El análisis de varianza factorial (Cuadro 11) indica que existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) para la variable tiempo, en el mismo estudio indica no existe diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) para la variable temperatura y tampoco para la interacción Tiempo\*Temperatura.

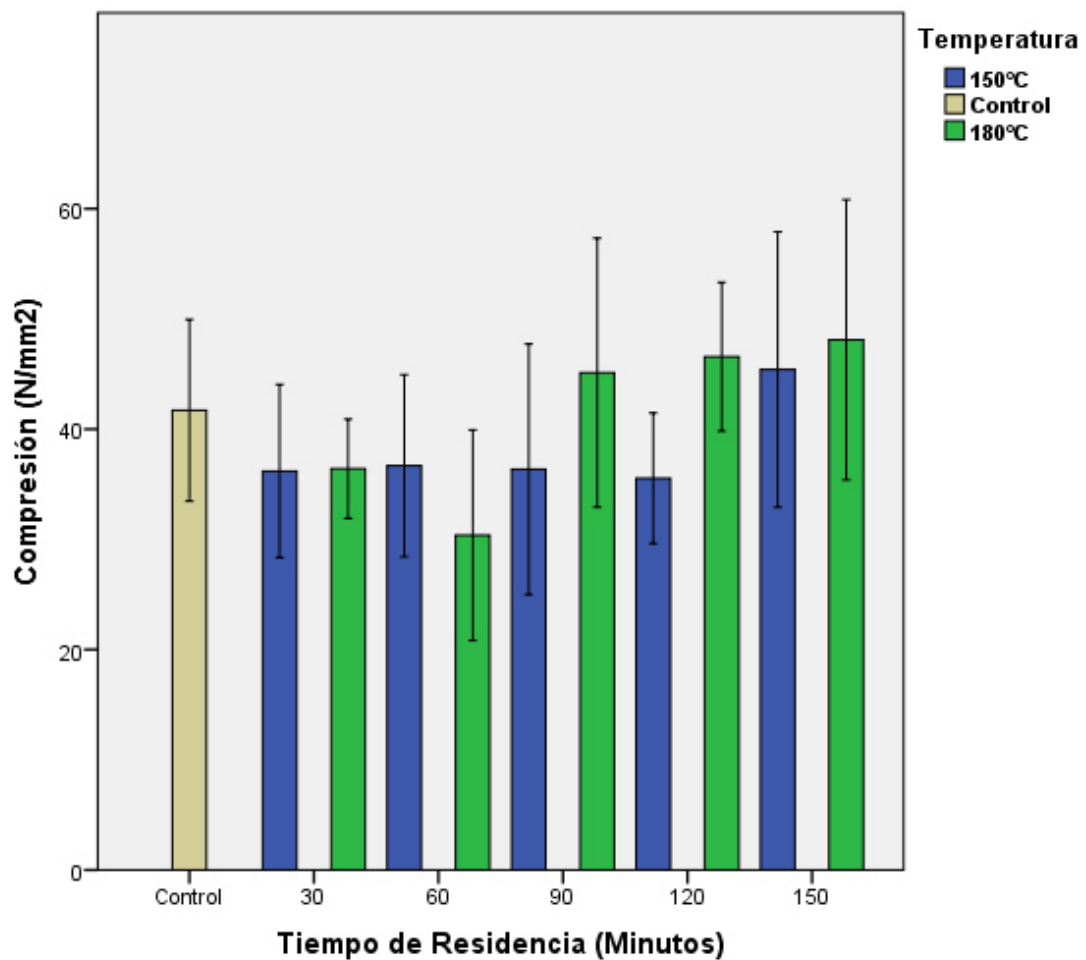


Figura 28. Resultado de compresión en la madera de *Q. sideroxylla* expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

La figura 29 muestra los valores de dureza Janka la mayoría se ve afectado por la aplicación de el tratamiento térmico donde el valor más bajo es de 7168 N/mm<sup>2</sup> en la temperatura de 150°C y tiempo de residencia de 150 minutos. El análisis factorial (Cuadro 11) indica que para la variable tiempo existen diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), para la variable temperatura no existe diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) y el mismo análisis indica que en las interacciones Tiempo\*Temperatura existen diferencias altamente significativas ( $p < 0.001$ ).

