



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 de termotratamientos en las propiedades físico-
mecánicas, químicas y resistencia a la pudrición de la
madera de *Gmelina arborea*

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

PRESENTA:

Martha Lilia Equihua Equihua

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Raúl Espinoza Herrera

Morelia, Michoacán, diciembre de 2018.

DEDICATORIA

A mis padres, en especial a mi madre por hacer de mí una mejor persona a través de sus consejos, enseñanzas y amor. A mis hermanos por su confianza y cariño que me han brindado. A mis amigos que de una u otra manera me han llenado de sabiduría durante este camino recorrido.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo que, a través de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera, me brindó la oportunidad de seguir preparándome en mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo el apoyo brindado durante estos dos años de estudio.

Al Dr. Raúl Espinoza Herrera por dirigir este trabajo, por su apoyo, confianza depositada, consejos brindados durante este trayecto recorrido de mi formación.

A los sinodales por sus observaciones y consejos para el enriquecimiento de este trabajo.

A todas las personas que de alguna manera u otra participaron en la realización de este trabajo.

A mis compañeros de posgrado, por su apoyo y por los momentos amenos compartidos.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 3 |
| 2.1. Generalidades de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. | 3 |
| 2.1.1. Origen y Distribución | 3 |
| 2.1.2. Requerimientos ambientales..... | 3 |
| 2.1.3. Descripción botánica. | 3 |
| 2.1.4. Usos | 4 |
| 2.2. Tratamiento térmico en aire caliente..... | 5 |
| 2.3. Tratamiento térmico en aceite caliente | 10 |
| 2.4. Degradación por hongos de pudrición | 11 |
| 3. OBJETIVOS..... | 17 |
| 3.1. Objetivo general..... | 17 |
| 3.2. Objetivos específicos. | 17 |
| 4. HIPÓTESIS..... | 18 |
| 5. JUSTIFICACIÓN..... | 18 |
| 6. MATERIALES Y MÉTODOS | 19 |
| 6.1. Material de estudio..... | 19 |
| 6.2. Termotratamientos. | 20 |
| 6.2.1. Tratamiento térmico en aire caliente. | 20 |
| 6.2.2. Tratamiento térmico en aceite. | 20 |
| 6.3. Propiedades físicas..... | 21 |
| 6.3.1. Densidad. | 21 |
| 6.3.2. Absorción de agua. | 22 |
| 6.3.3. Hinchamiento y Contracción..... | 23 |
| 6.4. Propiedades mecánicas. | 24 |
| 6.4.1. Determinación de compresión paralela a la fibra. | 24 |
| 6.5. Degradación por hongos de pudrición. | 25 |
| 6.5.1. Medio de cultivo..... | 25 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.5.2 | Preparación del sustrato suelo | 26 |
| 6.5.3 | Retiro de las probetas y estabilización | 27 |
| 6.6 | Extraíbles de la madera..... | 27 |
| 6.6.1 | Determinación del contenido de humedad en la harina de madera. | 27 |
| 6.6.2 | Obtención de los extractos..... | 28 |
| 6.7 | Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)..... | 29 |
| 7. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 30 |
| 7.1 | Densidad normal, básica y anhidra | 30 |
| 7.2 | Absorción de agua (%) | 32 |
| 7.3 | Hinchamiento..... | 34 |
| 7.4 | Contracción..... | 36 |
| 7.5 | Compresión paralela a la fibra..... | 37 |
| 7.6 | Crecimiento de los hongos de pudrición..... | 44 |
| 7.7 | Pérdida de peso | 45 |
| 7.8 | Porcentaje de compuestos extraíbles de la madera de <i>Gmelina arborea</i> | 47 |
| 7.9 | Análisis de FT-IR..... | 49 |
| 8. | CONCLUSIONES | 52 |
| 9. | BIBLIOGRAFÍA..... | 54 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. a) Árbol; b) flor y fruto de <i>G. arborea</i> | 4 |
| Figura 2. a) Árbol; b) rodaja de <i>G. arborea</i> | 19 |
| Figura 3. a) Probetas expuestas a 180°C; b) Probetas tratadas en aire caliente..... | 20 |
| Figura 4. a) Probetas tratadas en aceite caliente a 180°C; b) Probetas después de ser tratadas..... | 21 |
| Figura 5. Diagrama de Esfuerzo- Deformación..... | 25 |
| Figura 6. Montaje de las probetas expuestas al hongo <i>T. versicolor</i> y <i>G. trabeum</i> | 26 |
| Figura 7. Obtención de los extractos de <i>Gmelina arborea</i> ; a) equipo Soxhlet; b) solventes evaporados a baño maría; c) extracto obtenido. | 28 |
| Figura 8. Efecto del termotratamiento en la densidad normal..... | 30 |
| Figura 9. Efecto del termotratamiento en la densidad básica. | 31 |
| Figura 10. Efecto del termotratamiento en la densidad básica. | 32 |
| Figura 11. Absorción de agua en madera termotratada | 33 |
| Figura 12. Hinchamiento radial en madera termotratada | 34 |
| Figura 13. Hinchamiento tangencial en madera termotratada..... | 35 |
| Figura 14. Contracción radial en madera termotratada | 37 |
| Figura 15. Módulo de ruptura en diferentes tratamientos expuestos <i>Gloeophyllum trabeum</i> | 40 |
| Figura 16. Módulos de elasticidad en diferentes tratamientos expuestos a <i>Gloeophyllum trabeum</i> | 42 |
| Figura 17. Esfuerzos al límite de proporcionalidad en diferentes tratamientos expuestas a <i>Trametes versicolor</i> | 43 |
| Figura 18. Esfuerzos al límite de proporcionalidad en diferentes tratamientos expuestos a <i>Gloeophyllum trabeum</i> | 43 |
| Figura 19. Crecimiento del micelio a 3 meses de exposición a <i>Trametes versicolor</i> ; | 44 |
| Figura 20. Desarrollo del hongo <i>Gloeophyllum trabeum</i> a 3 meses de exposición en la madera; | 44 |
| Figura 21. Pérdida de masa expuesta a <i>Trametes versicolor</i> | 46 |
| Figura 22. Pérdida de masa expuesta a <i>Gloeophyllum trabeum</i> | 47 |
| Figura 23. Porcentajes de extractos de albura de <i>Gmelina arborea</i> | 49 |

Figura 24. Porcentajes de extractos de duramen de *Gmelina arborea*.....49

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|--|----|
| Ecuación 1. Densidad normal | 21 |
| Ecuación 2. Densidad básica | 21 |
| Ecuación 3. Densidad anhidra | 21 |
| Ecuación 4. Absorción de agua | 22 |
| Ecuación 5. Hinchamiento | 23 |
| Ecuación 6. Contracción | 23 |
| Ecuación 7. Contracción volumétrico | 23 |
| Ecuación 8. Esfuerzo al límite de proporcionalidad | 24 |
| Ecuación 9. Módulo de ruptura | 24 |
| Ecuación 10. Módulo de elasticidad | 24 |
| Ecuación 11. Pérdida de peso | 27 |
| Ecuación 12. Contenido de humedad | 27 |
| Ecuación 13. Porcentaje de extractos | 29 |

RESUMEN

En la actualidad, en México, las plantaciones forestales comerciales están tomando gran auge con especies de rápido crecimiento. La especie *Gmelina arborea*, es una especie forestal asiática, ampliamente utilizada a nivel mundial. Sin embargo, es susceptible al ataque de insectos y hongos de la pudrición.

Por lo que en este estudio se evaluó el efecto del tratamiento térmico en aire caliente y en aceite caliente sobre las propiedades físico-mecánicas, químicas y de resistencia a la pudrición por hongos en la madera de *Gmelina arborea*.

Los tratamientos térmicos aumentaron la absorción de agua, el hinchamiento y la contracción en la madera. La resistencia a la compresión paralela se incrementó con la aplicación de los tratamientos térmicos. La resistencia disminuyó con la degradación de hongos. La madera termotratada presentó mayor pérdida de masa por los hongos de pudrición que la madera sin tratar. El tratamiento térmico disminuyó el porcentaje de extractos totales en la madera.

El termotratamiento afectó principalmente al duramen disminuyendo la cantidad de lignina, la albura presentó una disminución en las hemicelulosas y celulosa que dio como resultado un aumento en la lignina.

Palabras clave: *Gmelina arborea*, termotratamiento, propiedades físico-mecánicas, químicas.

ABSTRACT

Currently, in México, commercial forest plantations are booming with fast-growing species. The species *Gmelina arborea*, is an Asian forest species, widely used worldwide. However, it is susceptible to attack by insects and fungi of rot.

