



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



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

Tesis

**Efecto del termotratamiento en aceite en las propiedades físicas y mecánicas de la madera *Acrocarpus fraxinifolius***

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

Présenta :

**Essoh Aimé Césaire Elékou**

Director de Tesis

Dr. Raúl Espinoza Herrera

Morelia, Michoacán, mayo de 2019

## RESUMEN

La madera termotratada es una madera que ha sido sometida a altas temperaturas lo que provoca una modificación en su estructura volviéndola estable dimensionalmente, con un cambio de coloración, se vuelve hidrofóbica y presenta alta durabilidad biológica, aunque en algunas ocasiones disminuye las propiedades mecánicas. En el presente trabajo, se analizó el efecto de tres diferentes temperaturas de termotratamiento sobre algunas propiedades físicas (densidad, absorción) y mecánicas (flexión estática, compresión y dureza) de la madera de *Acrocarpus fraxinifolius* usando como medio de transferencia del calor el aceite a 180, 200 y 220° C en un intervalo de 2.5 horas. Para ello, tras secar la madera en condiciones naturales, se sacaron varias probetas basándose en diferentes normas ISO (International Organization for Standardization). Los resultados muestran que la madera de color blanco a blanco amarillento con jaspeaduras beige anaranjado y rosa a naranja pálido con jaspeaduras más oscuras después de ser tratada a 180, 200 y 220°C se veía similar a maderas tropicales. También presenta un aumento de 4.48% de la densidad con respecto al testigo a una temperatura de tratamiento de 200°C. La absorción de agua de la madera presentó un incremento, aunque a medida que fue aumentando la temperatura del tratamiento, se fue disminuyendo la absorción de agua siendo mejores los resultados a 200°C. La dureza longitudinal a 180, 200 y 220° C presentó una disminución de 6.82, 0.30 y 2.40% respectivamente con respecto a la madera sin tratamiento mientras que la dureza lateral presentó un incremento de 15.45% a 200°C. Se incrementó el MOE en flexión de 11,39% a 200° y el MOR en flexión incrementó de 24.19%. El esfuerzo al límite de proporcionalidad (ELP) presentó un incremento de 23.15 y 23.78% a 200 y 220°C respectivamente. La resistencia a la compresión (MOR) presentó un incremento de 39.39, 31.66 y 35.07% a temperaturas de 180, 200 y 220°C, respectivamente.

**PALABRAS CLAVE:** TERMOTRATAMIENTO, PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES (PFC), *Acrocarpus fraxinifolius*, PROPIEDADES FISICAS, PROPIEDADES MECANICAS.

## ABSTRACT

Heat-treated wood is a wood that has been subjected to high temperatures which causes a modification in its structure, making it dimensionally stable, with a change in coloration. It becomes hydrophobic and has high biological durability. Although, it also affects sometimes the mechanical properties by decreasing them. In the present work, the effect of three different thermal treatment temperatures on some physical properties (density, absorption,) and mechanical properties (static bending, compression and hardness) of the *Acrocarpus fraxinifolius* wood was analyzed, using oil at 180, 200 and 220° C in an interval of 2.5 hours. To do this, after drying the wood under natural conditions, several specimens were taken based on different ISO standards (International Organization for Standardization). The results show that the white to yellowish white wood with beige and orange and pink to pale orange marbling with darker marbling after being treated at 180, 200 and 220° C, looked similar to tropical woods. It also presents a 4.48% increase in density with respect to the control at a treatment temperature of 200°C. The water absorption of the wood showed an increase, although as the temperature of the treatment increased, the water absorption decreased, the results being better at 200°C. The hardness at 180, 200 and 220°C showed a decrease of 6.82, 0.30 and 2.40% respectively with respect to the untreated wood while the lateral hardness showed an increase of 15.45% at 200°C. The MOE in flexion of 11.39% was increased to 200°C and the MOR in flexion increased of 24.19%. The effort to the proportionality limit (ELP) presented an increase of 23.15 and 23.78% at 200 and 220°C respectively. The resistance to compression (MOR) showed an increase of 39.39, 31.66 and 35.07% at temperatures of 180, 200 and 220°C

## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN .....   | 1  |
| 2. ANTECEDENTES .....   | 3  |
| 2.1. Plantaciones Forestales Comerciales .....  | 3  |
| 2.2. Generalidades sobre la especie.....  | 4  |
| 2.2.1 Plantaciones Forestales Comerciales de la especie .....                                 | 6  |
| 2.2.2 Problemática ligada a la madera proveniente de plantaciones forestales comerciales..... | 7  |
| 2.3. Termotratamiento.....  | 8  |
| 3. JUSTIFICACIÓN.....   | 15 |
| 4. HIPÓTESIS.....   | 15 |
| 5. OBJETIVOS .....  | 16 |
| 5.1 Objetivo general.....   | 16 |
| 5.2 Objetivos específicos.....  | 16 |
| 6. MATERIALES Y MÉTODOS.....  | 17 |
| 6.1 Procedencia y características del material utilizado .....                                | 17 |
| 6.2 Proceso de termotratamiento en aceite (OHT) .....   | 18 |
| 6.3 El cambio de coloración por efecto del termotratamiento de la madera .....                | 18 |
| 6.4 Realización de pruebas físicas.....   | 18 |
| 6.4.1 Densidad.....   | 18 |
| 6.4.2 Contenido de humedad.....   | 19 |
| 6.4.3 Absorción de agua.....  | 19 |
| 6.5 Realización de pruebas mecánicas.....   | 20 |
| 6.5.1 Flexión estática.....   | 20 |
| 6.5.2 Compresión paralela a la fibra .....  | 21 |

|  |    |
|--|----|
| 6.5.3 Dureza Janka .....   | 22 |
| 6.6 Análisis estadístico .....   | 22 |
| 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....   | 23 |
| 7.1 El cambio de coloración por efecto del termotratamiento de la madera ..... | 23 |
| 7.2 Pruebas físicas .....  | 24 |
| 7.2.1 Densidad.....  | 24 |
| 7.2.2 Absorción de agua.....   | 25 |
| 7.3 Propiedades mecánicas.....   | 27 |
| 7.3.1 Flexión estática.....  | 27 |
| 7.3.2 Compresión paralela a la fibra .....                                     | 30 |
| 7.4 Dureza Janka .....   | 32 |
| 7.4.1 Dureza transversal y lateral.....  | 32 |
| 8. CONCLUSIONES .....  | 34 |
| 9. RECOMENDACIONES .....   | 35 |
| 10. BIBLIOGRAFÍA.....  | 36 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Densidad ( $\text{g/cm}^3$ ) de la madera en función de la temperatura.....                            | 25 |
| Tabla 2. Absorción de agua en dos horas a diferentes temperaturas.....  | 26 |
| Tabla 3. Absorción de agua en 24 horas a diferentes temperaturas .....  | 27 |
| Tabla 4. Absorción de agua en 48 horas a diferentes temperaturas .....  | 27 |
| Tabla 5. MOE en flexión de la madera a diferentes temperaturas ( $\text{kg/cm}^2$ ) .....                       | 28 |
| Tabla 6. MOR en flexión de la madera a diferentes temperaturas ( $\text{kg/cm}^2$ ) .....                       | 29 |
| Tabla 7. ELP en flexión de la madera a diferentes temperaturas ( $\text{kg/cm}^2$ ) .....                       | 30 |
| Tabla 8. $\sigma_{LP}$ en compresión paralela de la madera a diferentes temperaturas ( $\text{kg/cm}^2$ ) ..... | 31 |
| Tabla 9. Dureza transversal de la madera a diferentes temperaturas ( $\text{kg/cm}^2$ ).....                    | 32 |
| Tabla 10. Dureza lateral de la madera a diferentes temperaturas ( $\text{kg/cm}^2$ ) .....                      | 33 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Hojas y corteza de <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> .....  | 5  |
| Figura 2: A) Flores y B) Vainas y semillas de <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> , Menedez, (s.f).....   | 5  |
| Figura 3: <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> : A) Árbol y ramas. B) Veteado de la madera. C) Corteza. D) Hojas. E) Plantación de <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> en el municipio de Múgica, Michoacán, Muñoz et al. (2012). .....  | 6  |
| Figura 4: El árbol de <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> y mapa de Ario de Rosales.....  | 17 |
| Figura 5: Cambio de coloración de la madera de <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> después de ser tratada a 180, 200 y 220°C y su parecido con otras maderas: 1) Testigo, 2) A y B la madera tratada a 180 y 200°C y C madera de <i>Terminalia amazonia</i> similar a la madera tratada. 3) A, madera tratada a 220°C, B, C y D maderas de <i>Tectona grandis</i> , <i>Vatairea lundelli</i> y <i>Lysiloma latilisiquum</i> similares a la madera tratada a 220°C. .... | 24 |
| Figura 6: Variación de la densidad de la madera en función de la temperatura.....   | 25 |
| Figura 7: Absorción de agua en 2, 24 y 48 horas a diferentes temperaturas .....   | 27 |
| Figura 8: Variación del MOE en flexión en función de los tratamientos.....  | 28 |
| Figura 9: Variación del MOR en flexión en función de los tratamientos .....   | 29 |
| Figura 10: Variación del ELP en flexión en función de los tratamientos .....  | 30 |
| Figura 11: Variación del $\sigma_{LP}$ en compresión en función de los tratamientos .....   | 31 |
| Figura 12: Variación de la dureza transversal y lateral de la madera a diferentes temperaturas.....   | 33 |

## ABREVIACIONES

Abs. A.: Absorción de agua

C. H. E.: Contenido de humedad en equilibrio

C. H.: Contenido de humedad

CONAFOR: Comisión Nacional Forestal

ELP: Esfuerzo al límite de proporcionalidad

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Siglo en inglés)

INIFAP: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

MOE: Módulo de elasticidad

MOR: Módulo de ruptura

PFC: Plantaciones forestales comerciales

PRODEPLAN: Programa para el desarrollo de plantaciones forestales comerciales

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

$\sigma$ LP: Esfuerzo en el límite proporcional

## 1. INTRODUCCIÓN

La madera debido a su importancia como recurso natural renovable, ha sido testigo del desarrollo de la vida humana desde sus orígenes. Las propiedades y características excelentes de la madera le hacen diferente a muchos otros materiales. La madera inicialmente fue empleada como combustible para producir fuego, para fabricación de utensilios, armas para la caza, la guerra y para la construcción de viviendas. Debido a la gran diversidad de aplicaciones de la madera, actualmente cada día se ha ido perdiendo buena parte de la fuente de abastecimiento de la madera.

Cabe mencionar que una plantación forestal comercial (PFC) es el establecimiento y manejo de especies forestales en terrenos de uso agropecuario o terrenos que han perdido su vegetación forestal natural, con el objeto de producir materias primas maderables y no maderables, para su industrialización y/o comercialización (CONAFOR, 2015). El programa Sectorial 1995-2000, contemplaba el establecimiento de plantaciones forestales comerciales, como una de las opciones más viables para incrementar la productividad del sector y reducir la presión en el uso de los bosques naturales (CONAFOR, 2003). Martínez et al. (2005) afirman que la finalidad de estas plantaciones es sobre todo para la producción industrial o para uso doméstico como postes de construcción, leña y forraje. Sin dejar de mencionar los beneficios ambientales. Según FAO (2010), las plantaciones forestales alcanzan los 264 millones de hectáreas al nivel mundial. CONAFOR (2008) comenta que en México la superficie cubierta por PFC de diversas especies a nivel nacional alcanza aproximadamente 117 479 ha. Expuesto a esta realidad, toca resaltar la importancia que han cobrado las plantaciones forestales tanto al nivel nacional como internacional. Para las plantaciones forestales se hace uso de varias especies al nivel mundial entre las que según Carle *et al.* (2009), se pueden mencionar en zonas tropicales y subtropicales con predominancia de las acacias, los eucaliptos, la teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) y algunas especies de pinos. También se usa el caucho (*Hevea brasiliensis*) aunque su uso es más por la producción del látex. Según Martínez et al. (2005), las zonas tropicales de México pueden considerarse como de gran potencial para el establecimiento y manejo de plantaciones forestales, ya que, considerando su posición geográfica, reciben grandes cantidades de energía solar, lo que junto con las condiciones favorables de suelo y clima que las caracterizan, permiten un crecimiento adecuado de las especies arbóreas.