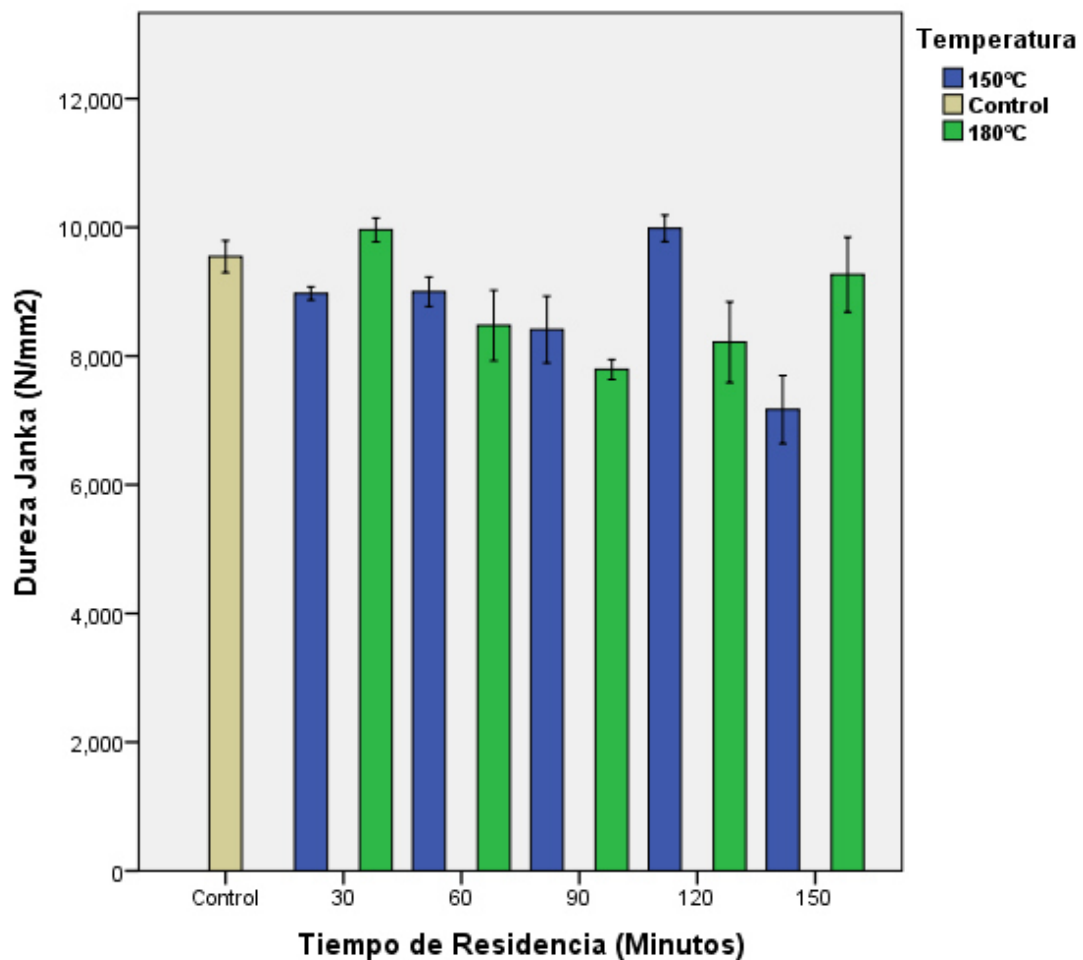


Figura 29. Resultado de la prueba de dureza Janka en la madera de *Quercus sideroxylla* expuesta a tratamiento térmico de 150 y 180°C y tiempos de residencias de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1 Propiedades físicas

El tratamiento térmico en la madera permitió mejorar algunas propiedades, tales como la estabilidad dimensional (Awoyemi *et al.*, 2009; Inoue *et al.*, 1993; Anonimus, 2003; Yildiz, 2002). Con el aumento de la temperatura a 180 ° C y del tiempo de exposición de 150 minutos, se produce una mejora en la estabilidad dimensional para las especies *P. durangensis* y *Q. sideroxyla*.