Therefore, in this study, the effect of heat treatment in hot air and hot oil on the physical-mechanical, chemical and resistance to fungal rot in the wood of *Gmelina arborea* was evaluated. The heat treatments increased water absorption, swelling and shrinkage in the wood. The resistance to parallel compression was increased with the application of heat treatments. Resistance decreased with fungal degradation. Heat-treated wood has greater loss of mass due to rot fungi than untreated wood. The heat treatment decreased the percentage of total extracts in the wood.

The heat treatment mainly affected the heartwood, decreasing the amount of lignin, the sapwood showed a decrease in the hemicelluloses and cellulose that resulted in an increase in lignin.

Key Words: *Gmelina arborea*, heat treatment, physical and mechanical Wood properties, chemical.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en México, las plantaciones forestales comerciales están tomando gran auge con especies de rápido crecimiento. La especie *Gmelina arborea* Roxb, es una especie forestal originaria del continente asiático, y es ampliamente utilizada a nivel mundial. En México es una especie introducida por la característica de rápido crecimiento con un turno promedio de 12 años resulta interesante, además, de la adaptabilidad a las condiciones del lugar dónde se realizan las plantaciones, se considera que, se pueden acortar los turnos, sin disminuir la calidad de su madera. Esta especie se adapta fácilmente en regiones tropicales de Guerrero, Campeche, Tabasco, Veracruz, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca, Nayarit, Colima, Yucatán y Michoacán (Downs, 2003). Debido al éxito y las ventajas que han demostrado las especies introducidas para las condiciones ambientales del estado de Michoacán se considera que la Melina es una especie de gran interés económico, debido a su rápido crecimiento y gran variedad de usos en los que se puede emplear (Barrera, 2010).

La madera de melina tiene una velocidad de secado lenta y presenta una calidad media por la presencia de grietas y pandeos, y principalmente por presentar gran proporción de madera juvenil y debido a su rápido crecimiento (González y Serrano, 2004, Tamarit y López, 2007, y Moya y Leandro, 2010). El duramen es durable y con alta resistencia a exposiciones de suelo húmedo. Sin embargo, la albura se considera no durable y muy susceptible al ataque de hongos e insectos xilófagos (Arévalo y Londoño, 2005).

Las propiedades de la madera pueden ser modificadas por procesos industriales que incrementen su capacidad de respuesta ante condiciones adversas de servicio. Actualmente, se está aplicando termotratamiento a maderas de plantaciones forestales, con la finalidad de darles un valor agregado ya que les permite ser utilizadas en exteriores. El proceso de tratamiento térmico implica exponer la madera a temperaturas elevadas que varían de 160 a 260°C (Militz, 2002). El tratamiento térmico sirve para mejorar las propiedades de calidad de la madera, tales como la estabilidad dimensional y resistencia al ataque de agentes de deterioro como hongos, termitas y rayos UV. Debido a estos cambios la madera termotratada es considerada como un nuevo material con variedad de aplicaciones y propiedades (Vos, 2001).

Este estudio tiene como propósito analizar el efecto del tratamiento térmico en aire y el tratamiento térmico en aceite caliente en la madera de *Gmelina arborea* sobre las propiedades físico-mecánicas y evaluar su efecto en la resistencia a la degradación ocasionado por hongos de pudrición blanca y café. Así como, determinar el porcentaje de compuestos extraíbles presentes en la madera de *Gmelina arborea* de 12 años de edad.

El conocimiento de propiedades tecnológicas de *Gmelina arborea* a través del presente estudio complementará información requerida para ampliar los usos de esta especie a la intemperie, así como dar información importante para su procesamiento y transformación.

2. ANTECEDENTES

2.1. Generalidades de *Gmelina arborea* Roxb.

2.1.1. Origen y Distribución

La *Gmelina arborea* perteneciente a la familia Verbenaceae, también conocida como melina, yemane, gamari, teca blanca, gemelina, gmelina, gumhar, kashmirtree, malay, Gumhar, es nativa de India, Bangladesh, Sri Lanka, Myanmar, Tailandia, Sur de China, Laos, Camboya y Sumatra en Indonesia y es una importante fuente de madera en las regiones tropicales y subtropicales de Asia. La especie ha sido introducida en muchos países tropicales incluyendo Filipinas, Malasia, Brasil, Gambia, Costa Rica, Burkina Faso, Costa de Marfil, Nigeria, Malawi, Cuba, Colombia, Venezuela, Guatemala y México (Arévalo y Londoño, 2005). En México esta especie se adapta fácilmente en regiones tropicales de Guerrero, Campeche, Tabasco, Veracruz, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca, Nayarit, Colima, Yucatán, y Michoacán (Downs, 2003).

2.1.2. Requerimientos ambientales.

Es una especie que se desarrolla en hábitats que varían desde húmedos hasta secos. Se encuentran en forma natural principalmente en las selvas mixtas de Birmania, asociado con *Tectona grandis*, *Terminalia tormentosa* y otras especies de latifoliadas y bambúes. Su máximo desarrollo lo alcanza en los bosques más húmedos de Birmania, sobre todo en los valles húmedos y fértiles, en estas condiciones puede crecer hasta los 1260 msnm.

2.1.3. Descripción botánica.

Es un árbol de rápido crecimiento que alcanza hasta 30 metros de altura y presenta más de 80 cm de diámetro del fuste (Figura 1a). Crece usualmente con un fuste limpio de 6 hasta 9 m, marcadamente cónico, por lo regular de 50-80 cm de diámetro, en ocasiones hasta de 143 cm, sin contrafuertes, pero en ocasiones engrosado en la base. Presenta una copa amplia en sitios abiertos, pero en plantación su copa es densa y compacta. Corteza lisa o escamosa, de marrón pálida a grisácea. La melina tira sus hojas durante febrero y marzo, florece en marzo y abril y sus frutos maduran de mayo a junio. Las hojas grandes, de 10-25 cm de largo y 5-

18 cm de ancho, simples, opuestas, enteras, dentadas, usualmente más o menos acorazonadas, haz de color verde y glabra, por el envés verde pálido y aterciopelado. Inflorescencia en racimo o panícula cimosa terminal con numerosas flores amarillo anaranjadas, monoicas perfectas (Fig.1b). El fruto es una drupa ovoide u oblonga de 2.0 a 2.5 cm de largo, carnoso, succulento, con pericarpo coriáceo y endocarpo óseo, de color verde lustroso, tornándose amarillo brillante al madurar y olor desagradable (Arévalo y Londoño, 2005).



Figura 1. a) Árbol; b) flor y fruto de *G. arborea*

2.1.4. Usos

Para producción de pulpa para papel, tableros aglomerados y contrachapados; chapas decorativas, madera aserrada para construcción rural, vigas sólidas y laminadas, columnas sólidas, molduras, puntales para minas, postes de cerca y electricidad debidamente tratados, puertas y ventanas, muebles de interiores económicos, armarios, muebles de sala, cocina, oficina, palillos para fósforos, palillos para paleta y abatelenguas, lápices, embalajes y cajas económicas prefabricadas, tarimas, esculturas, artesanías, ebanistería, yugos, instrumentos musicales, construcción de botes, leña y carbón (Silva y col. 2010; Arévalo y Londoño, 2005;

Carpio, 2003; Benítez y Montesinos, 1988; Niembro, 1986). Es árbol de sombra y ornato, de las flores se extrae miel de excelente calidad (Rojas y col. 2004; Muñoz, 1998).

La madera de melina tiene una velocidad de secado lento y presenta una calidad media por la presencia de grietas y pandeos. Es fácil de aserrar, cepillar, moldurar. En cuanto acabados no presenta problemas para tallar, lijar, entintar, barnizar y pintar obteniendo un buen terminado, (González y Serrano, 2004; Tamarit y López, 2007; Moya y Leandro, 2010; Equihua, 2016). El duramen es durable y con alta resistencia a exposiciones de suelo húmedo. Sin embargo, la albura se considera no durable y muy susceptible al ataque de hongos e insectos xilófagos. La albura es reportada como fácil de ser preservada mediante el sistema de vacío- presión. Sin embargo, el duramen es impermeable (Arévalo y Londoño, 2005).