Según el mismo autor, dentro de las especies promisorias se encuentra el eucalipto. Se emplean otras especies como el pino, el cedro, la melina, la teca, la caoba y el árbol del caucho (CONAFOR, 2008). Existen otras latifoliadas entre las que se puede mencionar el cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius*). De la familia leguminosae, esta especie originaria de la India y Birmania se emplea mucho en la agroforestería por su rápido crecimiento y capacidad de enriquecer los suelos. Es un árbol grande y deciduo que alcanza en México una altura de 30 m y hasta 60 m en otros lugares del mundo, con diámetros de 0.90 a 2.40 m (Whitmore y Otárola, 1976).

Por crecer fuera de su hábitat natural, el cedro rosado se usa para plantaciones forestales con el fin de obtener madera para la industria y a la vez resolver los problemas sociales y ambientales. La abundancia de madera juvenil afecta cualitativamente la madera cuando se le vaya a dar uso debido a sus fibras cortas y a la delgadez de sus paredes celulares. La estructura macroscópica y la composición química de la madera son responsables de sus propiedades macroscópicas como: su resistencia mecánica, su estabilidad dimensional, su conductividad térmica, que hacen de la madera un material noble (Candelier, 2013). Estas propiedades a lo largo del tiempo sufren degradaciones por factores externos aun siendo maderas proviniendo de bosques maduros, lo que vuelve susceptible a la madera que proviene de plantaciones forestales debido a la abundancia de la madera juvenil.

Frente a todos estos problemas se han implementado tecnologías para mejorar el comportamiento de la madera expuesta a estos factores. En función del objetivo perseguido se le puede tratar con productos protectores de la madera que son menos amigables con el medio ambiente o más bien se les puede modificar obteniendo madera acetilada o furfúrilada o termotratada esta última siendo más amigable con el medio ambiente. El termotratamiento será el centro de este estudio con el fin de determinar el efecto que tendrá sobre algunas propiedades importantes de la madera de *Acrocarpus fraxinifolius* ya que los tratamientos térmicos constituyen uno de los métodos más eficaces de modificación para madera (Homan y Jorissen, 2004). Este tratamiento es un proceso que consiste en aplicar altas temperaturas a la madera cerca o superior a los 200°C a diferente tiempo. Dicho proceso ayuda a incrementar la durabilidad biológica de la madera disminuyendo su higroscopicidad lo que la vuelve más estable dimensionalmente.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Plantaciones Forestales Comerciales

No cabe duda sobre la importancia que tiene el bosque en el desarrollo de la vida sobre la tierra siendo el repositorio de diversidad biológica más grande. Pero el uso desproporcionado del mismo ha ido dando lugar al empleo de mecanismo y otras vías para restituir lo que se ha perdido, de ahí que se establecen plantaciones forestales comerciales (PFC) que cumplen con objetivos importantes de mejora ambiental, desarrollo de actividades productivas alternas (mercados secundarios y encadenamientos), o de construir una masa crítica de plantaciones forestales que abastezca a una industria forestal competitiva y mejore la balanza comercial en materia forestal para cada país (CONAFOR, 2003).

En los últimos años el mundo ha experimentado una tasa alta de reforestación y reconversión de tierras que anteriormente estaban destinadas a otros usos, cuya superficie se estima en cinco millones de hectáreas anuales, por lo que se prevé que hacia 2020 la superficie cubierta por plantaciones forestales logre unos 300 millones de hectáreas. Actualmente, la superficie cubierta con plantaciones forestales es del orden de 264 millones de hectáreas, equivalente al 7% de la superficie forestal mundial, el 30% de esa superficie se concentra en Asia. Adicionalmente, se estima que tres cuartas partes de los bosques plantados están compuestos de especies nativas, y el resto con especies introducidas (FAO, 2010).

SEMARNAT (2005) refiere que el gobierno mexicano ha implementado el establecimiento de plantaciones forestales comerciales con el objetivo de reducir la presión que sufren los ecosistemas forestales e incrementar la producción forestal, maderable y no maderable. Por ello, se creó en 1997, el Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN), para apoyar el establecimiento de 875 mil hectáreas de plantaciones forestales comerciales en un plazo no mayor a 25 años, para reducir las importaciones de productos forestales y de paso crear alternativas de desarrollo sustentable, así como promover la diversificación productiva en el país.

Según CONAFOR (2008), en México la superficie cubierta por PFC de diversas especies a nivel nacional alcanza aproximadamente 117 479 ha, de las cuales las especies maderables representan un 85.2%, distribuidas básicamente en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche, siendo el cedro rojo y el eucalipto, las especies que mayormente se han plantado. El resto de la superficie de PFC corresponde a especies no maderables. Tomando solo en cuenta la superficie plantada con especies maderables, los géneros *Eucalyptus* y *Pinus* en conjunto con *Cedrela odorata* cubren una superficie mayor al 55% de la superficie total plantada que representa 55 748 ha, de un total maderable de 100 131 ha. Pero el género *Eucalyptus* es el que abarca la mayor superficie plantada con 21 168 ha, seguido muy de cerca por la especie *Cedrela odorata* con 20 705 ha. Después le siguen diversas especies del género *Pinus* con 13 566 ha, *Gmelina arborea* con 10 830 ha, *Tectona grandis* con 9 024 ha, *Swietenia macrophylla* con 6 328 ha y *Hevea brasiliensis* con 2 892 ha. El resto de las especies cubren alrededor de 15 617 ha. El Estado de Michoacán en si solo abarca el 3.6% de hectáreas plantadas con especies maderables.

## 2.2. Generalidades sobre la especie

*Acrocarpus fraxinifolius*, conocida comúnmente como cedro rosado, es una especie tropical originaria del sureste de Asia precisamente, de los países de la India, China, Indonesia, Bangladesh, Birmania, Borneo, Sumatra y Vietnam. Crece a los 27° latitud norte y de los 80 a los 130° de longitud este, a partir del nivel del mar hasta 2000 metros o más (CONAFOR, 2002). La madera de *Acrocarpus fraxinifolius* es fácil de trabajar, siendo una especie muy adaptable y aprovechable para diversos usos (EcuRed, 2017). Fuera de su hábitat natural ha sido plantado en regiones altas de Kenia, Uganda, Tanzania y Zimbabwe, pero también en Tangánica, Nigeria, Rodesia, Zambia, Kenia, Haití, Costa Rica, Brasil, en el Archipiélago de las Islas Fiji y también en México. El cedro rosado es una especie de rápido crecimiento. Según Whitmore y Otárola (1976), esta especie llega a alcanzar de cuatro a seis metros por año, produce madera de buena calidad y mantiene su follaje tanto en invierno como en verano por lo tanto ofrece sombras adecuadas en poco tiempo.

Sus hojas son alternas, compuestas, paripinnadas, que van de 5 a 11 pares de foliolos, lanceoladas a veces ovaladas que miden entre 5 y 16 cm de largo (Figura 1).



Figura 1: Hojas y corteza de *Acrocarpus fraxinifolius*.

Sus flores se agrupan en racimos de 30 a 50 cm al final de la rama y son de color rojo escarlata (Figura 2, A). Sus vainas planas alcanzan entre 8 y 12 cm de largo, y llegan a tener hasta 10 semillas que son aplanadas y ovaladas (Figura 2, B).



Figura 2: A) Flores y B) Vainas y semillas de *Acrocarpus fraxinifolius*, Menedez, (s.f).

Usos: Se cultiva en algunas regiones tropicales de México para obtener su madera, la cual se utiliza para fabricar muebles y para construcciones rurales. En la India se usa como pulpa para hacer papel. Bajo condiciones favorables de luz se ha usado esta especie como

sombra para plantaciones de té y café ya que la presencia de esta especie enriquece las plantaciones (CONAFOR, 2000). Pero también se le da uso como cajas para embalaje, tarimas y pulpa para papel. La madera es apropiada para acabados interiores finos, para chapas. En su área de distribución natural es utilizada para el entablillado de techos, para pisos, escaleras, puertas, cajas de té, e impregnada para fabricar durmientes (INIFAP, 2011).

### 2.2.1 Plantaciones Forestales Comerciales de la especie

Debido a su rápido crecimiento, sus características, y su aporte al suelo en plantaciones donde se le intercala con el café, en México se ha introducido en los estados de Quintana Roo, Chiapas, Campeche, Oaxaca y en la zona tropical de Puebla, en colindancia con Veracruz, como árbol de sombra en cafetales. En el estado de Michoacán se ha cultivado en las zonas calientes del municipio de La Huacana, inclusive en la ciudad de Morelia y en el Valle de Apatzingán (Figura 3) (Ontiveros y García, 2002; CONAFOR, 2000 y Muñoz et al. 2012).



Figura 3: *Acrocarpus fraxinifolius*: A) Árbol y ramas. B) Veteado de la madera. C) Corteza. D) Hojas. E) Plantación de *Acrocarpus fraxinifolius* en el municipio de Múgica, Michoacán, Muñoz et al. (2012).

### 2.2.2 Problemática ligada a la madera proveniente de plantaciones forestales comerciales.

Frente a la deforestación galopante y la necesidad de madera para distintos usos, se implementaron las plantaciones forestales comerciales. Pero el uso de métodos silviculturales ha sido determinante para el rápido desarrollo de estas plantaciones, volviéndolas más susceptibles tanto a ataques de microorganismos como a presentar afectaciones en sus propiedades físicas y mecánicas cuando se compara con madera de árboles maduros. Todo ello se debe en parte a la abundancia de madera juvenil.

Flórez *et al.* (2014), afirman que un ciclo rápido de crecimiento es factor determinante en la calidad y aptitud final de la madera considerando que se genera una mayor proporción de madera juvenil, en muchos casos con características inferiores a la madera adulta. De eso se puede resaltar que, al crecer rápido el árbol, tiene abundante madera juvenil lo que podría afectar su calidad y aptitud al ser empleada. Defays (1996), afirma que la madera juvenil de cierto modo es la madera formada a partir de los primeros años de existencia del cambium ya que es la base de generar el tronco del árbol. Pardos (como se citó en Vignote y Martínez, 2006) reporta que, si bien no difiere en aspecto de la del resto, posee unas características de comportamiento mecánico y físico, diferentes a las del resto de la madera formada. Esta madera, denominada juvenil, es más ligera, hasta un 30% menor, con traqueidas o fibras más cortas, hasta un 100% menores, paredes celulares más delgadas, menor contenido en celulosa más hemicelulosa, mayor desviación de la fibra, y una proporción más alta de madera de compresión que la madera madura.

Zaid (2004), afirma que la madera, en sus diversas formas, está sometida a distintos tipos de deterioro. Sin duda entre éstos los problemas de biodeterioro son los más importantes, tanto para árboles en pie como para productos forestales. Estas anomalías (acción de agentes biológicos) son cada vez de mayor incidencia por el creciente uso de madera proveniente de plantaciones de rápido crecimiento. Con ello, no cabe duda de que, con el mayor uso de madera proveniente de plantaciones forestales comerciales, seguiremos enfrentándonos más a menudo a tales situaciones.

Entre los agentes de biodeterioro, los hongos lignívoros (pudrición) se destacan por la intensidad y frecuencia de su ataque. Dentro de las diversas patologías fungosas asociadas a productos forestales se consideran las siguientes: mohos, manchas y pudriciones. Estas

últimas presentan diversos tipos: blanca, cúbica, café y blanda, (Zaid, 2004). Pero no solo los hongos afectan la madera ya que existe también insectos xilófagos que atacan tanto la madera en pie como la madera en servicio, aunque constituyen una amenaza inferior que los hongos; entre ellos se pueden mencionar las termitas, coleópteros y hormigas carpinteras (Highley, 1999).