Para este estudio se obtuvo una mejora en la estabilidad dimensional de la madera *P. durangensis* y *Q. sideroxyla* en temperaturas de 180 ° C y un tiempo de residencia de 150 minutos que fue la temperatura y tiempo de residencia mayor, coincidiendo con lo encontrado por Montesinos (2010), éste autor llevo a cabo tres tratamientos a la madera de *Pinus radiata* D Don. a una temperatura de 160° C con tiempos de residencia de 1, 3 y 5 horas respectivamente, donde los cambios dimensionales de la madera ocurrieron a mayor tiempo del tratamiento pero sin cambios estadísticos significativos en el estudio.

Ariete (2010) estudio los tratamientos térmicos a temperatura de 130, 145 y 160°C con dos horas efectivas de tratamiento. Los resultados obtenidos muestran que a mayor temperatura (160 ° C) existe una reducción del cambio dimensional (1.9 % tangencial). En el presente estudio se encontró un resultado similar en dirección tangencial con una temperatura de 180 ° C y con 150 minutos para la madera de *P. durangensis* con cambio dimensional de 3.1 %, mientras para *Q. sideroxyla* fue de 7.48 %.

### 8.2 Durabilidad ante hongos xilófagos

El origen del incremento en la resistencia a la biodegradación por hongos basidiomicetos en la madera modificada térmicamente no está completamente claro a la fecha, tal y como se observó en el presente ensayo, pero se cree que se debe a los cambios químicos en la madera que reducen la higroscopicidad, impidiendo la

difusión del complejo de enzimas exocelulares que utilizan los hongos para desdoblar los polímeros de la madera (Hill 2006).

El tratamiento aplicado a la madera de *P. durangensis* y expuesto al hongo *Trametes versicolor* muestra pérdida de masa que varía desde 4.01 y 8.38 % que mas sin embargo es menor en comparación con el control que fue de 10.34 % y cuya clasificación es durabilidad 1. La madera de *Pinus durangensis* expuesta al hongo *Coniophora puteana* muestra valores con un rango más variable 6.82 a 21.49 %, los valores más altos fueron en promedio los del tratamiento de 150 ° C y la madera es clasificada como 1 excepto para el tratamiento de 150°C y tiempo de 30 minutos. La madera de *Quercus sideroxylla* con tratamiento térmico expuesta al hongo *Trametes versicolor* muestra pérdida de masa de 17.01 a 20.24%, mayor que el control de 11.91%, en ambos tratamientos y en todos los tiempos de residencia, clasificada como durabilidad 2 excepto para el control que es durabilidad 1.

Como lo mostraron Tjeerdsma *et al.*, (2000); Militz (2008), se requiere de una temperatura de tratamiento de 180°C a 200°C para mejorar la resistencia a la pudrición de la madera de tal forma que se clasifique en una Clase de durabilidad 1 o 2. Finalmente, la madera de *Quercus sideroxylla* expuesta al hongo *Coniophora puteana* mostro valores de 2.43 y 8.22% en pérdida de masa , los cuales no superan el control de 11.91% y es clasificada como 1. Los análisis de varianza no muestran diferencias significativas ( $p>0.05$ ) entre los tratamientos aplicados anteriormente. Varios autores, entre ellos Tjeerdsma *et al.*, (1998), Rapp y Sailer (2000), y Ewert y Scheiding (2005), citado por Militz (2008), han demostrado que la durabilidad de la madera contra los hongos xilófagos se puede mejorar considerablemente mediante la modificación térmica de la madera dependiendo de la especie en cuestión y de las condiciones de tratamiento.