2.2. Tratamiento térmico en aire caliente.

El tratamiento térmico de la madera es una alternativa atractiva para mejorar la resistencia a la descomposición de especies de madera de baja durabilidad. Hoy en día, existen varios tipos de tratamientos térmicos de madera. Estos tratamientos difieren principalmente por la naturaleza de la atmósfera inerte utilizada para evitar la combustión de la madera que puede realizarse en diferentes medios como: nitrógeno, vacío, vapor y aceite. Las ventajas de la madera tratada es la reducción de la contracción e hinchamiento, bajo contenido de humedad en equilibrio, resistencia a la intemperie, un color oscuro decorativo, y mejor resistencia a la descomposición (Candelier y col. 2013; Yildiz, 2002; Leithoff y Peek, 1998). El tratamiento térmico de la madera tiene un efecto sobre la composición química degradando compuestos de la pared celular y extractivos. Los cambios químicos debidos al calentamiento dependen de la duración y temperatura del tratamiento, siendo la temperatura el principal factor (Bourgois y col. 1989). Las hemicelulosas son sensibles al calor sufre reacciones de deshidratación con la pérdida de numerosos grupos hidroxilos son los primeros compuestos estructurales en ser térmicamente afectados.

El proceso de tratamiento térmico implica exponer la madera a temperaturas elevadas que varían generalmente de 160 a 260°C por un tiempo de 15 min a 24 h dependiendo del proceso, las especies de madera, el tamaño de la muestra, el contenido de humedad de la muestra, las

propiedades mecánicas deseadas, la resistencia al ataque biológico y la estabilidad del producto final (Militz, 2002; Kamdem y col. 2002; Sanderman y Augustin, 1963).

El tratamiento de la madera a temperaturas más bajas durante periodos de tiempo más largos no produce las propiedades deseadas. Las temperaturas de más de 150°C alteran las propiedades físicas y químicas de la madera gradualmente (Syrjanen y Oy, 2001; Mitchell, 1988). Cuanto mayor sea la temperatura de tratamiento, mejor será la durabilidad biológica de la madera. Sin embargo, a temperaturas superiores a 150°C las propiedades de resistencia comienzan a debilitarse. La madera se vuelve más frágil, la flexión y la fuerza de tensión disminuyen en un 10-30% (Jamsa y Viitaniemi, 2001).

Por lo tanto, la madera tratada térmicamente es una alternativa ecológica a la madera impregnada con sustancias químicas que pueden ser nocivas para el medio ambiente. La madera tratada térmicamente se puede utilizar para el jardín, muebles de cocina y sauna, revestimiento de edificios de madera, gabinetes, material del piso, techos, puertas y ventanas, y una variedad de otras aplicaciones de madera para exteriores e interiores (Syrjanen y Oy, 2001).

Méndez (2016), evaluó el efecto del termotratamiento sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas en la madera de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* proveniente de plantaciones forestales expuestas a cuatro niveles de temperatura (205, 210, 215 y 220°C) y (185, 190, 195 y 200°C) respectivamente. Mostrando que la densidad presentó disminución con el aumento de la temperatura del termotratamiento en ambas especies. El porcentaje de contracción la madera de duramen con corte tangencial termotratada a 220°C para la especie de *Tectona grandis* y la madera de *Gmelina arborea* con corte tangencial termotratada a 195°C mostraron los mayores porcentajes de contracción en cada especie, el porcentaje de pérdida de masa aumento con el termotratamiento. El porcentaje de absorción presentó una disminución para *Tectona grandis* y un comportamiento irregular en *Gmelina arborea*. El cambio de color total (ΔE^*) aumento y el módulo de ruptura (MOR), se vio afectado mayormente en madera de duramen con corte radial de *Tectona grandis* y en la madera de *Gmelina arborea* con corte tangencial. La albura con corte tangencial termotratada a 205°C para *Tectona grandis* y en la madera sin termotratar presentó los valores más bajos. La

resistencia a la tensión presentó una disminución en ambas especies. La *Gmelina arborea* es más susceptible a la degradación en comparación con *Tectona grandis*.

Rivera (2015), evaluó el efecto del termo tratamiento en propiedades físico-mecánicas de la madera de *Vitex gaumeri* Greenm (Ya'axnik), a 160 y 200°C en un tiempo de 2.5 horas. Mostrando que la modificación térmica causó disminución en la humedad en equilibrio, densidad aparente, contracción e hinchamiento. Por otra parte, se incrementó la dureza axial, la resistencia a compresión paralela hasta en un 24% y el módulo de elasticidad en flexión estática hasta un 18%. Sin embargo, la resistencia a la extracción de clavos disminuyó por efecto del termotratamiento en aire caliente.

Garibay (2015), evaluó el efecto del termotratamiento en las propiedades físico-mecánicas de *Eucalyptus nitens* procedente de una plantación comercial, las temperaturas empleadas para el termotratamiento fueron 140, 180 y 220°C por tiempos de 1.5, 2.5 y 3.5 horas. Los resultados muestran que la madera sufre una disminución en la resistencia mecánica por efecto del termotratamiento que va del 6.7 al 53%. Mejorías en cuanto a hinchamiento y contracción se vieron reflejadas en la madera cuando se utilizaron temperaturas de 180°C en adelante por tiempos mayores a 2.5 horas.

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

Priadi y Hiziroglu (2013), en su trabajo evaluaron el efecto del tratamiento térmico sobre el hinchamiento, la dureza y la calidad de la superficie de cuatro especies, mindi (*Melia azedarach*), caoba (*Swietenia macrophylla*), roble rojo (*Quercus falcate*) y pino sureño (*Pinus taeda*). Los especímenes se expusieron a dos temperaturas de 130 y 200°C durante 2 y 8 h.

Los valores de hinchamiento del control y las muestras tratadas térmicamente se evaluaron sumergiéndolos en agua durante 2 h. Las muestras de control tenían valores de hinchamiento más altos en comparación con aquellas expuestas a niveles de temperatura de 130°C y 200°C. Las muestras de control de caoba tuvieron un valor de hinchamiento promedio de 2.5% como resultado de la inmersión en agua a 2 h. Cuando tales muestras se sumergieron en agua durante 2 h después del tratamiento térmico a 130°C, dicho valor fue del 2.0%. También se determinó una tendencia similar para las muestras de mindi, roble y pino. Las muestras control de pino tuvieron un valor de hinchamiento promedio de 6.5%, pero esto se redujo a 4.4% con una exposición a una temperatura de 200°C durante 8 h. Los valores de hinchamiento tangencial fueron más altos que los de la orientación de grano radial de la madera. La relación de contracción tangencial-radial en las muestras de control de mindi fue de 1.1%, mientras que las de las muestras de control de caoba, roble y pino fueron de 1.2, 1.4 y 1.9%, respectivamente. La dureza presentó una reducción debido al deterioro de la estructura de la pared celular, mientras tanto la estabilidad dimensional, calidad de la superficie de las cuatro muestras mejoro.

Candelier y col. (2013) realizaron un estudio para evaluar las reacciones de termodegradación que ocurren con el tratamiento en diferentes condiciones (vacío, nitrógeno, vapor), sobre de la madera de haya (*Fagus sylvatica*). Los tratamientos se realizaron a 220°C con pérdidas de masa de aproximadamente 12%. Mostrando que el contenido de extractos fue menor en el caso de las muestras de madera tratadas al vacío, mientras que el contenido de lignina, hemicelulosas y α -celulosas fue mayor en el caso de las muestras tratadas con vapor y nitrógeno, lo que indica una menor degradación de la madera bajo tratamiento al vacío. La durabilidad de muestras de madera de haya no tratadas y tratadas térmicamente en diferentes atmósferas inertes con diferentes hongos de pudrición parda y pudrición blanca. Todas las muestras tratadas térmicamente presentan una mejor durabilidad a la descomposición, mientras que las muestras no tratadas se degradaron fuertemente, presentando en todos los casos pérdidas de peso superiores al 25% según la especie de hongos utilizada. Ambos tratamientos permiten mejorar la resistencia a la descomposición de la madera, lo que se logra para pérdidas de masa de aproximadamente el 12%.

Kasemsiri y col. (2012), realizaron un estudio sobre la influencia del termotratamiento térmicos en la contracción, la densidad, la rugosidad de la superficie, la absorción de agua, el coeficiente de difusión, la hinchazón y la resistencia al corte de las muestras (*Juniperus virginiana*). Las muestras se exponen a niveles de temperatura de 120°C, 160°C y 190°C durante períodos de tiempo de 2 y 8 h. Mostrando que la contracción y la calidad de la superficie de las muestras mejora. La absorción de agua, los valores de hinchamiento y el coeficiente de difusión de las muestras también se reducen con el tratamiento térmico. La resistencia al corte presentó valores más bajos en la madera tratada que las de las muestras de control.