### 2.3. Termotratamiento

Las preocupaciones ambientales dieron lugar al implemento de nuevas soluciones para fomentar plantaciones, obtener madera y lograr la durabilidad de esta sin afectar el medioambiente. Para ello, se implementó el termotratamiento como medida alternativa sustituyendo los tratamientos químicos y de impregnación (Candelier, 2013). Este proceso consiste en calentar la madera durante varias horas a temperaturas elevadas, es de cierta forma una pirólisis parcial de la madera efectuada bajo una atmósfera controlada, en ausencia o con bajo contenido de oxígeno (menos del 2%) sin añadirle sustancias químicas (Majano, 2014 y Cecobois, 2015).

Dicho tratamiento no data de ahora. Rapp y Sailer (2001), afirman que se han reportado muchos métodos de modificación térmica de la madera en la literatura y que los primeros artículos sobre el tratamiento térmico de la madera se encontraron en los años veinte. Después de esto, el método se ha desarrollado en Francia por las Escuelas de Minas de Paris y Saint Étienne, (1976-1977), por los Países Bajos Boonstra *et al.*, Tjeerdsma *et al.* y Militz;; en Alemania con el propio Rapp y en Finlandia (Kotilainen *et al.*, Sivonen *et al.*, Hietala *et al.* y Nuopponen *et al.* ) (como se citó en Candelier, 2013).

Se suelen utilizar para la modificación: nitrógeno, aceite, vapor, o al vacío (Majano, 2014) por lo que existen varios tipos de tecnología para la modificación térmica de la madera. A nivel industrial y en Europa, Majano (2014), menciona los siguientes:

- Thermoholz Austria (Austria)
- ThermoWood (Finlandia)
- Plato (Holanda)
- Retification (Francia)

- Bois Perdure (Francia)
- Oil Heat Treatment (OHT) (Alemania)
- Intemporis (Suiza)
- WTT-process (Dinamarca)
- Balz-Holz (Suiza)

Pero sin importar el nombre que se les dé a estos procesos, el principio de base es el mismo, estas generalmente comprenden tres fases:

Secado, que garantiza la evaporación de la humedad contenida en la madera (entre 100 y 130°C), el tratamiento térmico en sí (entre 180 y 230°C durante dos a cuatro horas), y luego el enfriamiento progresivo de la madera con rehumidificación de la misma (Syrjänen, 2001; Abibois, 2012; Candelier, 2013; Majano 2014; Touza, 2014 y Cecobois, 2015).

Majano (2014), afirma que, de manera general, todos los tratamientos térmicos tienen en común que las propiedades de la madera mejoran en términos de:

- ✓ Mayor durabilidad biológica,
- ✓ Mayor estabilidad dimensional, similar a las maderas tropicales,
- ✓ Reducción de hinchamiento y contracción (en 50 - 90%),
- ✓ Reducción del contenido de humedad de equilibrio (20 - 70%), lo cual deriva en una menor humedad (hasta el 50%) y en una mayor estabilidad frente a condiciones climáticas variables, comparado con la madera no tratada,
- ✓ Reducción de tensiones en el interior de la madera,
- ✓ Posibilidad de crear nuevos tonos de coloración,
- ✓ Los cambios de color son homogéneos en toda la sección,
- ✓ Una ligera mejora en cuanto a aislamiento térmico (conductividad térmica 20-25% menor que el material sin tratar),

Existen también algunas desventajas en comparación con la madera sin tratar:

- Gran fragilidad y tendencia al astillado,
- Reducción de las propiedades mecánicas hasta un 30%,
- Reducción de la densidad (10 - 20%),
- No resistencia a los rayos ultravioletas, siendo necesaria la protección con pigmentos,
- El tratamiento térmico no puede prevenir el agrisamiento de la madera,

Mediante este tratamiento se ha logrado combinar unas características únicas tales como la resistencia al agua, durabilidad y estabilidad dimensional, aunque ha habido afectaciones de algunas propiedades físicas como mecánicas de la madera. Algunas investigaciones han arrojado los resultados que siguen:

Bekhtha y Niemz (2003), en estudios realizados con madera de abeto indicaron que hubo disminución en la resistencia a la flexión de 50% aproximadamente cuando la temperatura del tratamiento aumentó de 100 a 200°C, y disminución en el módulo de elasticidad (MOE) entre 4 y 9%.

Unsal *et al.* (2003), demostraron que la densidad, el hinchamiento y la dureza disminuyeron al aumentar la temperatura y la duración del tratamiento, mientras que el tratamiento térmico hizo que el color de las muestras de madera fuera más oscuro, dichas muestras fueron sometida a 120, 150 o 180°C durante 2, 6 o 10 horas, pero los cambios fueron máximos a 180°C durante 10 horas.

Akyildiz y Ates (2008), en estudios realizados sobre las maderas de roble (*Quercus petraea* Lieb.), Castaño (*Castanea sativa* Mill.), pino de Calabria (*Pinus brutia* Ten.) y pino negro (*Pinus nigra* Arnold.) para determinar el efecto del tratamiento térmico sobre el contenido de humedad en equilibrio a tres temperaturas diferentes (130, 180 y 230°C) y dos tiempos diferentes (2 y 8 horas), demostró que los valores del contenido de humedad en equilibrio disminuyeron al aumentar la temperatura y el tiempo de tratamiento térmico.

Rivera (2015), afirma que la modificación térmica de la madera de *Vitex gaumeri Greenm* (Ya'axnik), causó disminución en su humedad en equilibrio y su densidad aparente, así mismo fueron menores la contracción radial y volumétrica, los hinchamientos radial, tangencial y volumétrico también disminuyeron. Por otra parte, se incrementó la dureza axial, la resistencia a compresión paralela hasta en un 24% y el MOE en flexión estática hasta un 18.7%. En extracción de clavo tangencial la resistencia disminuyó y de igual forma el MOR en flexión estática, este último a 200°C únicamente.

Garibay (2015), afirma que la madera de *Eucalyptus nitens* sufrió una disminución en la resistencia mecánica por efecto del termotratamiento que va del 6.7 al 53.3%. Mientras hubo mejoría en cuanto a hinchamiento y contracción cuando se utilizaron temperaturas de 180 °C en adelante por tiempos mayores a 2.5 horas.

Percin *et al.* (2016) demostraron que el tratamiento térmico realizado a 150, 175 y 200°C durante 1, 3 y 5 h, incrementó la pérdida de peso, la pérdida de densidad y la estabilización dimensional. Además de observar un aumento de la resistencia a la compresión paralela al grano (excepto a 200°C durante 5 h), se observó también un pequeño aumento en la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad en flexión y los valores de dureza de muestras de madera tratadas térmicamente a 150°C durante 1 y 3 h. Sin embargo, el tratamiento térmico a mayor temperatura y duración disminuyó claramente la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad en flexión y la dureza.

Respecto al tratamiento de aceite térmico (OHT, por su sigla en inglés), se encontraron publicados algunos artículos. Para la misma se usaron diferentes aceites con las siguientes conclusiones:

Bal (2015), usó aceite de girasol con madera de haya, comparando el tratamiento con aceite caliente y aire caliente a temperaturas de 160, 190 y 220°C durante 2 h para determinar las diferencias en los efectos de los dos procesos sobre las propiedades físicas de la madera. Los resultados mostraron que el tratamiento térmico en aceite caliente influyó más en las propiedades físicas de la madera de haya que en el tratamiento con aire caliente.

Bazyar (2012), usó aceite de linaza como medio de calentamiento para determinar la resistencia a la descomposición de la madera de álamo temblón (*Populus tremula L.*) termotratada contra los hongos de pudrición blanca (*Coriolus versicolor*) y los hongos de pudrición marrón (*Coniophora puteana*). Como resultados, hubo menor pérdida de masa de las muestras de madera expuestas a ambos hongos, una mejora en la estabilidad dimensional después del tratamiento térmico con aceite y la resistencia a la descomposición y la estabilidad dimensional de la madera de álamo aumentaron significativamente con el aumento de la temperatura, pero el tiempo pareció no tener efecto sobre esas propiedades.

Bak y Nemeth (2012), usaron aceites de girasol, linaza y colza para determinar el efecto del OHT sobre las propiedades de hinchamiento y los cambios en la tasa de absorción de humedad de la madera de álamo. Los resultados mostraron que el tratamiento con aceite disminuye el contenido de humedad en equilibrio (CHE) y el hinchamiento de la madera de álamo.

Tomak *et al.* (2011), usaron aceites vegetales de nuez, girasol, soja, canola y maíz para determinar los efectos combinados del tratamiento térmico de boro y aceite en las propiedades de la madera de haya y de la madera de pino escocés. Las combinaciones de aceites vegetales y compuestos de boro tienen potencial de generar un efecto sinérgico contra el ataque de hongos produciendo pérdidas de masa de menos del 3%.

Dubey *et al.* (2011), usaron aceite de linaza sin procesar de calidad comercial con madera de *Pinus radiata* para determinar el efecto de la edad de calentamiento del aceite sobre el color y estabilidad dimensional. El efecto del envejecimiento del aceite se investigó en condiciones de tratamiento de 180°C y 3 horas mediante el uso de aceite que había sido precalentado durante 0, 3, 9, 15, 21 y 27 horas, respectivamente, antes del tratamiento de la madera. Se observó mejora de la estabilidad de la madera tratada siendo más oscura, disminuyó el porcentaje de ganancia de peso de la madera debido al aumento de la viscosidad y la eficiencia repelente del agua disminuyó con un aumento en la edad de calentamiento del aceite.

Awoyemi *et al.* (2009), usaron las maderas de pino ponderosa (*Pinus ponderosa*) y el abeto negro (*Picea mariana*) en aceite de soja a temperatura de 220°C durante 2 horas seguido de enfriamiento dentro del aceite caliente 180 y 135°C. Hubo reducciones en el comportamiento hidrofílico y el hinchamiento de la madera como resultado del tratamiento térmico; el enfriamiento en aceite dio como resultado una mayor hidrofobicidad y estabilidad dimensional en la madera. En ambas especies, hubo mayores reducciones en la captación de agua y la hinchazón con el aumento del tiempo de enfriamiento.

Wang y Cooper (2005), utilizaron aceite de palma, aceite de soja y cera holgada para determinar el efecto del tipo de aceite, temperatura y tiempo en las propiedades de humedad de la madera tratada con aceite caliente con madera de abeto blanco. La cera holgada fue mejor que el aceite de palma o de soja para mejorar el rendimiento de humedad de la madera tratada térmicamente, y el tratamiento a 220°C fue superior al tratamiento a 200°C, siendo 4 h mejor que el tratamiento de 2 h.

Fang *et al.* (2012) aplicaron sobre la madera de álamo temblón (*Populus tremula*) un tratamiento con aceite caliente a 180, 200 y 220°C durante 1, 2, y 3 horas a las chapas densificadas. Los resultados muestran que el tratamiento con aceite mejoró de manera eficiente la estabilidad dimensional y que redujo la recuperación del conjunto de compresión. La temperatura y la duración del tratamiento con aceite influyeron mucho en dichos resultados.

El termotratamiento con aceite tiende a aumentar la masa de la madera termotratada a una cierta temperatura, solo que este puede variar con el tiempo y la temperatura que se le aplica. Sidorova (2009), afirma que, en el tratamiento realizado con abeto, pino y álamo con aceite vegetal a 180°C, hubo una tendencia de aumento de la absorción de aceite durante el tratamiento térmico con el aumento del tiempo de tratamiento para todas las especies. Pero a 210°C, el porcentaje de crecimiento en masa se reducía al aumentar el tiempo del proceso y a 240°C, todas las especies perdieron peso y el porcentaje de pérdida de peso aumentó proporcionalmente al aumentar el tiempo de tratamiento térmico. Según Bal (2015), varios factores tienen efectos sobre los resultados del tratamiento térmico, estos factores incluyen

temperatura, duración, medio de transferencia de calor (Esteves y Pereira 2009), la especie de madera (madera dura o madera blanda) (Ibach, 2010), contenido inicial de humedad (Gaff y Gasparik, 2013), la densidad de la madera (Bal, 2013a), la madurez de la madera (Bal y Bektaş, 2012), y el contenido extractivo de la madera (Bal, 2013b).

Según Bal (2015), en este proceso, el aceite caliente sirve de barrera entre el oxígeno y la madera en tratamiento. Por lo que el tratamiento térmico en aceite caliente tiene menos efecto sobre las propiedades mecánicas que el aire caliente (Rapp y Sailer, 2001).