### **8.3 Propiedades mecánicas**

Mouras *et al.*, (2002) realizaron pruebas mecánicas en las maderas de curupixa y álamo lo cual observo en sus experimentos que el valor de MOE no se vio afectado por el tratamiento térmico ( $p>0.05$ ), sin embargo los valores de MOR se ven

disminuidos por el tratamiento térmico. Éstos autores encontraron diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) para esta prueba, algo similar se encontró en éste experimento, en resumen las pruebas realizadas en la madera de *Pinus durangensis* para MOE y MOR, se observa variación en los resultados pero sin tener efectos negativos en la madera ya que no se observan diferencias significativas en los tratamientos. En la prueba de compresión se observa un pequeño aumento en los valores de este ensayo teniendo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en tiempo y temperatura. Los ensayos muestran una mejora en la prueba de dureza Janka observando diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en las variables de tiempo y temperatura.

Para la especie de *Quercus sideroxylla* el MOE se observan resultados variables pero sin tener diferencia significativa ( $p > 0.05$ ), de igual manera para las pruebas de MOR los resultados fueron muy variados pero no se observo diferencia significativa ( $p > 0.05$ ). Los resultados de compresión aumentaron solo en los últimos tiempos de residencia del tratamiento observando diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) solo en la temperatura. Para el ensayo de dureza Janka se observo afectación en la madera observando diferencia significativa en la interacción tiempo\*temperatura. Kesik *et al.*, (2014) realizaron un estudio de dureza Janka a cuatro maderas las cuales fueron aliso negro (*Alnus glutinosa L.*), roble rojo (*Quercus falcata Michx.*), pino del sur (*Pinus taeda L.*) y álamo amarillo (*Liriodendron tulipifera*) encontrando resultados similares a este estudio donde la madera se ve afectada de forma negativa al ser sometida a tratamientos térmicos.

## 9. CONCLUSIONES

- La madera de *P. durangensis* mostró hinchamiento de 1.99 % y 3.1 % en las direcciones radial y tangencial, respectivamente. Éstas están clasificadas como contracción muy pequeña.
- La madera de *Q. sideroxylla* presentó hinchamientos de 1.99 % y 7.48 % en las direcciones radial y tangencial, respectivamente. Estos hinchamientos son clasificados como muy pequeña y moderada.

- La madera de *P. durangensis* se clasifica como estable de acuerdo a su coeficiente de anisotropía de 1.56.
- La madera de *Q. sideroxylla* se clasifica como estable de acuerdo a su coeficiente de anisotropía de 3.75.
- El tratamiento aplicado a la madera de *P. durangensis* y expuesto al hongo *Trametes versicolor* muestra pérdida de masa que varía desde 4.01 y 8.38 % y clasificada como durabilidad 1.
- La madera de *Pinus durangensis* expuesta al hongo *Coniophora puteana* muestra valores más variables que van desde 6.82 a 21.49% y la madera es clasificada como 1 excepto para el tratamiento de 150°C y tiempo de 30 minutos.
- La madera de *Quercus sideroxylla* con tratamiento térmico expuesta al hongo *Trametes versicolor* muestra pérdida de masa de 17.01 a 20.24%, mayor que el control de 11.91%, en ambos tratamientos y en todos los tiempos de residencia, clasificada como durabilidad 2 excepto para el control que es durabilidad 1.
- La madera de *Quercus sideroxylla* expuesta al hongo *Coniophora puteana* mostro valores de 2.43 y 8.22% en pérdida de masa , los cuales no superan el control de 11.91% y es clasificada como 1. Los análisis de varianza no muestran diferencias significativas ( $p>0.05$ ) en ninguno de los tratamientos aplicados en cuanto a pérdida de masa.
- . Los resultados obtenidos de análisis de varianza factoriales indican para el MOE y MOR no se ven afectados por el tratamiento más sin embargo hay variaciones para ambas especies sin observar diferencias significativas ( $p>0.05$ ),
- En las pruebas de compresión se observo un efecto positivo en las dos especies estudiadas mostrando diferencias significativas ( $p<0.05$ ).
- En cuanto a los valores de dureza Janka de la especie de *Quercus sideroxylla* se vio afectado negativamente mostrando diferencias significativas ( $p<0.05$ ) en la interacción tiempo\*temperatura.