Calonego y col. (2011) reportaron para madera de *Eucaliptus grandis* un incremento máximo de 5.3% en la resistencia a la compresión cuando utilizaron un termotratamiento a 180°C. Sin embargo, obtuvieron una disminución de la resistencia a la compresión de 5.6% cuando utilizaron una temperatura de 220°C.

Gunduz y col. (2009), evaluaron los efectos del tratamiento térmico en las propiedades físicas y mecánicas de la madera de peral silvestre (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.). Las muestras se sometieron a tratamiento térmico a tres temperaturas 160, 180 y 200°C durante 3, 5 y 7 h a presión atmosférica. Mostrando que la densidad, el contenido de humedad en equilibrio, hinchamiento y resistencia a la compresión de peral silvestre disminuyó con termotratamiento, mientras que el color mejoro.

Korkut y col. (2008), evaluaron el efecto del tratamiento térmico sobre ciertas propiedades mecánicas del *Pinus sylvestris*. Las muestras de madera se sometieron a tratamiento térmico a presión atmosférica a temperaturas variables a 120, 150 y 180°C durante 2, 6 y 10 h. Mostrando que la resistencia a la compresión es paralela al grano, la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad en la flexión, la dureza Janka, la resistencia a la flexión por impacto y la resistencia a la tensión perpendicular presentaron una disminución con el tratamiento térmico.

Korkut y Guller (2008), examinaron los efectos del tratamiento térmico sobre las propiedades físicas y la rugosidad de la superficie de la madera de *Acer trautvetteri*. Las muestras se sometieron a tratamiento térmico a 120, 150 y 180°C durante 2, 6 y 10 h. Los valores de

densidad, hinchazón y rugosidad de la superficie disminuyeron al aumentar la temperatura del tratamiento y los tiempos de tratamiento.

2.3. Tratamiento térmico en aceite caliente

Los puntos de ebullición de muchos aceites y resinas naturales son mayores que la temperatura requerida para el tratamiento térmico de la madera. Esto abre la opción del tratamiento térmico de la madera en un baño de aceite caliente. Se pueden esperar mejoras en varias características de la madera con la aplicación de tratamiento de aceite-calor en comparación con el tratamiento térmico en una atmósfera gaseosa, debido al comportamiento de los aceites en conjunción con el efecto del calor. El proceso de tratamiento en aceite caliente es muy diferente de los otros porque se realiza en aceite caliente. La temperatura en el proceso varía de 180 a 260°C, y la duración es de varias horas. Cuando se usa este proceso, el aceite caliente bloquea el contacto entre la madera y el oxígeno. Por lo tanto, el tratamiento térmico en aceite caliente tiene menos efecto sobre las propiedades mecánicas que el aire caliente (Rapp y Sailer, 2001). Las temperaturas utilizadas durante el proceso para diferentes grados de mejora para obtener una durabilidad máxima y un consumo mínimo de aceite, el proceso funciona a 220°C. Para obtener máxima durabilidad y máxima resistencia se utilizan temperaturas entre 180 y 200°C más una absorción de aceite controlada.

Estudios realizados para evaluar la resistencia a la descomposición por hongos de pudrición blanca (*Coriolus versicolor*) y hongos de pudrición parda (*Coniophora puteana*) y las propiedades físicas de la madera de álamo (*Populus tremula*) tratado térmicamente con aceite. Se determinaron diferentes etapas de temperatura 190, 205 y 220°C y dos niveles de tiempo 4.5 y 6 horas para el tratamiento térmico con aceite de linaza como medio de calentamiento. Mostrando que la ganancia porcentual de peso se incrementó con el tratamiento, mientras que el contenido de humedad en equilibrio, contracción volumétrica y la absorción de agua mostraron una disminución en la madera tratada. Se obtuvo un incremento en la durabilidad en madera de álamo tratado expuesta a *Coriolus versicolor* y *Coniophora puteana* (Bazyar, 2012).

Bal., (2015), reportó que la madera de haya fue tratada en aceite caliente y en aire caliente para determinar las diferencias en los dos procesos sobre las propiedades físicas de la madera.

El tratamiento térmico se llevó a cabo a temperaturas de 160, 190 y 200°C durante 2 horas a presión atmosférica. Mostrando que la estabilidad dimensional, el contenido de humedad en equilibrio, el punto de saturación de la fibra y el contenido de humedad de las muestras tratadas con aceite caliente disminuyeron en mayor medida que las de las muestras tratadas con aire caliente. En general, se puede decir que el medio de tratamiento térmico utilizado tiene un efecto significativo en los resultados del proceso de tratamiento térmico. A las mismas temperaturas para el aceite caliente y el aire caliente, el aceite caliente fue más efectivo como material que transporta el calor y para inhibir el contacto del oxígeno con las muestras de madera.

Lacic y col. (2014) reportaron la durabilidad biológica del aliso (*Alnus glutinosa*) tratado térmico con aceite (OHT) contra cultivos puros de hongos de pudrición (*Postia placenta* y *Trametes versicolor*), la modificación se realizó calentando especímenes sumergidos en aceite de soja durante un periodo de 6 y 10 horas a temperatura de 180 y 200°C. Los resultados mostraron un aumento significativo en la durabilidad biológica de madera de aliso modificada contra ambos hongos. El efecto de OHT sobre el aumento de la durabilidad biológica de la madera de aliso era más alta contra el hongo *P. placenta*.

Rapp y Sailer (2001), reporta que la madera de *Pinus sylvestris* L, y *Picea abies* L. tratados con calor a 180 y 220°C durante 4.5 h y expuestos al hongo de la putrefacción marrón *C. puteana* presentó una pérdida de masa promedio del 11 y 5.5% respectivamente. En los ensayos de *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* y *Picea abies*, no tratados, los hongos *C. versicolor* y *Coniophora puteana* perdieron 9% y 26%, 4% y 12%, 1% y 9% y 12 % y 19%, respectivamente. Cuando las mismas maderas fueron modificadas térmicamente y expuestas a los mismos hongos de descomposición, la pérdida de peso siempre fue inferior al 4% (Millitz y Tjeerdsma, 2001).

2.4. Degradación por hongos de pudrición

La madera como material de origen orgánico compuesto fundamentalmente por celulosa, lignina y hemicelulosas, es especialmente estable, no obstante, forma parte de la alimentación de organismos vivos del reino vegetal (hongos) y del reino animal (insectos, moluscos, crustáceos). La principal degradación biológica de la madera, ocurre por acción de hongos

conocidos como xilófagos o destructores de la madera. Los hongos xilófagos tienen importancia biológica por ser organismos que pueden invadir arboles vivos ocasionando su muerte, son recicladores del material orgánico en la naturaleza. Sin embargo, los hongos xilófagos pueden causar grandes pérdidas económicas al degradar madera aserrada y productos terminados. La acción de los hongos sobre la madera se debe al ataque mediante un sistema complejo de enzimas específicas, que actúan sobre los componentes principales de la pared celular (celulosa, lignina, y hemicelulosa) degradándolas, y alterando así las propiedades mecánicas, físicas, estéticas, higroscópicas, químicas y anatómicas (Salinas y Pérez, 1977; Rowell, 1993; Winandy y Rowell, 2005).

Los dos principales tipos de pudrición de la madera se clasifican en base a los componentes degradados de la madera (Martínez y col. 2005). En la pudrición café o parda, la degradación enzimática se dirige a la holocelulosa (celulosa y hemicelulosas) quedando la lignina residual parcialmente degradada. En la pudrición blanca, la degradación está dirigida a la lignina lo que origina una apariencia blanquecina de la madera (Lomelí, 1992). Los hongos provocan la degradación de la estructura de la madera, provocando la pérdida de resistencia mecánica.

Bari y col. (2015), reportan capacidades de degradación de dos hongos de pudrición blanca (*Pleurotus ostreatus* y *Trametes versicolor*) en madera de Haya (*Fagus orientalis*). Se evaluó la pérdida de masa, resistencia a la compresión paralela al grano y la resistencia a la carga de impacto, así como el contenido de lignina, celulosa y hemicelulosas. Los resultados obtenidos en pérdida de masa, pérdida de resistencia y la reducción de los componentes químicos de la madera de Haya fueron similares para ambos hongos.