El aspecto económico es un factor clave en este tipo de proyecto para determinar qué tan factible puede ser una inversión. Rapp y Sailer (2001) reporta:

- Planta - costo de compra

La inversión para una capacidad de 8500 m<sup>3</sup>/a es de 450.000 € (9 640 619.5 pesos mexicanos). Basado en un período de uso de 10 años, con una depreciación calculada de 5.2 € (111.4 pesos mexicanos) / m<sup>3</sup>.

- Planta - costo de operación

Los costos de operación para el tratamiento de piceas son de 60 a 90 € (1285 a 1928 pesos mexicanos) / m<sup>3</sup>, dependiendo de la carga de aceite deseada.

- Costo por metro cúbico de madera tratada.

Los costos por 1 m<sup>3</sup> de abeto tratado con aceite y calor son de 265 a 295 € (5677 a 6319 pesos mexicanos) / m<sup>3</sup> según los costos de madera sin tratar de 200 € (4284 pesos mexicanos) / m<sup>3</sup>.

La madera tras el tratamiento tiene una amplia gama de uso. Rapp y Sailer (2001) reportan como productos adecuados para:

- ✓ revestimientos
- ✓ pérgolas
- ✓ carpintería exterior
- ✓ Mueble de jardín
- ✓ cubiertas
- ✓ Esgrima

- ✓ barreras de ruido
- ✓ La madera en contacto con el suelo (tratar a altas temperaturas y altas cargas de aceite).

### 3. JUSTIFICACIÓN

El aprovechamiento de los recursos naturales forestales sin comprometer a las generaciones futuras fue dando lugar al implemento de varios métodos o técnicas para siempre tener abastecimiento en cuanto a los recursos forestales. Para ello, se desarrollaron métodos agroforestales, silviculturales entre otros para tener más áreas forestales. Aunque buenos, en algunos casos tienen efectos pocos deseables no tan perceptivos. Es el caso de la silvicultura, con el fomento de nuevas plantaciones forestales, se aplica para así acelerar la obtención de áreas boscosas con especies de rápido crecimiento como en nuestro caso *Acrocarpus fraxinifolius* que además es una especie introducida con este mismo fin.

En México, muchas plantaciones forestales en la actualidad son de esta especie lo que conlleva a que, siendo de rápido crecimiento y además sometida a métodos silviculturales, sus plantaciones se desarrollen aún más rápido propiciando así un gran número de madera juvenil, debido a que estos árboles no toman su tiempo para madurar lo suficiente, predominará la madera juvenil. Esta madera es de baja densidad con sus traqueidas o fibras más cortas y desviadas, también con paredes celulares delgadas y abundante hemicelulosa, todo ello conduce a que esta madera presente propiedades tecnológicas poco competitivas por lo que la finalidad de esta tarea será de aplicarle a la madera de *Acrocarpus fraxinifolius* un termotratamiento para así poder estudiar el efecto que tendrá dicho tratamiento sobre sus propiedades tanto físicas como mecánicas, afín de poder incrementar sus usos.

### 4. HIPÓTESIS

La aplicación de un termotratamiento a la madera de *Acrocarpus fraxinifolius* en aceite modificará sus propiedades físicas y mecánicas.

## 5. OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo general

Determinar el efecto del termotratamiento en aceite sobre algunas propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Acrocarpus fraxinifolius*.

### 5.2 Objetivos específicos

- Aplicar un termotratamiento a la madera en aceite a diferentes temperaturas durante el mismo tiempo.
- Determinar el cambio de coloración por efecto del termotratamiento de la madera
- Analizar algunas propiedades físicas de la madera con tratamiento y sin tratamiento:
  - Densidad
  - Contenido de Humedad
  - Absorción de agua
- Analizar algunas propiedades mecánicas de la madera con tratamiento y sin tratamiento.
  - Flexión estática
  - Compresión paralela
  - Dureza Janka

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 Procedencia y características del material utilizado

El material de estudio fue recolectado en un antiguo vivero perteneciente a la CONAFOR en el pueblo Dr. Miguel Silva Macías situado en el estado mexicano de Michoacán en el municipio de Ario de Rosales. El árbol tenía una altura de aproximativamente 16 m y un diámetro a altura de pecho (DAP) de 45 cm con una edad de entre 15 años (Figura 4). Las probetas se acondicionaron hasta alcanzar un contenido de humedad (C.H.) inferior o igual a 12% en el interior del laboratorio de física y mecánica de la madera de la FITECMA. Posteriormente se sacaron listones de los que se elaboraron las probetas para el desarrollo de la investigación.

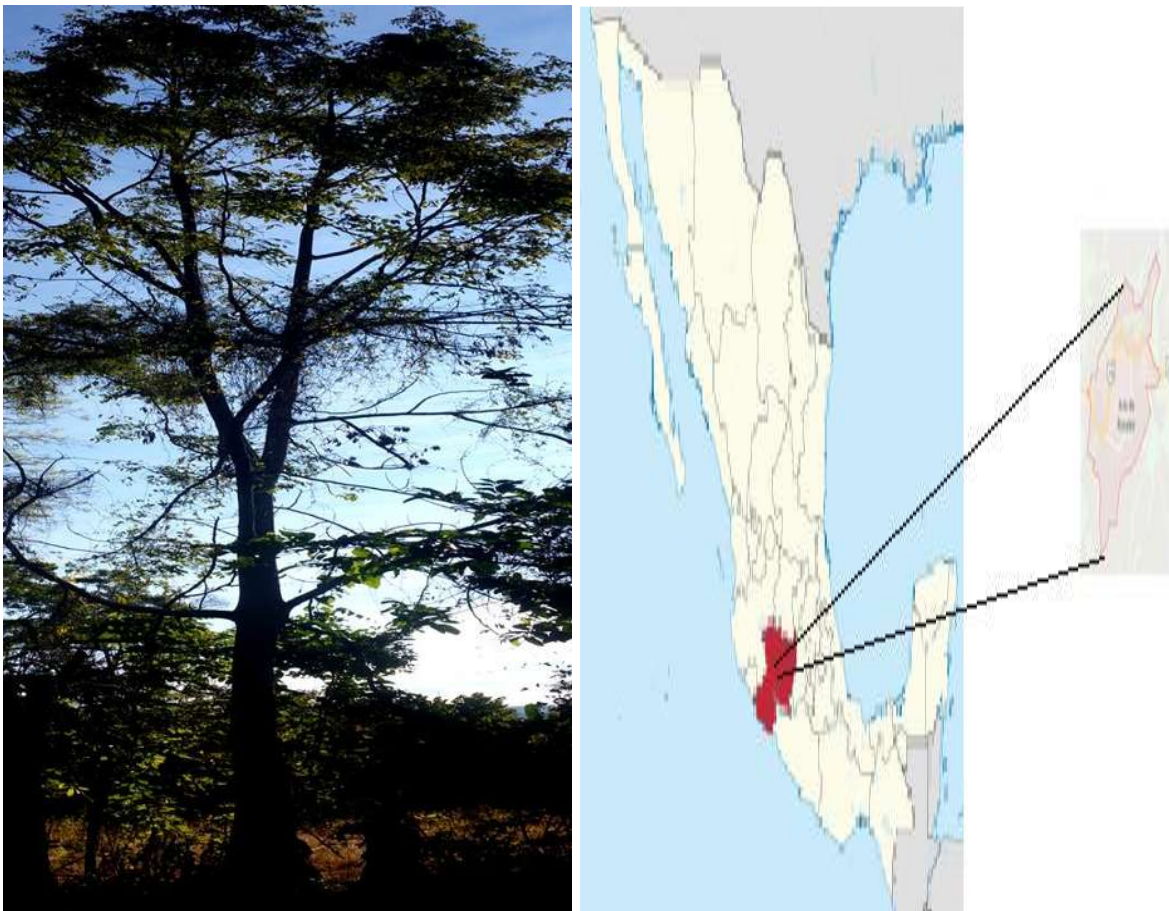


Figura 4: El árbol de *Acrocarpus fraxinifolius* y mapa de Ario de Rosales

## 6.2 Proceso de termotratamiento en aceite (OHT)

La madera se sometió a tres temperaturas que son 180, 200 y 220°C y a un tiempo de 2.5 h en aceite en un horno marca Felisa® con programación digital y una capacidad de 250°C. Se utilizó un aceite vegetal comestible (linaza, girasol y canola) para el tratamiento.

## 6.3 El cambio de coloración por efecto del termotratamiento de la madera

El cambio de coloración se determinó con las probetas sin tratamiento y las probetas tratadas, después del termotratamiento apoyándose en la tabla de suelos de Munsell (1975).

## 6.4 Realización de pruebas físicas

Para las diferentes pruebas se utilizaron las mismas probetas, fue una media de 15 probetas por prueba realizada por cada tratamiento ya que todas fueron de las mismas medidas de 20 x 20 x 20 mm.

### 6.4.1 Densidad

En la investigación, se determinó la densidad aparente usando las mismas piezas que sirvieron para determinar la contracción e hinchamiento. Se midieron valores de peso y volumen a un mismo contenido de humedad en cada una de las probetas. Para lo que se usó la fórmula (1):

$$d = \frac{P}{V} \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

d = Densidad (g/cm<sup>3</sup>)

P= Peso (g)

V= Volumen (cm<sup>3</sup>)

#### 6.4.2 Contenido de humedad

Se determinó inicialmente el peso de las probetas y luego se secó a 103°C ± 5 hasta peso constante, una vez determinado el peso anhidro se utilizó este valor junto al peso de las probetas registrado antes de los ensayos y se calculó el contenido de humedad empleando la fórmula (2).

$$CH = \frac{Pi - Pa}{Pa} \times 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

CH= Contenido de humedad (%)

Pi= Peso inicial

Pa= Peso anhidro

#### 6.4.3 Absorción de agua

La madera por su higroscopicidad tiene la capacidad de absorber y perder agua dependiendo del contenido de humedad existente en el ambiente.

Para su determinación, la madera se sumergió en agua entre 2, 24 y 48 horas y las probetas fueron según las especificaciones de la Norma ISO – 3131. Fueron pesadas antes y después de sumergirlas en el agua. Mediante una balanza digital, se le determinó el peso para luego determinar el porcentaje de absorción de agua mediante la fórmula (3).

$$Abs.A. = \frac{P2 - P1}{P1} \times 100 \quad \text{Ec. (3)}$$

Dónde

Abs. A: Absorción de agua

P1: Peso antes de sumergir la madera en agua

P2: Peso después de sumergir la madera en agua

## 6.5 Realización de pruebas mecánicas

Esta parte del trabajo se llevó a cabo mediante una máquina universal de marca “Shimadzu” que se encuentra en el laboratorio de pruebas físicas y mecánicas de la FITECMA. Esta máquina tiene una capacidad de 10 000 kg. Con ella se determinaron:

### 6.5.1 Flexión estática

Este ensayo se realizó aplicando una carga concentrada en el centro de la longitud de las piezas, dichas piezas fueron apoyadas en sus extremos. Se utilizaron piezas con dimensiones de 20 x 20 x 300 mm (ISO - 3133) con una distancia entre los apoyos de 25 cm. Se determinó el módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura en flexión (MOR). Para ello, se usaron las fórmulas (4 y 5):

$$MOE = \frac{\Delta F \times Ls^3}{4 \times a \times e^3 \times \Delta d} \quad \text{Ec. (4)}$$

$$\text{MOR} = \frac{3 \times F \times Ls}{2 \times a \times e^2} \quad \text{Ec. (5)}$$

Dónde:

MOE = Módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)

ΔF = Cualquier diferencia de fuerza en el campo elástico (Kg)

Δd = Deformación en el intervalo de F (cm)

MOR = Módulo de ruptura en flexión (kg/cm<sup>2</sup>)

F = Fuerza máxima de ruptura (N).

Ls= Distancia entre soportes (cm).

a = Ancho de la probeta (cm).

e = Peralte de la probeta (cm).