- La especie de *Pinus durangensis* se observó un aumento de los valores en dureza Janka encontrando diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en las variables temperatura y tiempo.

## 10. RECOMENDACIONES

- Realizar experimentación con otras especies maderables con el fin de investigar su desempeño mecánico, estabilidad dimensional y su posible incremento en la resistencia a la pudrición.
- Continuar el estudio de las técnicas y equipos necesarios para realizar la modificación térmica de la madera.
- Realizar pruebas de exposición a la intemperie, por ejemplo, pruebas cementerio en campo.
- Investigar la respuesta de otras especies a pruebas de biodegradación con otros hongos, insectos y termitas.
- Realizar estudios sobre los cambios de coloración de la madera tratada térmicamente.

## 11. LITERATURA CONSULTADA

Ahajji, A., Diouf, P. N., Aloui, F., Elbakali, I., Perrin, D., Merlin, A., & George, B. (2009). Influence of heat treatment on antioxidant properties and colour stability of beech and spruce wood and their extractives. *Wood Science and Technology*, 43(1-2), 69-83.

Alen R, Kotilainen R, Zaman A. Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180-225°C. *Wood Sci Technol* 2002; 36 : 163-71.

Anonymous, 2003. ThermoWood Handbook, Finnish Thermowood Association, c/o Wood Focus Oy, P.O. Box (Snellmaninkatu 13), FIN-00171 Helsinki, Finland. 284.

Ariete M. N. A. (2010) Caracterización de madera de *Pinus radiata* D. Don sometido a un proceso de modificación térmica usando un ambiente de inmersión. Universidad Austral de Chile, Fac. De Cs. Forestales. Pp 20-25.

Arizaga, S.; Martinez C. J.; Salcedo C. M.; Bello C. M. A.; (2009). *Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos*. Instituto Nacional de Ecología. México pp 122-125.

Ayadi N, Lejeune F, Charrier F, Charrier B, Merlin A. Color stability of heat treated wood during artificial weathering. *Holz Roh Werkst* 2003; 61 : 221-6.

Awoyemi L.; Jarvis C.; Hapca A. 2009. Effects of preboiling on the acidity and strength properties of heat-treated Wood. *Wood Sci., Technol.*, 43: 97–103.

Bekhta, P., & Niemz, P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*, 57(5), 539-546.

Bluth SA (2010) Modificación térmica de la madera. *Lignum: Bosque, Madera y Tecnología*. 20(122):53-59.

Boonstra, M.; Acker, A.; Kegel, E.; Stevens, M. 2007. Optimization of a two-stage heat treatment process: durability aspects. *Wood Sci., Technol.*, 41:31–57.

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. *Polymer Degradation and Stability*, 95 (12), 2255-2259.

DIN 52 184. 1979. Prüfung von Holz. Bestimmung der Quellung und Schwindung. DIN Taschenbuch 31. Holznormen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth Verlag gmbh – Berlin. Pp. 70-73.

Duchez, L., & Guyonnet, R. (1998). Principles & applications of wood retification. In *5TH WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING* (Vol. 2, pp. 648-653).

Eaton, R.A., Halle, M.D.C., 1993. *Wood: decay, pests and protection*. Chapman & Hall. London. 546pp.

Esteves B, Graça J, Pereira H. Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. *Holzforschung* 2008; 62 : 344-51.

García, A. y González, M.S. (2003). Pináceas de Durango. Instituto Nacional de Ecología, A.C. y Comisión Nacional Forestal. México. 34-37.

Gunduz, G., Korkut, S., & Korkut, D. S. (2008). The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyanı Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood. *Bioresour Technol*, 99(7), 2275-2280.