Pardo y Alfaro (2013), evaluaron la resistencia de madera de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* modificada químicamente con anhídrido acético, contra un hongo de pudrición blanca *Trametes versicolor*. Para la *Tectona grandis* encontraron que la modificación química mediante acetilación produce un alto grado de resistencia contra el hongo de pudrición blanca (*Trametes versicolor*) con porcentaje de pérdida de peso del 13% para muestras no tratadas y 3% para muestras tratadas. Para *Gmelina arborea* la resistencia de ataque fúngico con un porcentaje de pérdida de peso para muestras no tratadas de 44% para muestras tratadas con un 3%.

Calonego y col. (2010), realizaron un estudio en el cual evaluaron el efecto del tratamiento térmico sobre la resistencia biológica de la madera de *Eucalyptus grandis* al hongo *Picnoporus sanguineus* modificados térmicamente a 140, 160, 180, 200 y 220°C. El experimento puso a prueba la descomposición acelerada causada por el hongo de desintegración *P. sanguineus* en un sistema de madera de bloque de suelo. Los resultados del tratamiento térmico de la madera de *E. grandis* aumenta su durabilidad frente al hongo de desintegración *P. sanguineus*. Para temperaturas entre 180 y 220°C, se detectó una reducción significativa en el peso de pérdida de madera, de un 15%, cuando se sometió a la prueba de bloqueo de suelo.

Castro y Márquez (2008), reportan que evaluaron la estabilidad de la madera frente a deterioro causado por los diferentes microorganismos presentes en el suelo. Las muestras Pino caribeño (*Pinus caribaea*) después de 12 meses, fueron totalmente destruidas por termitas y en algunos casos solamente permaneció la superficie de las estacas. La madera de Melina (*Gmelina arborea*), fue atacada en menor proporción que la del Pino caribeño. Observaciones más detalladas en las estacas de Pino caribeño utilizando un microscopio electrónico de barrido, permitieron analizar los ataques incipientes y degradación avanzada del hongo de pudrición blanda en la pared celular. La madera de melina presentó pudrición blanda.

2.5. Química de los extraíbles

Los extraíbles de la madera son sustancias que no se consideran parte estructural esencial de la pared celular o de la lámina media, a diferencia de la celulosa, hemicelulosas y la lignina que forman parte de la estructura, estas sustancias extraíbles generalmente son solubles en uno o más de los solventes polares y no polares. Los extraíbles cubren una amplia gama de compuestos químicos a pesar de que generalmente representan solo una pequeña parte de la madera, pueden afectar significativamente las propiedades de la madera. De esta manera, la resistencia de una madera a los ataques de microorganismos e insectos, su color, olor y sabor, o flamabilidad, deben ser atribuidos a los materiales extractivos.

Estudios realizados para evaluar la composición química de la madera de *Gmelina arborea* (Blanco y Carpio, 2005; Moya y Leandro, 2010; Paz, 2008), reportaron la composición para

holocelulosa 58-60.6 %, lignina 25-30%, extractos totales 7.9-10% y cenizas 0.71-1.5%. En base a su análisis químico encontraron nitrógeno 1000 mg/kg, fósforo 400 mg/kg, calcio 2300 mg/kg, magnesio 500 mg/kg, potasio 3300 mg/kg, hierro 15.85-182 mg/kg, cobre 2-16 mg/kg y manganeso 4-6 mg/kg.

Moya y col. (2017), reportan un análisis termo gravimétrico y de volatilización para cinco especies de plantación (*Cupressus lusitanica*, *Dipterix panamensis*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Vochysia ferruginea*) y evaluaron el efecto de extractivos, composiciones de cenizas, composiciones químicas y parámetros energéticos. Mostrando que la especie con mayor contenido de celulosa y lignina es *C. lusitanica*, mientras que la especie con menor contenido de celulosa y lignina fue *V. ferruginea*. Las especies *D. panamensis* y *T. grandis* presentaron mayor contenido de cenizas, mientras que las demás mostraron valores inferiores al 1%. En cuanto a la evaluación del contenido de extractos en diversos solventes, las especies que mostraron la mayor cantidad de extractivos en NaOH al 1% fueron *V. ferruginea*, *G. arborea* y *T. grandis*. La cantidad de extractos solubles en agua (caliente y fría) fue mayor en *D. panamensis* y *V. ferruginea*, mientras que *C. lusitanica* mostró el valor más bajo. En cuanto a los extractos solubles en CH₂Cl₂, la especie con mayor cantidad fue *V. ferruginea*, *G. arborea* y *T. grandis*. La *V. ferruginea* nuevamente mostró un mayor porcentaje de extractivos en una solución de etanol-tolueno, mientras que *G. arborea* mostró la cantidad más baja en esta solución.

Brito y col. (2008) investigaron la influencia del tratamiento térmico en la composición química de *Eucalyptus saligna* y *Pinus caribaea*. Las maderas hondurensis se trataron en un horno eléctrico de laboratorio a 120, 140, 160 y 180°C para inducir su tratamiento térmico. Los resultados demostraron que los contenidos de arabinosa, manosa, galactosa y xilosa de la madera tratada térmicamente disminuyeron significativamente en comparación con la madera original tanto de *Pinus* como de *Eucalyptus*. Sin embargo, el contenido de glucosa no se alteró en un nivel significativo. Dado que la lignina presenta una mayor resistencia al calor, hubo un aumento significativo y proporcional en su contenido. En cuanto al contenido extractivo, se observaron diferentes comportamientos para las dos especies. Para *Eucalyptus*, el contenido extractivo tendió a aumentar, aunque las diferencias entre los promedios de

tratamiento solo fueron estadísticamente significativas para la madera tratada térmicamente a 180°C. Para *Pinus*, hubo una reducción significativa en el contenido extractivo.

2.6. Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

La espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) se utiliza como una técnica para obtener información rápida sobre la estructura de los componentes de la madera.

Méndez (2016), estudio las propiedades químicas utilizando espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) en madera termotratada de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* expuestas a cuatro niveles de temperatura 205, 210, 215 y 220°C y 185, 190, 195 y 200°C respectivamente. Se encontró que los valores de intensidad en las señales a 1053 y 1108 cm^{-1} fueron mayores, las cuales son asociadas a aumentos en las vibraciones de estiramiento en los anillos de glucosa y modificación de celulosas y hemicelulosas respectivamente.

Ôzgenic y col. (2016) utilizaron técnicas de espectroscopia de Fourier atenuada (ATR-FTIR) y de espectroscopia Raman (FT-Raman) de transformada de Fourier para determinar los cambios en la estructura química de las maderas termotratadas de *Pinus sylvestris*, *Fagus orientalis*. y *Picea orientalis*. Mostrando que el termotratamiento causó la destrucción de las hemicelulosas dando origen a la formación de ácidos orgánicos como el ácido acético y el ácido fórmico. Estos ácidos pueden causar una degradación de los polisacáridos y una disminución en el grado de polimerización. La alta temperatura afecto las estructuras amorfas de la celulosa, lo conlleva a un aumento de la parte cristalina de la celulosa. Una disminución en el contenido de celulosa y hemicelulosa durante el tratamiento también aumenta el contenido relativo de lignina.

Popescu y col. (2013), observo las modificaciones químicas de la madera de *Tilia cordata* durante el termo tratamiento a 140°C y 10% de humedad relativa, mediante Espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FT-IR), análisis de componentes principales y espectroscopia de correlación infrarroja bidimensional mostrando cambios químicos inducidos por la degradación de hemicelulosas en mayor medida y también a la otra degradación de los componentes.

Estudios sobre la descomposición fúngica de la madera se han estudiado usando espectroscopia FTIR y FT-Raman; Durmaz y col. (2016) estudiaron los cambios químicos de la madera de abeto degradada por hongos de pudrición marrón (*Coniophora puteana*) utilizando espectroscopia FT-IR y FT-Raman. Pandey y Pitman (2003), estudiaron los cambios químicos en albura de *Pinus sylvestris* y *Fagus sylvatica*. degradados por *Coniophora puteana*, *Coriolus versicolor* y *Phanerochaete chrysosporium* mediante espectroscópico infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR). Fackler y col. (2011), estudiaron la descomposición incipiente de la pudrición parda (*Gloeophyllum trabeum* o *Poria placenta*) dentro de las paredes de la madera de abeto mediante microscopía de imagen infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) de transmisión.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general.

- Analizar el efecto del tratamiento térmico en aire caliente y tratamiento térmico en aceite caliente, en la madera de *Gmelina arborea* sobre las propiedades físico-mecánicas y la resistencia a la degradación por hongos de pudrición blanca (*Trametes versicolor*) y pudrición café (*Gloeophyllum trabeum*). Así como, analizar los extraíbles de esta especie.