### 6.5.2 Compresión paralela a la fibra

Esta prueba tiene por particularidad la aplicación de dos fuerzas axiales opuestas las cuales tienden a producir un acortamiento de la pieza, es una prueba de importancia dentro de las pruebas mecánicas de la madera. Para su realización, se tomaron muestras de dimensión de 20 x 20 x 60 mm (ISO - 3787). La fórmula (6) sirvió para calcular el esfuerzo en el límite proporcional (σLP) en compresión paralela a la fibra.

$$\sigma_{LP} = \frac{F}{ab} = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:

σLP = esfuerzo en el límite proporcional en compresión paralela a las fibras (kg/cm<sup>2</sup>).

F = Fuerza máxima de ruptura (Kg).

a = Lado de la probeta (cm).

b = Lado de la probeta (cm).

A = Área de la sección transversal (cm<sup>2</sup>).

### 6.5.3 Dureza Janka

la dureza de una madera nos da información sobre cuán fácil o difícil puede ser cortada o penetrada por un objeto sólido. Para el desarrollo de esta investigación, se utilizaron probetas con dimensiones de 50 x 50 x 50 mm de acuerdo con la Norma ISO - 3350, la dureza se midió tanto en el eje longitudinal como en el eje lateral.

### 6.6 Análisis estadístico.

Se analizó estadísticamente con el fin de evaluar el efecto del termotratamiento sobre cada una de las propiedades en estudio. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando como herramienta el paquete estadístico SAS, así mismo se hicieron pruebas de comparación múltiple tipo Duncan. Las propiedades analizadas fueron: densidad normal, absorción de agua, contracción e hinchamiento, dureza Janka, resistencia a la flexión, compresión paralela a la fibra.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 El cambio de coloración por efecto del termotratamiento de la madera

La coloración de la madera de *Acrocarpus fraxinifolius* varía en función de si es el duramen o la albura. En la Fig. 5, se puede observar la madera sin tratamiento de color blanco a blanco amarillento (HUE 5Y 8- 8/3- 8/4) con jaspeaduras beige anaranjado y de color rosa a naranja pálido (HUE 5YR 8 3/4) con jaspeaduras más oscuras. Después de termotratar la madera, presentó una coloración amarilla (HUE 2.5 Y 8/6 y 7/6) con franjas rojas (HUE 2.5 YR 5/6) a 180°C y 200°C parecido a la madera de canshan (*Terminalia amazonia*) y una coloración castaña oscuro amarillenta (HUE 10YR 4/6) a castaño oscuro rojizo (HUE 5YR 3/4) a 220°C similar a la madera de Teca (*Tectona grandis*), amargoso (*Vatairea lundelli*) y tzalam (*Lysiloma latisiliquum*).

Diferentes autores reportaron resultados similares. Sidorova (2009) reportó en estudios realizados sobre la madera de abeto, pino y alamo para determinar la absorción del aceite, el color de las maderas cambió durante el tratamiento térmico y dependió principalmente de la temperatura del tratamiento térmico y el cambio de coloración aumentaba proporcionalmente al aumentar la temperatura del tratamiento térmico siendo variante entre las especies. Unsal et al., (2003) y Ates et al., (2009) reportaron resultados en los cuales indicaron que a mayor temperatura, más oscuras se ponían las piezas de madera.



Figura 5: Cambio de coloración de la madera de *Acrocarpus fraxinifolius* después de ser tratada a 180, 200 y 220°C y su parecido con otras maderas: 1) Testigo, 2) A y B la madera tratada a 180 y 200°C y C madera de *Terminalia amazonia* similar a la madera tratada. 3) A, madera tratada a 220°C, B, C y D maderas de *Tectona grandis*, *Vatairea lundelli* y *Lysiloma latilisiquum* similares a la madera tratada a 220°C.

## 7.2 Pruebas físicas

### 7.2.1 Densidad

El valor de densidad aparente de *Acrocarpus fraxinifolius* se obtuvo a un contenido de humedad de alrededor de 10%. La madera sin tratamiento presentó una densidad de 0.64 g/cm<sup>3</sup> que Espinoza (2018) clasifica de mediana. Camarena (2009) reportó una densidad básica de 0.49 g/cm<sup>3</sup>, lo que podría deberse a la edad del árbol y las condiciones edafoclimáticas de crecimiento de la especie. Según Menendez (2005), el peso específico de *Acrocarpus fraxinifolius* oscila entre 0.58 y 0.68 g/cm<sup>3</sup>. En la Tabla 1, se presentan los valores de la densidad antes y después de los tratamientos térmicos. Los valores son de 0.65, 0.67 y 0.66 g/cm<sup>3</sup> a 180, 200 y 220°C respectivamente. En la Fig. 6, se observa que la madera tratada térmicamente a 200°C fue estadísticamente significativa, con un aumento de 4.5% con respecto al testigo.

Tabla 1. Densidad (g/cm<sup>3</sup>) de la madera en función de la temperatura

| Tratamiento         | Testigo | 180°C | 200°C | 220°C |
|---------------------|---------|-------|-------|-------|
| Promedio            | 0.64    | 0.65  | 0.67  | 0.66  |
| Desv. Est.          | 0.05    | 0.03  | 0.04  | 0.04  |
| Coef. Variación (%) | 7.77    | 4.67  | 6.33  | 6.04  |
| Máximo              | 0.69    | 0.69  | 0.80  | 0.72  |
| Mínimo              | 0.56    | 0.60  | 0.60  | 0.59  |

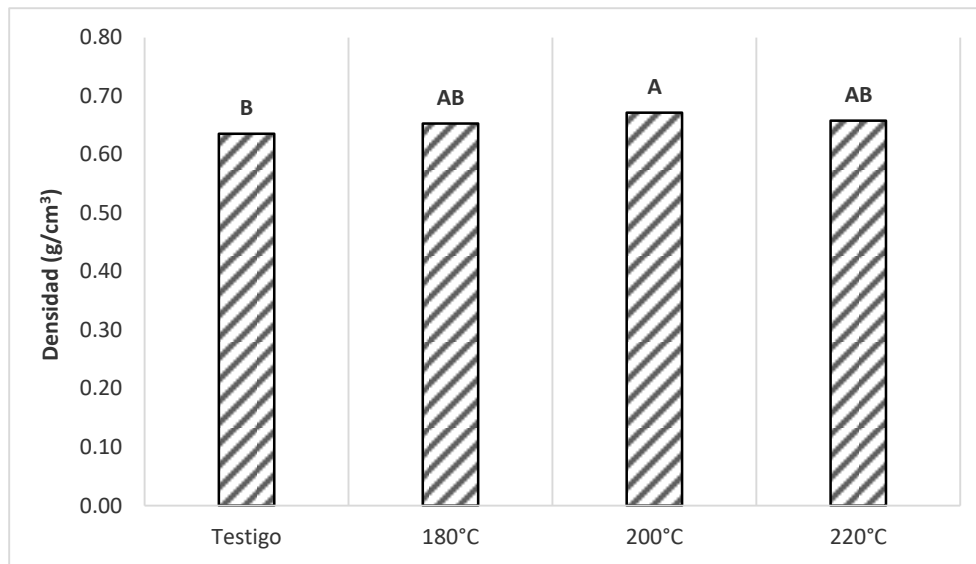


Figura 6: Variación de la densidad de la madera en función de la temperatura

(AB) Letras diferentes indican la existencia de diferencia significativa un nivel de 95% de confianza

### 7.2.2 Absorción de agua

Las probetas tratadas a 180 y 200°C y las probetas sin tratar fueron sumergidas en agua a 2, 24 y 48 horas, los resultados se pueden observar en las tablas 2, 3 y 4. La madera sin tratamiento presentó una absorción de 20.4, 66.2 y 82.3%, la madera tratada a 180°C de 8.38, 37.2 y 52.6% y la madera tratada a 200°C de 4.88, 29.41 y 45.03%. Lo que permite observar un incremento en la absorción de agua con o sin tratamiento, aunque a medida que fue aumentando la temperatura del tratamiento, se fue disminuyendo la absorción de agua.

En la tabla 2, se pueden ver los resultados de la absorción a 2 horas. Se puede observar que hubo una disminución con respecto al testigo en cuanto a los valores del porcentaje de absorción de 59.3 y 76% respectivamente a 180 y 200°C, siendo la

mayor disminución a 200°C como se puede observar en la Fig. 6 donde se representa la variación de la absorción de agua en función de las temperaturas.

En la tabla 3, se ven los resultados de la absorción a 24 horas. Se puede observar que presenta un patrón similar a la absorción a 2 horas presentando de igual modo una disminución con respecto al testigo a medida que va aumentando la temperatura con valores del porcentaje de disminución de la absorción de 43.9 y 64.7% respectivamente a 180 y 200°C siendo de igual forma el menor valor de absorción a 200°C como se puede observar en la Fig. 6.

La tabla 4 nos muestra los resultados de la absorción a 48 horas y se puede observar que hubo una disminución con respecto al testigo de 36.1 y 45.3% respectivamente a 180 y 200°C. El menor valor de absorción se dio a 200°C como se puede observar en la Fig. 7.

Equihua (2018) reporta una menor absorción de agua en 2 horas con el tratamiento en aceite a 2.5 horas sobre el tratamiento al aire caliente y la madera sin tratamiento realizado a la madera de *Gmelina arborea*, siendo posteriormente menor la absorción de agua de la madera sin tratamiento con respecto a los demás tratamientos a 24, 48, 72 hora y 1 semana. Méndez (2016) reportó un comportamiento irregular donde la madera termotratada a 200°C presentó el mayor porcentaje de absorción mientras la madera termotratada a 185°C presentó el menor porcentaje de absorción. Garibay (2015) reportó porcentajes menores de absorción de agua a 220°C por 2.5 horas de tratamiento en aire de la madera de *Eucaliptus nitens* tratada a 140, 180 y 220°C. Bazyar (2012) reportó una disminución de la absorción de agua de la madera de *Populus tremuloides* tratada térmicamente en aceite a medida que fueron aumentando el tiempo y la temperatura.

Tabla 2. Absorción de agua en dos horas a diferentes temperaturas

| Tratamiento          | Testigo | 180°C | 200°C |
|----------------------|---------|-------|-------|
| Promedio (%)         | 20.35   | 8.28  | 4.88  |
| Desv. Est. (%)       | 1.12    | 1.53  | 0.74  |
| Coef. Variación. (%) | 5.49    | 18.48 | 15.16 |
| Máximo (%)           | 22.24   | 12.15 | 7.11  |
| Mínimo (%)           | 17.88   | 6.60  | 4.00  |

Tabla 3. Absorción de agua en 24 horas a diferentes temperaturas

| Tratamiento         | Testigo | 180°C | 200°C |
|---------------------|---------|-------|-------|
| Promedio (%)        | 66.23   | 37.16 | 29.41 |
| Desv. Est. (%)      | 4.63    | 6.29  | 6.66  |
| Coef. Variación (%) | 6.99    | 16.94 | 22.65 |
| Máximo (%)          | 70.20   | 49.90 | 41.04 |
| Mínimo (%)          | 56.24   | 29.23 | 21.57 |

Tabla 4. Absorción de agua en 48 horas a diferentes temperaturas

| Tratamiento         | Testigo | 180°C | 200°C |
|---------------------|---------|-------|-------|
| Promedio (%)        | 82.27   | 52.60 | 45.03 |
| Desv. Est. (%)      | 7.89    | 8.68  | 8.37  |
| Coef. Variación (%) | 9.59    | 16.50 | 18.58 |
| Máximo (%)          | 91.09   | 66.09 | 59.48 |
| Mínimo (%)          | 63.95   | 41.49 | 34.49 |