HERMOSO PRIETO, E., MATEO CAMPOS, R., CABRERO ROJO, J. C., & FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J. I. (2013, June). Tratamientos térmicos versus propiedades mecánicas en madera de Pino radiata. In *Congresos-CARGA FINAL*.4-9.

Hill CAS (2006) Wood modification. Chemical, thermal and other processes. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. pp 1-44, 99-127, 175-199.

Honorato S. J. Amador; Vázquez, Silva, Luis; Zamudios, Sánchez, Francisco J.. (2001). Durabilidad natural de la madera de cinco especies de *Quercus* del estado de Puebla . *Polibotánica*, diciembre, 85-100.

Inoue, M., Norimoto, M., Tanahashi, M., Rowell, R.M., 1993. Steam or heat fixation of compressed wood. *Wood and Fiber Science* 25 (3), 224–235.

Juacida, R; Quintanar, J. 1992. Protección de la madera: Agentes causales de degradación. Durabilidad natural. Publicación docente N°37. Universidad Austral de Chile.26 p.

Kesik, H. I., Korkut, S., Hizirolu, S., & Sevik, H. (2014). An evaluation of properties of four heat treated wood species. *Industrial Crops and Products*, 60, 60-65.

Kocaefe D, Poncsak S, Boluk Y. Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen. *BioResources* 2008; 3 (2) : 517-37.

Kocaefe, D.; Poncsak, S.; Tang, J.; Bouazara, M. 2006. Effect of heat treatment on the mechanical properties of North American jack pine: thermo gravimetric study. *J Mater Sci*. 40:647–663.

LARSSON, P. y TILLMAN, A.M.; 1989. Acetylation of lignocellulosic materials. The International Research Group on Wood Preservation. Document no. IRG/WP/3516..

Mazela, B., Zakrzewski, R., Grześkowiak, W., Cofta, G., & Bartkowiak, M. (2004). Resistance of thermally modified wood to basidiomycetes. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 7(1), 253-262.

Medina, Juan Carlos; Pan, Estela; Juárez, Margarita; Umlandt, Maximiliano estabilización térmica de la madera de *Pinus elliottii* Engelm. Var. *Elliottii* Foresta Veracruzana, vol. 15, núm. 2, septiembre-febrero, 2013, pp. 15-22. Recursos Genéticos Forestales Xalapa, México.

Militz, H., 2002. Thermal treatment of wood: European processes and their background. IRG/WP 02-40241. In: 33rd Annual Meeting, May 12-17, Cardiff-Wales 4, pp. 1-17.

Militz H (2008) Process and properties of thermally modified wood manufactured in Europe. En: Schulz T, Militz H, Freeman MH, Goodell B, Nicholas DD, Ed. Development of commercial wood preservatives. Washington, DC: ACS. pp 372-388

Mitsui K, Takada H, Sugiyama M, Hasegawa R. Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: Part 1. Effect of treatment conditions on the change in colour. *Holzforschung* 2001; 55 : 601-5.

Montecinos P. I.T. 2010 Estudio de la variable tiempo de una hidrotermólisis en las características y propiedades de la madera de *Pinus radiata*. Universidad Austral de Chile, Fac. De Cs. Forestales. Pp 12-20.

Mouras S, Girard P, Rousset P, Permadi P, Dirol D, Labat G. Propriétés physiques de bois peu durables soumis à un traitement de pyrolyse ménagée. *Ann For Sci* 2002; 59 : 317-26.

Muñoz-Acosta, F., & Moreno-Perez, P. A. (2013). Contracciones y propiedades físicas de *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L. F. Y *Terminalia amazonia* A. Chev, maderas de plantación en Costa Rica. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(2), 287-304.

Nguila Inari G, Pétrissans M, Lambert JL, Erhardt JJ, Gérardin P. XPS characterization of wood chemical composition after heat treatment. *Surf Interf Anal* 2006; 38 : 1336-42.