3.2 Objetivos específicos.

- Aplicar tratamiento térmico en aire caliente en la madera.
- Aplicar tratamiento térmico en aceite caliente en la madera.
- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas en madera tratada y no tratada:
 - Densidad
 - Absorción de agua
 - Hinchamiento y Contracción
 - Pérdida de masa
 - Compresión paralela a la fibra
- Obtener el porcentaje de compuestos extraíbles presentes en la madera sin tratar y tratada térmicamente en aire caliente de *Gmelina arborea*.
- Determinar vía FTIR los cambios en grupos funcionales, debidos al tratamiento térmico.

4. HIPÓTESIS.

- Los tratamientos térmicos en aire y aceite aumentan la resistencia a la compresión paralela.
- Los tratamientos térmicos reducen la degradación por hongos de pudrición blanca y café en la madera.
- La madera de melina presenta un porcentaje considerable de compuestos extraíbles que puedan afectar en el proceso de secado.

5. JUSTIFICACIÓN.

En la actualidad, en México las plantaciones forestales comerciales están tomando gran auge con especies de rápido crecimiento. La especie *Gmelina arborea* es de rápido crecimiento es ampliamente utilizada con un aprovechamiento promedio de 12 años resulta interesante. Sin embargo, la albura de la melina es muy susceptible al ataque de hongos de pudrición y termitas.

En este estudio se aplicó tratamiento en aire caliente y tratamiento térmico en aceite a la madera de *Gmelina arborea* con la finalidad de evaluar su efecto sobre las propiedades físico-mecánicas y reducir la degradación al biodeterioro ocasionado por hongos de pudrición blanca (*Trametes versicolor*) y pudrición café (*Gloeophyllum trabeum*), con ello incrementar los usos de esta especie a la intemperie.

Se determinarán los porcentajes de extraíbles de la madera sin tratamiento y con tratamiento térmico para colaborar si estos influyen en el proceso de secado. Debido a que la melina tiene una velocidad de secado lenta y presenta una calidad media por la presencia de grietas y pandeos.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Material de estudio.

Los dos árboles seleccionados provinieron de plantación de Melina y Teca localiza en el rancho “La Guadalupe”, municipio de Nuevo Urecho, Michoacán., entre los 19° 12' 38" de latitud norte y los 101° 53' 07" de longitud oeste. La altitud en el lugar es de 514 msnm, con clima: cálido subhúmedo con lluvias en verano (DETENAL, 1979). Los árboles de 12 años de edad presentaban una altura promedio de 10 m (8 - 12 m), con diámetro promedio de 30 cm en el tronco (Fig. 2).

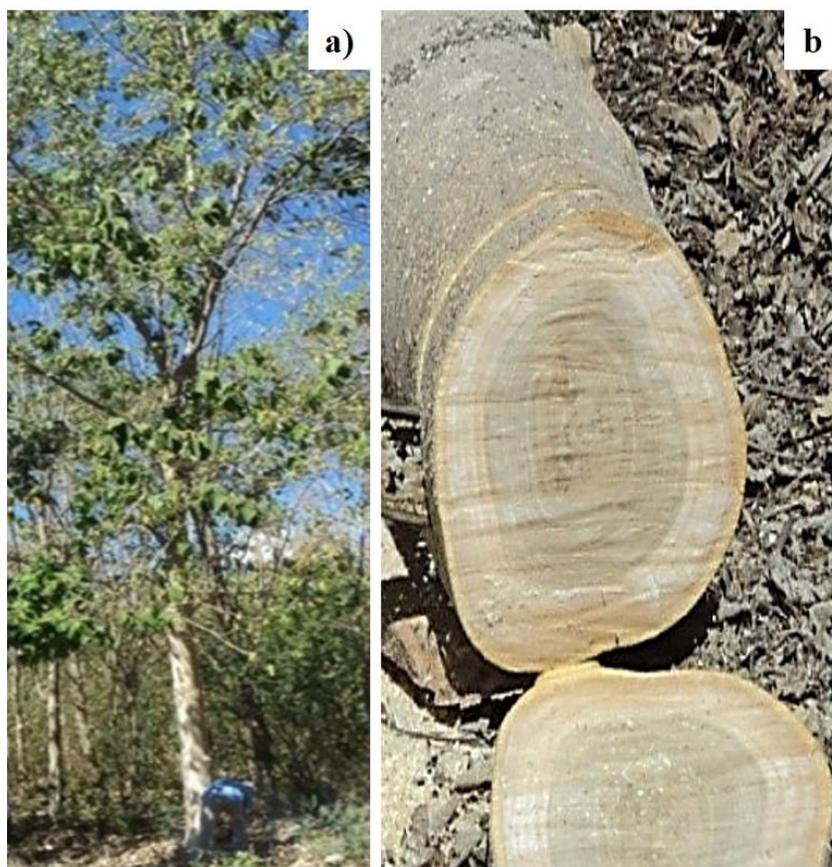


Figura 2. a) Árbol; b) rodaja de *G. arborea*

6.2. Termotratamientos.

6.2.1. Tratamiento térmico en aire caliente.

La aplicación de termotratamiento se llevó a cabo en presencia de oxígeno utilizando un horno marca Felisa® con programación digital y una capacidad de 250°C. Las probetas se sometieron a termotratamiento por un tiempo 2.5 horas a una temperatura de 180°C (Fig. 3).

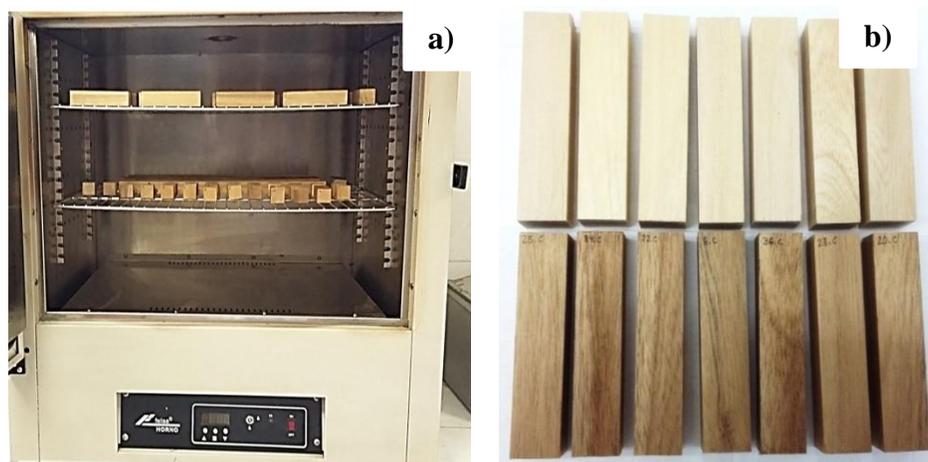


Figura 3. a) Probetas expuestas a 180°C; b) Probetas tratadas en aire caliente.

6.2.2. Tratamiento térmico en aceite.

Las probetas de madera empleadas para las pruebas físico- mecánicas se sumergieron en el aceite caliente a una temperatura de 180°C por un tiempo de 2.5 horas, posteriormente cumplido el tiempo del tratamiento las probetas se retiraron para su análisis (Fig. 4a y 4b).

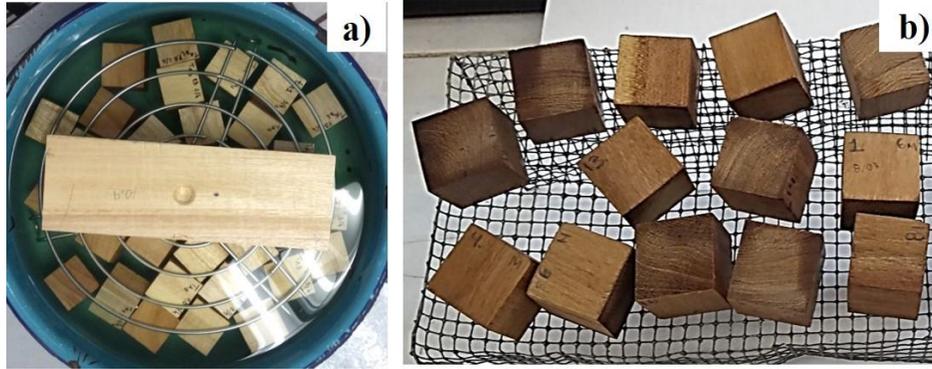


Figura 4. a) Probetas tratadas en aceite caliente a 180°C; b) Probetas después de ser tratadas.