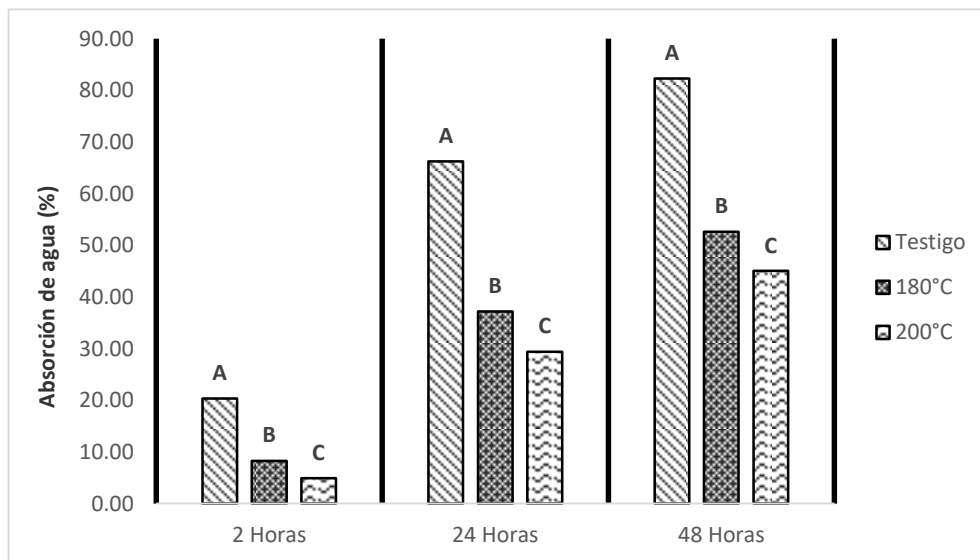


Figura 7: Absorción de agua en 2, 24 y 48 horas a diferentes temperaturas

(ABC) Letras diferentes indican la existencia de diferencia significativa un nivel de 95% de confianza

### 7.3 Propiedades mecánicas

#### 7.3.1 Flexión estática

Los ensayos de flexión estática se realizaron a un contenido de humedad de 9% para la madera sin tratamiento térmico. En la tabla 5, se pueden observar los valores para el

módulo de elasticidad (MOE) para los diferentes tratamientos. El MOE de la madera sin tratamiento dio un valor de 60871.05 kg/cm<sup>2</sup> lo que se clasifica de muy bajo (Echenique y Plumtre, 1994). Este valor fue muy inferior a los valores reportados por Camarena (2009) y Tamarit et al., (2008). En la Fig. 8, se puede observar que no hay diferencia estadística entre la madera sin tratamiento y las maderas termotratadas. Sin embargo, Rivera (2010) si reportó un aumento en el MOE al aplicar un termotratamiento al aire. Encontró que a medida que se aumentaba la temperatura, se incrementaba el MOE de 1.5% a 160°C y de 18.7% a 200°C.

Tabla 5. MOE en flexión de la madera a diferentes temperaturas (kg/cm<sup>2</sup>)

| Tratamiento         | Testigo   | 180°C    | 200°C    | 220°C    |
|---------------------|-----------|----------|----------|----------|
| Promedio            | 60871.05  | 56671.65 | 67802.12 | 61321.89 |
| Desv. Est.          | 4736.11   | 9427.08  | 11320.81 | 10564.54 |
| Coef. variación (%) | 7.78      | 16.63    | 16.70    | 17.23    |
| Máximo              | 111076.69 | 81123.3  | 90052.33 | 81539.11 |
| Mínimo              | 64634.56  | 45858.73 | 48298.77 | 44004.30 |

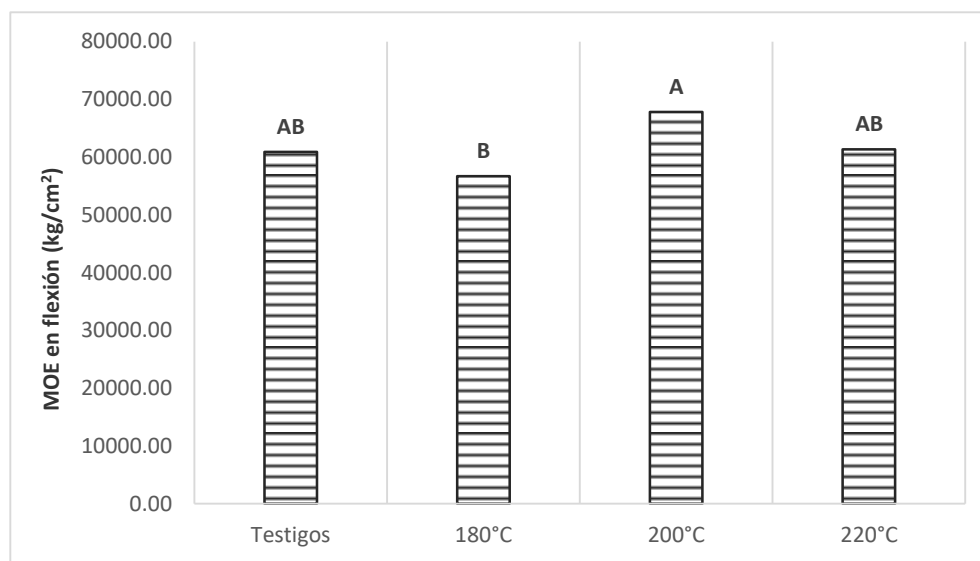


Figura 8: Variación del MOE en flexión en función de los tratamientos

(AB) Letras diferentes indican la existencia de diferencia significativa un nivel de 95% de confianza

La tabla 6 muestra los valores del módulo de ruptura (MOR) para los diferentes tratamientos. Siendo de 944.7 kg/cm<sup>2</sup> el valor de la madera sin tratamiento que se clasifica de medio (Echenique y Plumtre, 1994). Este MOR del presente trabajo, se encuentra entre

los valores de 853.18 kg/cm<sup>2</sup> de Camarena (2009) y de 1159 kg/cm<sup>2</sup> de Tamarit et al. (2008). En la Fig. 9, se puede observar que la madera tras ser termotratada a 180, 200 y 220°C, presentó un incremento de 15.9, 24.2 y 11.4% respectivamente. siendo el mayor incremento a 200°C. Rivera (2015) reportó un incremento en el MOR de 3.2% a 160°C. Mientras que se presentó una disminución del MOR de 14.1% a 200°C. Esto coincide con los resultados del presente trabajo ya que, a pesar de presentar un incremento por el termotratamiento, el MOR se fue reduciendo con el aumento de la temperatura.

Tabla 6. MOR en flexión de la madera a diferentes temperaturas (kg/cm<sup>2</sup>)

| Tratamiento         | Testigo | 180°C   | 200°C   | 220°C   |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|
| Promedio            | 944.67  | 1095.38 | 1173.18 | 1052.56 |
| Dev. Est.           | 39.85   | 152.17  | 192.01  | 104.42  |
| Coef. variación (%) | 4.22    | 13.89   | 16.37   | 9.92    |
| Máximo              | 1037.37 | 1356.30 | 1557.83 | 11.69   |
| Mínimo              | 876.46  | 891.96  | 868.53  | 853.20  |

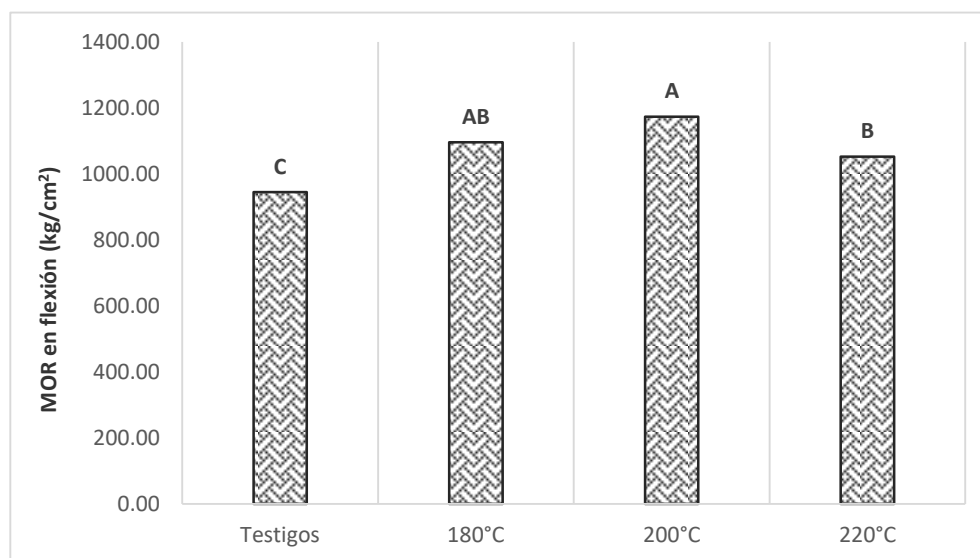


Figura 9: Variación del MOR en flexión en función de los tratamientos

(ABC) Letras diferentes indican la existencia de diferencia significativa un nivel de 95% de confianza

La tabla 7 presenta los valores del esfuerzo al límite de proporcionalidad (ELP). La madera sin tratamiento presentó un ELP de 651.89 kg/cm<sup>2</sup> que se clasifica de medio (Echenique y Plumtre, 1994). Este valor es similar al reportado por Camarena (2009) cuyo valor es de

678.5 kg/cm<sup>2</sup>. En la Fig. 10, se puede observar que la madera al ser termotratada presenta un incremento en cuanto al ELP alrededor de 23% a 200 y 220°C.

Tabla 7. ELP en flexión de la madera a diferentes temperaturas (kg/cm<sup>2</sup>)

| Tratamiento         | Testigo | 180°C   | 200°C   | 220°C   |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|
| Promedio            | 651.89  | 722.89  | 802.81  | 806.93  |
| Desv. Est.          | 49.45   | 120.17  | 136.56  | 111.40  |
| Coef. variación (%) | 7.59    | 16.62   | 17.01   | 13.81   |
| Máximo              | 738.27  | 1040.77 | 1060.98 | 1125.12 |
| Mínimo              | 557.64  | 588.06  | 544.15  | 640     |

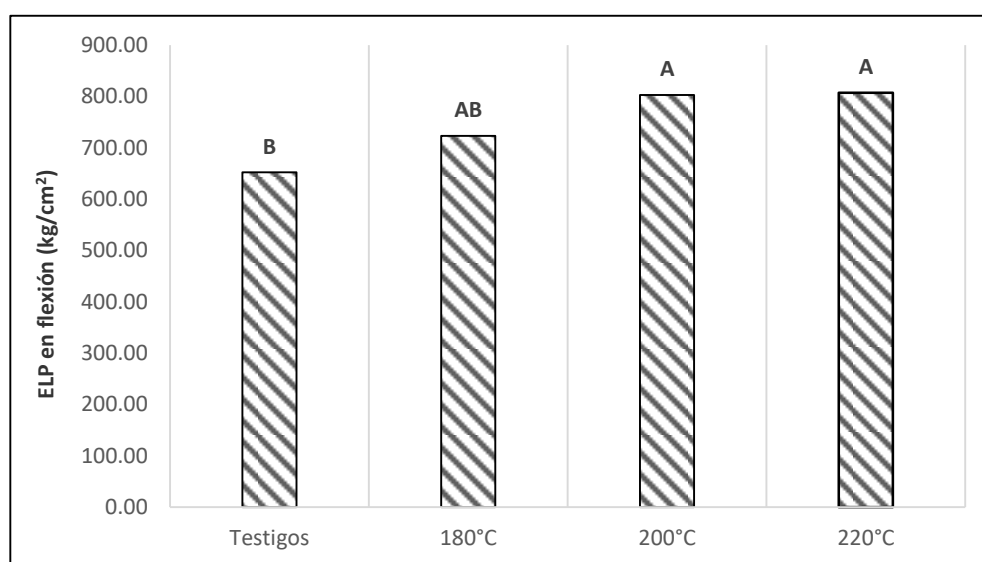


Figura 10: Variación del ELP en flexión en función de los tratamientos

(AB) Letras diferentes indican la existencia de diferencia significativa un nivel de 95% de confianza

### 7.3.2 Compresión paralela a la fibra

La tabla 8 presenta el esfuerzo en el límite proporcional a la compresión paralela a las fibras. La madera sin tratamiento presentó un  $\sigma_{LP}$  de 456.78 kg/cm<sup>2</sup> que Echenique y Plumtre (1994) clasifican de medio. Este valor presenta poca diferencia con los 509.95 kg/cm<sup>2</sup> reportado por Camarena (2009).