Nguila Inari G, Pétrissans M, Gérardin P. Chemical reactivity of heat treated wood. *Wood Sci Technol* 2007; 41 : 157-68.

Ortega Santillán, L. A. (2011). Modificación térmica y evaluación de las propiedades mecánicas y resistencia biológica de la madera de *Hevea brasiliensis*. 88 p.p.

Råberg, U., Edlund, M. L., Terziev, N., Land, C. J., 2005. Testing and evaluation of natural durability of wood in above ground conditions in Europe. *Journal of Wood Science*. 429-440.

RUYTER, H.P.; 1989. European patent Appl. No. 89-203170.9 SAILER, M.; RAPP, A. O. y LEITHOFF, H.; 2000. Improved resistance of Scots pine and spruce by application of an oil-heat treatment. IRG/WP/00-40172, 16p.

Salca, E. A., & Hiziroglu, S. (2014). Evaluation of hardness and surface quality of different wood species as function of heat treatment. *Materials & Design*, 62, 416-423.

Sanzana, C. I. C. (2011) Biodegradación de madera de *Pinus radiata* D. Don modificada térmicamente. 1-36.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2014). *Anuario estadístico de la producción forestal 2013*. Semarnat. México. 236.

Silva, J.C., A.G.C. Lopez y J.TS. Oliveira. 2004. Influência da idade na resistência natural da madeira de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex. Maiden ao ataque de cupim de madeira seca (*Cryptotermes brevis*). *Árvore*, 28 (4): 583-587.

Syrjanen, T., Oy, K., 2001. Production and classification of heat-treated wood in Finland, Review on heat treatments of wood. In: Proceedings of the Special Seminar Held in Antibes, France. (Vol. 9).

SYRJANEN, T., OY, K., JAMSA, S. y VIITANIEMI, P.; 2000. Heat treatment wood in Finland – state of the art. *Nordic Wood*: 1-12.

Tjeerdsma B, Militz H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holz Roh Werkst* 2005; 63 : 102-11.

Tomak, E. D., Ustaomer, D., Yildiz, S., & Pesman, E. (2014). Changes in surface and mechanical properties of heat treated wood during natural weathering. *Measurement*, 53, 30-39.

VERNOIS, M.; 2001. Heat treatment of wood in France - State of the art. In: Review on heat treatments of wood, Proceedings of the special seminar of COST Action E22, Antibes, France. VEGA A.; BAÑO V.; MAJADA J.; FDEZ-PARRADO I. y GUAITA M.; 2011. Caracterización de la madera de *Castanea sativa* Mill. de procedencia española. Coimbra, Portugal. CIMAD 11 - 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção. Vol S28-T5-3.

VERNOIS, M.; 2004. Menz Holz: une première unité industrielle de traitement oléothermique CTBA Info 104:25-27.

Viitanen, H., Jämsä, S., Paajanen, L., Nurmi, A., & Viitaniemi, P. (1994). The effect of heat treatment on the properties of spruce. A preliminary report. *Document-the International Research Group on Wood Preservation (Sweden)*.

Weiland, J.J., Guyonnet, R., 1997. Retifiziertes Holz. 16. Verdichter Holzbau in Europa. Motivation, Erfahrung, Entwicklung. Dreilander Holztagung. 10. Joanneum Research. 193-208.

Yildiz, S., 2002. Physical, mechanical, technological and chemical properties of beech and spruce wood treated by heating. Ph.D. Dissertation, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey. 1762-6.

Yıldız, S., Gezer, E.D., Yıldız, U.C., 2006. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and Environment* 41 (12), 1762-1766.