6.3. Propiedades físicas.

6.3.1. Densidad.

La densidad de la madera es una de las propiedades más importantes ya que de ella depende en gran porcentaje su comportamiento mecánico, su trabajabilidad, su aptitud a los acabados, su estabilidad dimensional y su capacidad calorífica. En este trabajo se determinó la densidad normal, densidad básica y densidad anhidra, utilizando probetas de acuerdo a las especificaciones de la D143-94 ASTM, las probetas se midieron las dimensiones y se pesaron, para después colocarlas en el horno a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta peso constante. Para la determinación de densidades se utilizaron las ecuaciones (1, 2 y 3).

$$D_n = \frac{P_h}{V_h} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$D_b = \frac{P_o}{V_v} \quad \text{Ec.(2)}$$

$$D_o = \frac{P_o}{V_o} \quad \text{Ec.(3)}$$

Dónde:

D_n = Densidad normal (g/cm^3)

P_h = Peso a un contenido de humedad determinado (g)

D_b = Densidad básica (g/cm^3)

P_o = Peso anhidro (g)

V_h = Volumen a un contenido de humedad determinado (cm^3)

V_v = Volumen verde (cm^3)

D_o = Densidad anhidra (g/cm^3)

V_o = Volumen anhidro (cm^3)

6.3.2 Absorción de agua.

Para este ensayo se utilizaron probetas de acuerdo a las especificaciones de la norma D143-94 ASTM. Las cuales se colocaron en inmersión en agua por periodos de 2, 24 y 48 horas. Posteriormente las muestras se pesaron antes y después de cada periodo. Para el registro del peso se utilizó una balanza analítica con precisión de 0.001g. De los datos generados se determinaron los porcentajes de absorción de agua con la Ecuación (4).

$$\text{Abs. A} = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100 \quad \text{Ec. (4)}$$

Dónde:

Abs. A= Absorción de agua a 2, 24 y 48 h.

P_2 = Peso después de la inmersión en agua.

P_1 = Peso antes de la inmersión en agua.

6.3.3 Hinchamiento y Contracción.

Para la determinación de hinchamiento se emplearon probetas de acuerdo a las especificaciones de la norma D143-94 ASTM. Las cuales fueron medidas en los tres ejes de la madera, Radial (R), Tangencial (Tg) y Longitudinal (L) y posteriormente se mantuvieron inmersas en agua a 2, 24 y 48 horas, en cada periodo se pesaron y midieron para determinar los porcentajes de hinchamiento con la ecuación (5). Para la determinación de los porcentajes de contracción radial, tangencial, longitudinal y volumétrica se emplearon las ecuaciones (6) y (7).

$$\alpha = \frac{D_v - D_o}{D_o} \times 100 \quad \text{Ec.(5)}$$

$$\beta = \frac{D_v - D_o}{D_v} \times 100 \quad \text{Ec.(6)}$$

$$C_v = \frac{V_v - V_o}{V_v} \times 100 \quad \text{Ec.(7)}$$

Dónde:

α = Hinchamiento a 2, 24 y 48 horas de inmersión en agua

β = Contracción por secado después de la inmersión en agua.

D_{vr} = Dimensión saturada después de inmersión en agua

D_{or} = Dimensión anhidra en sentido radial

C_v = Contracción volumétrica

V_v = Volumen verde

V_o = Volumen anhidro

6.4. Propiedades mecánicas.

6.4.1 Determinación de compresión paralela a la fibra.

En esta prueba participan dos fuerzas axiales opuestas las cuales producen un aplastamiento de la pieza. Las dimensiones de las probetas fueron de 25 x 25 x 100 mm (D143-94 ASTM) de madera tratada térmicamente en aire caliente y probetas tratadas térmicamente en aceite, las cuales fueron expuestas al hongo de pudrición blanca (*Trametes versicolor*) y pudrición café (*Gloeophyllum trabeum*). Las evaluaciones se realizaron a 3 y 6 meses de exposición. Para la determinación del esfuerzo al límite de proporcionalidad (ELP), módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE), se utilizaron las ecuaciones (8), (9) y (10).

$$E_{LP} = \frac{P_{LP}}{A} \quad \text{Ec. (8)}$$

$$MOR = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$MOE = \frac{P_{LP} L}{e_{LP}} \quad \text{Ec. (10)}$$

Dónde:

E_{LP} = Esfuerzo al límite de proporcionalidad (kg/cm²)

P_{LP} = Carga al límite de proporcionalidad (kg)

A = Área resistiva (cm²)

MOR = Módulo de ruptura (kg/cm²)

P = Carga máxima (kg)

MOE = Módulo de elasticidad (kg/cm²)

e_{LP} = Deformación al límite de proporcionalidad (cm)

L = Longitud (cm)

Para la determinación del esfuerzo al límite de proporcionalidad, módulo de ruptura y módulo de elasticidad se determinaron al diagrama Esfuerzo deformación (Fig.5).

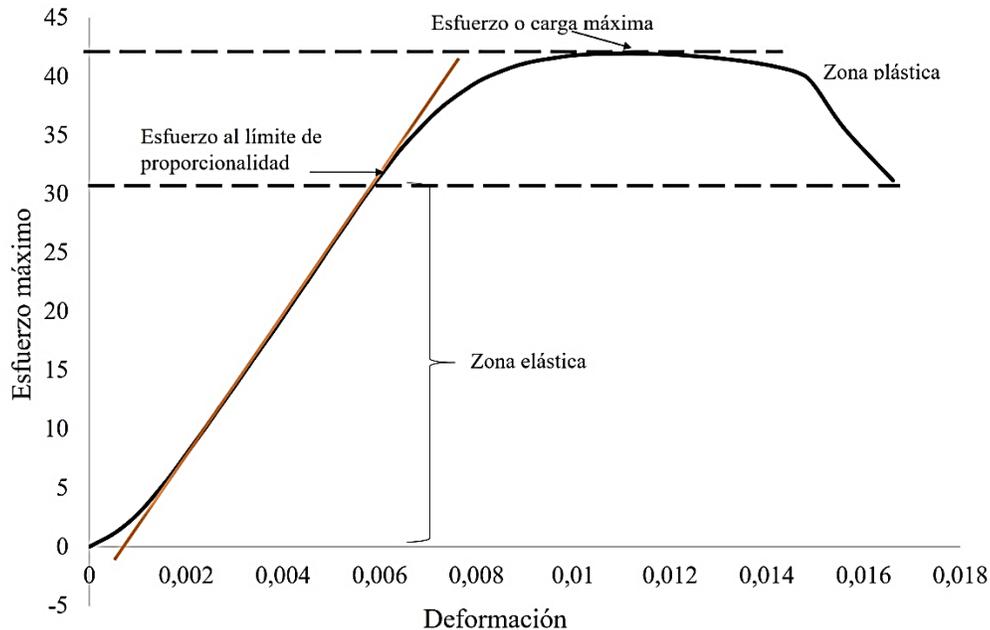


Figura 5. Diagrama de Esfuerzo- Deformación

6.5 Degradación por hongos de pudrición.

Este ensayo se basó en las especificaciones de la norma D2017- 81 ASTM. "Pruebas aceleradas de laboratorio de resistencia a la descomposición natural de madera". Se emplearon probetas de *Gmelina arborea* de dimensiones de 2.5 x 2.5 x 2.5 cm sin tratar y con tratamientos térmicos.

6.5.1 Medio de cultivo.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron dos hongos xilófagos. El primero de pudrición blanca (*Trametes versicolor*) y el segundo de pudrición café (*Gloeophyllum trabeum*).

Como medio de cultivo para los dos hongos (*Trametes versicolor* y *Gloeophyllum trabeum*) se empleó agar papa y dextrosa. Su preparación consistió en agregar en un frasco 11.7 g de agar papa y dextrosa y 300 ml de agua destilada la cual se agitó, posteriormente la solución se introdujo en autoclave durante 90 min, a una presión de 1.40 kg/cm² (121°C). Finalizando

este proceso, el medio de cultivo se extrajo de la autoclave y se dejó enfriar. Por último, en el interior de la cámara de flujo laminar se llenaron 10 cajas Petri, previamente esterilizadas y se dejaron unos minutos. Para la inoculación de los hongos se extrajo con ayuda de una pipeta pasteur, de las cepas originales, de ambos hongos. Cada inóculo se colocó en el interior de las cajas Petri preparadas con medio de cultivo. Una vez inoculadas se llevaron a la cámara de incubación a una temperatura de 28°C durante dos semanas dependiendo el tipo de hongo para que cubrieran la totalidad del medio de cultivo. Una vez transcurrido el tiempo se raspó el micelio con un asa microbiana de cada caja Petri y se colocó en un frasco con agua estéril.