En la Fig. 11, se puede observar que después de someter la madera a tratamiento térmico, presentó un incremento de 39.4, 31.7 y 35.1% a temperaturas de 180, 200 y 220°C

respectivamente. Los resultados obtenidos de este estudio presentan similitudes con otros estudios realizados referente al tratamiento térmico en diversas especies. Equihua (2018), reportó que el  $\sigma_{LP}$  de la madera de *Gmelina arborea* tratado en aire caliente y en aceite a una temperatura de 180% a 2.5 horas mostraron un incremento de 28.2 y 22.1% respectivamente. Rivera (2015), reportó para la madera de *Vitex gaumeri* tratada térmicamente a 160 y 200°C en 2.5 horas un incremento de 16 y 24% respectivamente. Garibay (2015) reportó un incremento de 17% del MOR de la madera de *Eucalyptus nitens* sometida a 140°C mientras hubo una disminución de un 21% a 220°C en 3.5 horas para la misma especie.

Tabla 8.  $\sigma_{LP}$  en compresión paralela de la madera a diferentes temperaturas (kg/cm<sup>2</sup>)

| Tratamiento.        | Testigo | 180°C  | 200°C  | 220°C  |
|---------------------|---------|--------|--------|--------|
| Promedio            | 456.78  | 636.71 | 601.40 | 616.98 |
| Desv. Est.          | 23.92   | 44.50  | 42.46  | 46.53  |
| Coef. variación (%) | 5.24    | 6.99   | 7.06   | 7.54   |
| Máximo              | 497.3   | 728.27 | 675.8  | 736.13 |
| Mínimo              | 415.81  | 585.17 | 526.26 | 558.46 |

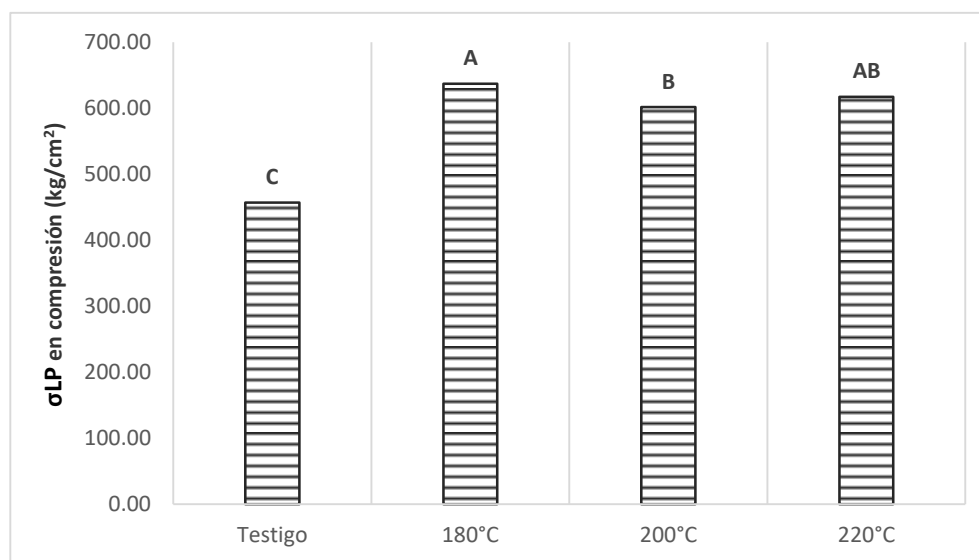


Figura 11: Variación del  $\sigma_{LP}$  en compresión en función de los tratamientos

(ABC) Letras diferentes indican la existencia de diferencia significativa un nivel de 95% de confianza

## 7.4 Dureza Janka

### 7.4.1 Dureza transversal y lateral

La tabla 9 presenta la dureza transversal del *Acrocarpus fraxinifolius* con un valor de 655.2 kg/cm<sup>2</sup> que basado en Echenique y Plumtre (1994) se clasifica de medio. Este valor presenta una diferencia con los 519.33 kg/cm<sup>2</sup> reportado por Camarena (2009) para esta misma especie.

La tabla 10 presenta la dureza lateral de la madera sin tratamiento con un valor de 559 kg/cm<sup>2</sup> clasificado de medio según la clasificación de Echenique y Plumtre (1994). Camarena (2009) reporta valores inferiores para la dureza lateral con valores de 405.08 kg/cm<sup>2</sup> para la dureza radial y 384.22 kg/cm<sup>2</sup> para la dureza tangencial.

La madera después de ser sometida a tratamientos térmicos presentó incrementos en la dureza lateral de 8.7, 15.5 y 11.8% a 180, 200 y 220°C respectivamente. En la Fig. 12 se puede observar con respecto a la dureza transversal que no hubo diferencia estadísticamente significativa. Otros autores han encontrado incrementos en la dureza cuando se aplica termotratamientos, así, Garibay (2015) reportó un incremento de 40% en la dureza lateral de la madera tratada térmicamente al aire a 140°C y de un 35% en la dureza longitudinal a 1.5 horas, para la madera de *Eucaliptus nitens*. Garibay encontró que el incremento en dureza fue bajando al aumentar el tiempo y la temperatura del termotratamiento hasta llegar a un punto de degradar significativamente la probeta a 220°C a 3.5 horas. Sin embargo, otros autores no han encontrado incrementos en la dureza lateral al aplicar termotratamiento. Rivera (2015) en termotratamiento al aire a 160 y 200°C a la madera de *Vitex gaumeria*, no halló diferencia significativa entre los tratamientos.

Tabla 9. Dureza transversal de la madera a diferentes temperaturas (kg/cm<sup>2</sup>)

| Tratamiento         | Testigo | 180°C | 200°C | 220°C  |
|---------------------|---------|-------|-------|--------|
| Promedio            | 655.2   | 610.5 | 653.2 | 639.47 |
| Desv. Est.          | 66.49   | 47.2  | 54.98 | 81.13  |
| Coef. variación (%) | 10.15   | 7.7   | 8.42  | 12.69  |
| Máximo              | 725     | 706   | 722   | 830    |
| Mínimo              | 470     | 538   | 560   | 518    |

Tabla 10. Dureza lateral de la madera a diferentes temperaturas (kg/cm<sup>2</sup>)

| Tratamiento         | Testigo | 180°C | 200°C | 220°C  |
|---------------------|---------|-------|-------|--------|
| Promedio            | 559.80  | 608.5 | 646.4 | 625.73 |
| Desv. Est.          | 58.78   | 63.1  | 55.28 | 83.58  |
| Coef. variación (%) | 10.50   | 10.4  | 8.55  | 13.36  |
| Máximo              | 672     | 671   | 775   | 783    |
| Mínimo              | 479     | 490   | 558   | 479    |

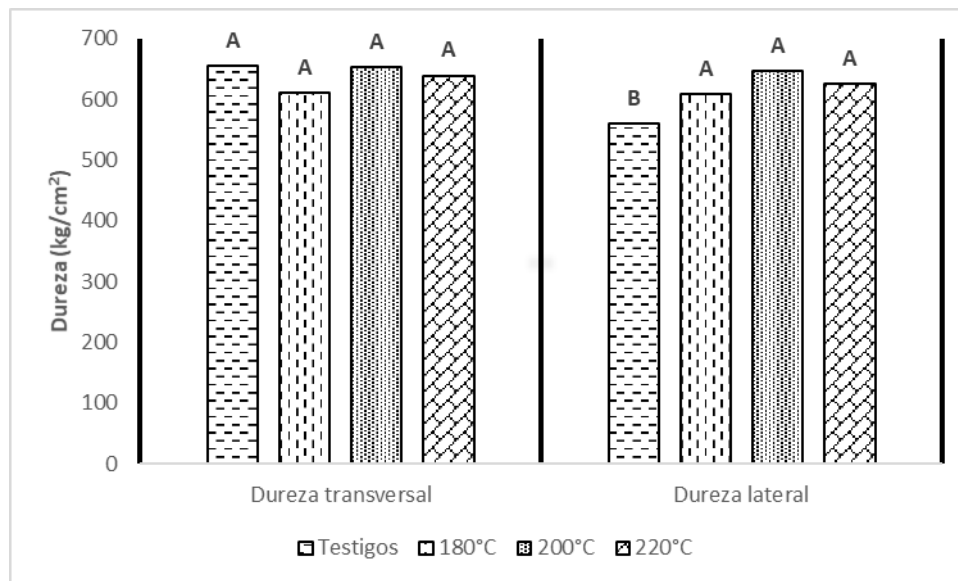


Figura 12: Variación de la dureza transversal y lateral de la madera a diferentes temperaturas

(AB) Letras diferentes indican la existencia de diferencia significativa un nivel de 95% de confianza

## 8. CONCLUSIONES

La madera de *Acrocarpus fraxinifolius* después del termotratamiento presentó un cambio de coloración oscura pareciéndose a maderas tropicales.

La densidad presentó un aumento con diferencia estadísticamente significativa con respecto al testigo de la madera.

La absorción de agua de la madera, tanto termotratada en aceite como sin tratar, sumergidas a 2, 24 y 48 horas, presentó un incremento, aunque a medida que fue aumentando la temperatura del tratamiento, se fue disminuyendo la absorción.

El módulo de elasticidad en flexión (MOE) en sí presentó un incremento a 200°C.

El módulo de ruptura en flexión (MOR) tras el tratamiento presentó un incremento con todos los tratamientos, aunque el de mayor incremento fue de 200°C.

El esfuerzo al límite de proporcionalidad (ELP) tras el tratamiento se incrementó a 200 y 220°C siendo las dos temperaturas de tratamiento las mayores con una leve superioridad a 220°C.

El esfuerzo en el límite proporcional a la compresión paralela a las fibras ( $\sigma_{LP}$ ) se incrementó siendo el de mayor incremento el tratamiento a 180°C.

La dureza longitudinal presentó una disminución con respecto a la madera sin tratamiento siendo la de menor impacto a 200°C,

La dureza lateral presentó un incremento con todos los tratamientos siendo el de mejor resultado el tratamiento a 200°C con respecto al testigo, aunque no hubo diferencia en la dureza longitudinal.

Con todo lo anterior, se puede concluir de forma general que el tratamiento a 200°C ha sido el de mejor impacto sobre las propiedades de forma general.

## 9. RECOMENDACIONES

- Aplicar el termotratamiento a la madera de *Acrocarpus fraxinifolius* a 200°C y a 2.5 horas o a menos tiempo para menor impacto sobre algunas propiedades que pueden sufrir disminución.
- Realizar pruebas de durabilidad biológica
- Cambiar el aceite del tratamiento por otro que resista altas temperaturas

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Abibois (2012). Le traitement haute température des bois. Etude de faisabilité technique et financière pour une installation de traitement de bois par haute température réalisée par le CRITT BOIS d'Epinal pour Abibois. Recuperado de [https://abibois.com/images/stories/ABIBOUTIK/supports\\_techiniques/plaquette\\_TH\\_T\\_2012\\_VD.pdf](https://abibois.com/images/stories/ABIBOUTIK/supports_techiniques/plaquette_TH_T_2012_VD.pdf).
- Akyildiz, M. H. y Ates, S. (2008). Effect of Heat Treatment on Equilibrium Moisture Content (EMC) of Some Wood Species in Turkey. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 4(6): 660-665
- Ates, S. Akyildiz, M., H. Ozdemir, H. (2009). Effects of heat treatment on Calabrian Pine (*Pinus brutia* Ten.) wood. *BioResources*. 4(3), 1032-1043.
- Awoyemi, L.; Cooper, P.A.; Ung, T.Y. (2009). In-treatment cooling during thermal modification of wood in soy oil medium: soy oil uptake, wettability, water uptake and swelling properties. *European Journal of Wood and Wood Products* 67(4):465-470. doi.org/10.1007/s00107-009-0346-9
- Bak, M. y Nemeth, R. (2012). Changes in swelling properties and moisture uptake rate of oil-heat-treated poplar (*Populus x euramericana* cv. Pannonia) wood. *Bioresources* 7(4):5128-5137.
- Bal, B.C. (2013a). A comparative study of the physical properties of thermally treated poplar wood and plane wood. *Bioresources* 8(4):6493-6500.
- Bal, B.C. (2013b). Effects of heat treatment on the physical properties of heartwood and sapwood of *Cedrus Libani*. *Bioresources* 8(1): 211-219.
- Bal, B. C. (2015). Physical properties of beech wood thermally modified in hot oil and in hot air at various temperatures. *Maderas. Ciencia y Tecnología*. 17(4), 789-798. doi:10.4067/S0718-221X2015005000068
- Bal, B.C. y Bektaş, I. (2012). The effects of heat treatment on the physical properties of juvenile wood and mature wood of *E. grandis*. *Bioresources* 7(4):5117-5127.