## ANEXO

Cuadro 7. Resultado del análisis de varianza factorial de hinchamiento de la madera de *P. durangensis* en dirección tangencial, radial y longitudinal, y contenido de humedad sometida a los tratamientos térmicos de 180 ° C y 150 ° C y a los tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

Fuente de Variación	Tangencial			Radial			Longitudinal			C.H.		
	CM	F	Pr(>F)	CM	F	Pr(>F)	CM	F	Pr(>F)	CM	F	Pr(>F)
Tiempo	2.445	1.545	0.191	0.5	0.521	0.72	3.896	1.718	0.148	152.22	0.781	0.539
Temperatura	110.64	69.93	0	7.28	7.59	0.007	5.882	2.594	0.109	36984	189.85	0
Tiempo*												
Temperatura	2.396	1.515	0.2	0.37	0.392	0.814	3.119	1.375	0.245	94.70	0.486	0.746
Error	1.582			0.95			2.267			194.80		

C.M.=Cuadrado Medio, F= Valor de F, Pr (>F)=Probabilidad.

. Cuadro 8. Resultado del análisis de varianza factorial de hinchamiento de la madera de *Quercus sideroxylla* en dirección tangencial, radial y longitudinal, y contenido de humedad sometida a los tratamientos térmicos de 180°C y 150°C y los tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

Fuente de Variación	Tangencial			Radial			Longitudinal			C.H.		
	CM	F	Pr(>F)	CM	F	Pr(>F)	CM	F	Pr(>F)	CM	F	Pr(>F)
Tiempo	33.161	3.952	0.004	2.277	1.409	0.233	0.446	2.01	0.095	73.366	0.95	0.437
Temperatura	760.342	90.619	0	61.438	38.018	0	0.393	1.774	0.185	3124.9	40.462	0
Tiempo*												
Temperatura	27.889	3.324	0.012	2.458	1.521	0.198	0.599	2.701	0.032	90.024	1.166	0.328
Error	8.391			1.616			0.222			77.231		

C.M.=Cuadrado Medio, F= Valor de F, Pr (>F)=Probabilidad.

Cuadro 9. Resultado del análisis de varianza factorial de pérdida de masa en la madera de *P. durangensis* y *Q. sideroxylla* expuesta a hongos xilófagos con tratamientos térmicos de 180 ° C y 150 ° C y a los tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

Fuente de Variación	<i>T. versicolor</i> <i>P. durangensis</i>			<i>C. puteana</i> <i>P. durangensis</i>			<i>T. versicolor</i> <i>Q. sideroxylla</i>			<i>C. puteana</i> <i>Q. sideroxylla</i>		
	CM	F	Pr(>F)	CM	F	Pr(>F)	CM	F	Pr(>F)	CM	F	Pr(>F)
Tiempo	17.765	.648	.630	79.864	.584	.675	9.484	.205	.935	14.853	.256	.905
Temperatura	4.370	.159	.690	641.115	4.691	.032	12.621	.273	.602	203.997	3.520	.063
Tiempo*												
Temperatura	23.913	.872	.483	131.667	.963	.431	18.352	.397	.810	12.708	.219	.927
Error	27.422			136.683			46.175			57.950		

C.M.=Cuadrado Medio, F= Valor de F, Pr (>F)=Probabilidad.

Cuadro 10. Resultado del análisis de varianza factorial de MOE, MOR, compresión y dureza Janka en la madera de *Q. sideroxylo* expuesta a tratamiento térmico de 180 ° C y 150 ° C y a los tiempos de residencia de 30, 60, 90, 120 y 150 minutos.

Fuente de Variación	MOE			MOR			Compresión			Dureza Janka		
	CM	F	Pr(>F)	CM	F	Pr(>F)	CM	F	Pr(>F)	CM	F	Pr(>F)
Tiempo	907603.331	2.362	0.066	276.965	1.433	0.237	458.086	3.557	0.008	956659.653	2.599	0.038
Temperatura	50749.794	0.132	0.718	17.913	0.093	0.762	1124.788	8.733	0.004	1516989.84	4.121	0.044
Tiempo* Temperatura	1528118.84	3.977	0.007	358.925	1.857	0.133	124.398	0.966	0.428	673499.415	1.83	0.125
Error	384261.743			193.29			128.796			368089.726		

C.M.=Cuadrado Medio, F= Valor de F, Pr (>F)=Probabilidad.