- Bazyar, B. 2012. Decay resistance and physical properties of oil heat treated aspen wood. *Bioresources* 7(1):696-705.
- Bekhhta, P. y 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. doi: 10.1515/HF.2003.080.
- Camarena, T. J. C. (2009). Caracterización físico-mecánica de la madera de *Acrocarpus fraxinifolius*. (Tesis de grado). Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.
- Candelier, K. (2013). Caractérisation des transformations physico-chimiques intervenant lors de la thermodégradation du bois. Influence de l'intensité de traitement, de l'essence et de l'atmosphère. (Tesis doctoral). Universidad de Lorraine, Lorraine, Francia.
- Carle, J., J. Ball y A. del Lungo. (2009). The Global Thematic Study of Planted Forests. In: *Planted Forests. Uses, Impacts & Sustainability*. Ed. by J. Evans. FAO and CABI. 213 pp.
- Cecobois (2015). Le bois modifié thermiquement : caractéristiques et utilisation. Recuperado de [https://www.cecobois.com/publications\\_documents/CECO-5172\\_Bois\\_Torrefie\\_WEB.pdf](https://www.cecobois.com/publications_documents/CECO-5172_Bois_Torrefie_WEB.pdf)
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2015). Le apuestan productores a las plantaciones forestales comerciales. Unidad de comunicación social de Río Grande, Zacatepec (Mexico). Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/6290Le%20apuestan%20productores%20a%20las%20plantaciones%20forestales%20comerciales.pdf>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2008). Situación Actual y Perspectivas de las Plantaciones Forestales Comerciales en México. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/ver.aspx?articulo=434>

- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2003). Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales, A 15 años de su creación. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/ver.aspx?articulo=493>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2002). Demanda específica. Convocatoria CONAFOR-CONACYT 2002/01. Recuperado de [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwipqYbri4riAhVQF6wKHc11BPYQFjAAegQIAxAC&url=http%3A%2F%2F2006-2012.conacyt.gob.mx%2Ffondos%2FFondosSectoriales%2FCONAFOR%2FConvocatoria%2520200201%2FCONAFOR\\_Demandas\\_2002-01.pdf&usg=AOvVaw0zc9Fvwla8ITIJkeE2yUGJ](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwipqYbri4riAhVQF6wKHc11BPYQFjAAegQIAxAC&url=http%3A%2F%2F2006-2012.conacyt.gob.mx%2Ffondos%2FFondosSectoriales%2FCONAFOR%2FConvocatoria%2520200201%2FCONAFOR_Demandas_2002-01.pdf&usg=AOvVaw0zc9Fvwla8ITIJkeE2yUGJ)
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2000). *Acrocarpus fraxinifolius* Wight et Arn. SIRE: CONABIO-SEMARNAP. Paquetes tecnológicos. México. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/878Acrocarpus%20fraxinifolius.pdf>
- Cuevas, E. (2003). Propiedades físicas y mecánicas de la madera. Material de apoyo en propiedades físicas y mecánicas. Universidad de Talca, Escuela de Ingeniería en Industrias de la Madera. Talca, Chile. 68p.
- Defays, E. (1996). Bois juvénile et sylviculture du douglas. Forêt entreprise (108), 1-5. Recuperado de [http://www.srfb.be/sites/default/files/FE\\_BoisJuvenile\\_Douglas\\_108\\_1996.pdf](http://www.srfb.be/sites/default/files/FE_BoisJuvenile_Douglas_108_1996.pdf)
- Díaz, M. P.P. (2005). Evaluación de Propiedades Físicas y Mecánicas de madera de *Nothofagus glauca* (Hualo) proveniente de la zona de Cauquenes. (Tesis de pregrado). Universidad de Talca, Chile.
- Dubey, M.K.; Pang, S.; Walker, J. (2011). Effect of oil heating age on color and dimensional stability of heat-treated *Pinus radiata*. European Journal of Wood and Wood Products 69(2): 255-262. Doi.org/10.1007/s00107-010-0431-0

- Echenique-Manrique, R. ; Plumptre, R. A. (1994). Guía para el uso de Maderas de Belice y México. Universidad de Guadalajara, Consejo Británico, Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera, A. C., Universidad de Oxford. Oxford. 196 pp.
- EcuRed (2017). Enciclopedia colaborativa en la red cubana. [versión electrónica]. Habana, Cuba: Enciclopedia colaborativa en la red cubana., [http://www.ecured.cu/index.php/Cedro\\_Rosado](http://www.ecured.cu/index.php/Cedro_Rosado). Consultado el 10 de septiembre 2017
- Equihua, E. M. L. (2018). Efecto de termotratamientos en las propiedades fisico-mecánicas, químicas y resistencia a la pudrición de la madera de *Gmelina arborea*. (Tesis de Maestría). Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
- Espinoza, H. R. (2017). FÍSICA Y MECÁNICA DE LA MADERA. Material de apoyo en propiedades físicas y mecánicas de la madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 39p
- Esteves, B.M., Pereira, H.M. (2009). Wood modification by heat treatment: A review. *Bioresources* 4(1) :370-404.
- Fang C. H., Cloutier A., Blanchet, P., Koubaa, A., y Mariotti, N., (2011). Densification of wood veneers combined with oil heat treatment. Part I: Dimensional stability. *BioResources* 6(1), 373-385.
- FAO (2010). *Global Forest Resource Assesment (FRA)*. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Forestry Paper, 163, 378.
- Flórez, J. B., Trugilho, P. F., Lima, J. T., Hein, P. R. G., y Silva, J. R. M. (2014). Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil. *Madera y bosques*, 20(1), 11-20. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-04712014000100002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000100002&lng=es&tlng=es). Consultado el 10 de septiembre de 2017.
- Gaff, M. & Gašparík, M. (2013). Shrinkage and stability of thermo-mechanically modified aspen wood. *BioResources* 8(1): 1136-1146.

- Garibay, G. G. A. (2015). Efecto del Termotratamiento en las Propiedades Físico-Mecánicas de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Procedente de Una Plantación Comercial. (Tesis de Maestría). Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.
- Highley, T. (1999). Biodeterioration of Wood. Forest Products Laboratory. Wood handbook-Wood as an engineering material. Department of Agriculture, Forest Service. Madison, WI. 463 p.
- Homan, W. J. & Jorissen, A.J.M. (2004). Wood modification developments. *Heron*, 49(4): 361–386.
- Ibach, R. E. (2010). Specialty treatments, Wood Handbook: Wood as an engineering Material, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, Madison, WI, p. 19-9.
- INIFAP (2011). Establecimiento de plantaciones comerciales de cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight et Arn.) en Tamaulipas. INAFAP-CIRNE. Desplegable para Productores Núm. 20. Mexico. 2 p. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Determination of density for physical and mechanical tests. ISO 3131.1a Ed.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Determination of static hardness. ISO 3350.1a Ed.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Determination of ultimate strength in static bending. ISO 3133.1a Ed.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Testing in compression perpendicular to grain. ISO 3132.1a Ed.
- Jämsä, S. y Viitaniemi, P. (2001). Heat treatment of wood – Better durability without chemicals, Review on Heat Treatments of Wood. In: Special Seminar: Environmental Optimisation of Wood Protection, Antibes, France. Proceedings. Antibes, France: Cost Action E 22, pp. 19

- Martínez, J. y Borja de la Rosa, A. (2005). Características tecnológicas de la madera de palo morado (*Peltogyne mexicana* Martínez) de Tierra Colorada, Guerrero, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 11(1):78-82.
- Majano, M. M. A. (2014). Madera termo-tratada de frondosas para uso estructural. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Méndez, M. L. D. (2016). “Efectos del termotratamiento sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas en la madera de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* proveniente de plantaciones forestales. (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Menendez, H. H. (2005). Cedro rosado. Guía de cultivo. monografías Recuperado de <http://www.monografias.com/trabajos20/cedro-rosado/cedro-rosado.shtml>.
- Munsell soil color charts. 1975. Edition. Baltimore, Maryland. 17p.
- Muñoz, F. H. J., Sáenz R. J. T. y Rueda S. A. (2012). Monografías de especies forestales para plantaciones comerciales en clima tropical de Michoacán. Libro Técnico Núm. 15. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Michoacán, México. 202 p.
- Ontiveros A. S. y García M. T. (2002). Descripción botánica de la especie *Acrocarpus fraxinifolius* Wight et Arn. Investigación Descriptiva. Vol. 8 Época 2. Ciencia y Tecnología de la Madera. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. UMSNH. Morelia, Michoacán. p. 2-7.
- Peña, N. P. (2012). Contenido de Humedad de Equilibrio de La Madera. Recuperado de: [https://books.google.com.mx/books/about/Contenido\\_de\\_Humedad\\_de\\_Equilibrio\\_de\\_La.html?id=TTyGMAEACAAJ&redir\\_esc=y&hl=es](https://books.google.com.mx/books/about/Contenido_de_Humedad_de_Equilibrio_de_La.html?id=TTyGMAEACAAJ&redir_esc=y&hl=es).
- Percin, O., Peker, H. y Atilgan, A. (2016). The effect of heat treatment on the some physical and mechanical properties of beech (*fagus orientalis lipsky*) wood. *WOOD RESEARCH*, 61(3), 443-456.

- Rapp A. O. y Sailer M. (2001). Oil heat treatment of wood in Germany. In: Review on heat treatments of wood, Proceedings of the special seminar of COST Action E22, Antibes, France.
- Rivera, R. J. G. (2015). Efecto del termo tratamiento en propiedades fisico-mecánicas de la madera de *Vitex gaumeri Greenm* (Ya'axnik). (Tesis de pregrado). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mexico.
- SEMARNAT, (2005). Indicadores básicos del desempeño ambiental de México: 2005. México. 348 p. La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Sidorova K. (2009): Oil heat treatment of wood. Research Engineer, Division of Wood Physics, Lulea University of Technology, Skelleftea, Sweden
- Syrjänen, T. (2001). Production and classification of heat-treated wood in Finland, Re-view on Heat Treatments of Wood. In: Special Seminar: Environmental Optimisation of Wood Protection, Antibes, France. Proceedings. Antibes, France: Cost Action E 22, pp.
- Tamarit, J.C., y López, J.L. (2007). Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. Libro Técnico No. 3. INAFAP-CIR golfo centro, campo Experimental San Martinito. Tlahuapan, Puebla. México.
- Tomak, E.D., Viitanen, H., Yildiz, U.C. y Hughes, M. (2011). The combined effects of boron and oil heat treatment on the properties of beech and Scots pine wood. Part 2: Water absorption, compression strength, color changes, and decay resistance. *Journal of Materials Science* 46: 608-615.
- Touza, V. M. C. (mayo de 2014). La madera como material estructural. Madera modificada: Nuevas posibilidades constructivas. Exposición llevada a cabo en el XXI Convención de la Federación Española de Pavimentos de Madera, Bilbao, España.
- Unsal, O., Korkut, S, y Atik, C., (2003). The effect of heat treatment on some properties and colour in eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* DEHN.) wood. *Maderas*.

Ciencia y tecnología, 5(2), 145-152. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2003000200006>

Vignote, P. S. y Martínez, R. I. (2006). Tecnología de la madera. Recuperado de: <https://tecno1di.files.wordpress.com/2016/03/madera.pdf>

Wang, J.Y.; Cooper, P.A. (2005). Effect of oil type, temperature and time on moisture properties of hot oil-treated wood. *Holz als Roh-und Werkstoff* 63: 417-422.

Whitmore, A. y Otárola, T. (1976). *Acrocarpus fraxinifolius* Wight, especie de rápido crecimiento inicial, buena forma y madera de usos múltiples. *Turrialba* 26 (2) 201-204

Zaid, N. L. K. (2004). Estudio del biodeterioro en madera de *eucalyptus globulus* lab. Por método gravimétrico. Memoria profesional. Universidad de Chile, Santiago, Chile.