6.5.2 Preparación del sustrato suelo

El sustrato suelo fue esterilizado para después depositar las cantidades necesarias en cada frasco, posteriormente las probetas se introdujeron en cada uno de los frascos de ensayo y después se les agregó el micelio de *Trametes versicolor* y *Gloeophyllum trabeum* como se muestra en la (Fig. 6) posteriormente se colocaron en una estufa de cultivo a una temperatura de 28°C por un tiempo de 3 y 6 meses para su posterior evaluación de pérdida de peso de cada probeta.

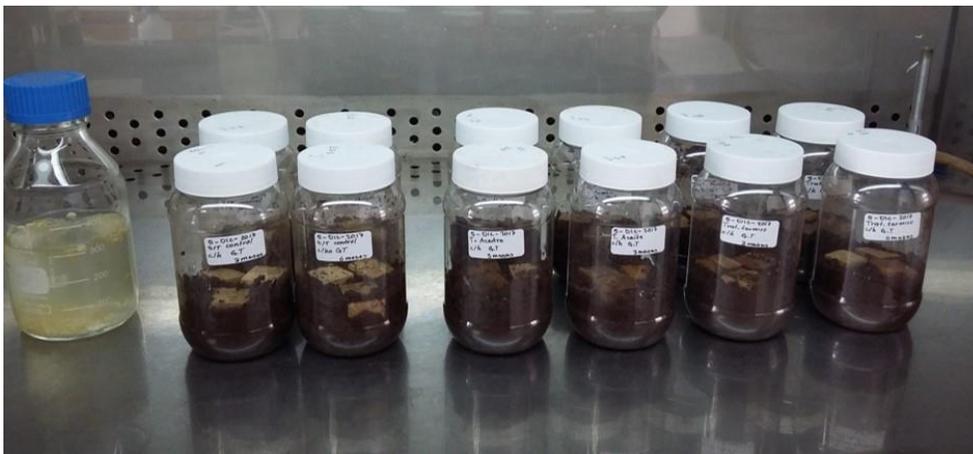


Figura 6. Montaje de las probetas expuestas al hongo *T. versicolor* y *G. trabeum*.

6.5.3 Retiro de las probetas y estabilización

Con el fin de verificar el desarrollo uniforme del micelio y la posibilidad de contaminación, las probetas fueron examinadas semanalmente. Al cabo de 3 meses las probetas se extrajeron y se les retiró el micelio cuidadosamente. Luego las probetas fueron pesadas inmediatamente. Después, fueron secadas en horno hasta su peso constante, para así determinar su peso seco. Para determinar los porcentajes de pérdida de peso debidos al ataque de los hongos se utilizó la ecuación (11).

$$\text{Pérdida de peso} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad \text{Ec. (11)}$$

Dónde:

PP= Pérdida de peso (%)

P₁= Peso inicial del ensayo (g)

P₂= Peso después del ataque de hongo (g)

6.6 Extraíbles de la madera.

Las muestras de madera (duramen y albura) de *Gmelina arborea*, fueron astilladas, secadas y molidas en un molino Wiley de acuerdo con la norma T-157 (TAPPI, 2000) obteniendo la harina de madera, la cual se clasificó con tamices, para el análisis químico se empleó la fracción que pasó por la malla 40 (420µm) y que fue retenida en malla 60 (250 µm).

6.6.1 Determinación del contenido de humedad en la harina de madera.

Se realizó el cálculo para determinar el contenido de humedad presente en la harina de la extracción con la siguiente ecuación (12).

$$\text{CH} = \left(\frac{Ph_1 - Po_1}{Po_1} \right) \times 100 \quad \text{Ec. (12)}$$

Dónde:

CH= Contenido de humedad (%)

Ph₁= Peso húmedo (g)

Po₁= Peso anhidro (g)

6.6.2 Obtención de los extractos.

Para determinar la cantidad de sustancias extraíbles, se emplearon 10 g de harina de madera y se obtuvieron mediante extracción sucesiva en equipo Soxhlet con solventes de menor a mayor polaridad: hexano, acetato de etilo, acetona, agua (Fig. 7a). Los periodos de extracción fueron de cinco horas. Los extractos se recuperaron evaporando los solventes a baño maría (Fig. 7b), para así obtener el extracto el cual se colocó en un desecador, con gel de sílice como agente desecante (Fig. 7c).

El contenido de extraíbles para cada solvente se calculó dividiendo el peso del extracto anhidro entre el peso de la harina anhidra referido porcentualmente con la siguiente ecuación (13). Los extraíbles totales se calcularon con la suma de los porcentajes de los extraíbles de cada solvente.

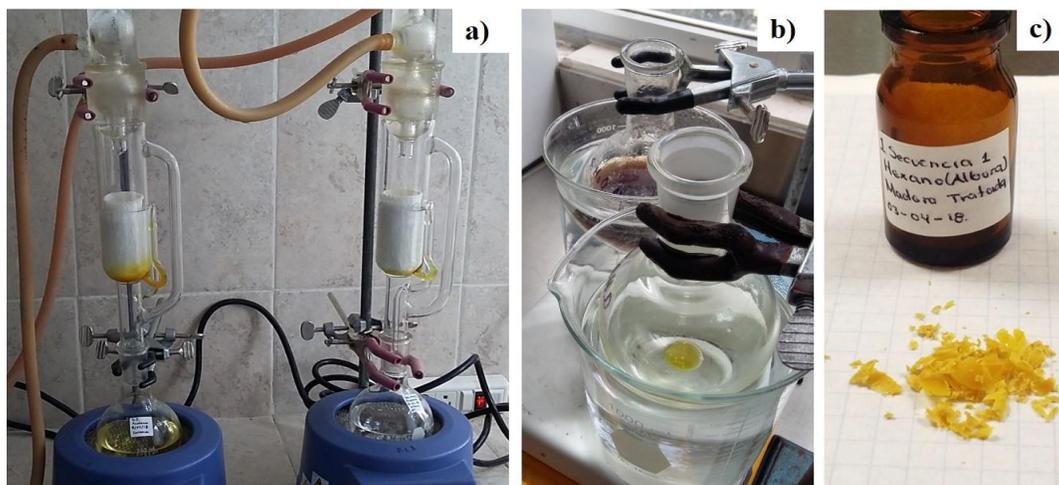


Figura 7. Obtención de los extractos de *Gmelina arborea* ; a) equipo Soxhlet; b) solventes evaporados a baño maría; c) extracto obtenido.

$$\% \text{Extractos} = \frac{P_o - P_{LE}}{P_o} \times 100 \quad \text{Ec. (13)}$$

Dónde:

% Extractos= porcentaje de extraíbles

P_o= peso de la harina antes de la extracción

P_{LE}= peso de la harina libre de extraíbles

6.7 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).

La madera de *Gmelina arborea* fue separada en albura y duramen tratada térmicamente en aire caliente a temperatura de 180°C por un tiempo de 2.5 horas. La madera sin tratamiento y con tratamiento fue astillada, secada y molida con un molino Wiley de acuerdo con la norma T-157(2000). La harina de madera, se tamizó en malla 40 (420µm) y retenida en malla 60 (250 µm).

Las mediciones de FT-IR con técnica de reflexión total atenuada (ATR) se registraron usando un espectrómetro Thermo Nicolet iS10. Los espectros se registraron en un modo de absorbancia de 4000 a 400 cm⁻¹ a una resolución espectral de 4 cm⁻¹. Los espectros de las muestras de madera se evaluaron mediante el software OMNIC™ (Thermo Electron Corporation, Madison, WI, EE. UU.).

6.8 Análisis estadístico.

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Statiscal Analysis System (SAS), realizando estudios de análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de rango múltiple de Duncan a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05\%$.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Densidad normal, básica y anhidra

La densidad normal y densidad básica promedio de la madera de *Gmelina arborea* sin tratar fue de 0.49 y 0.42 g/cm³ clasificándose como media de acuerdo Espinoza (2018) y Echenique y Plumtre (1994) respectivamente. La densidad básica fue similar a lo reportado por Arévalo y Londoño (2005), Benítez y Montesinos (1988), Moya y Leandro (2010), quienes presentan valores de 0.40, 0.41 y 0.48 g/cm³, respectivamente.

En la Fig. 8, se observa que la densidad normal en la madera tratada en aire caliente presentó diferencias estadísticas significativas respecto a la madera sin tratar. Sin embargo, la madera tratada en aceite caliente no presentó diferencias significativas con relación a la madera sin tratar.

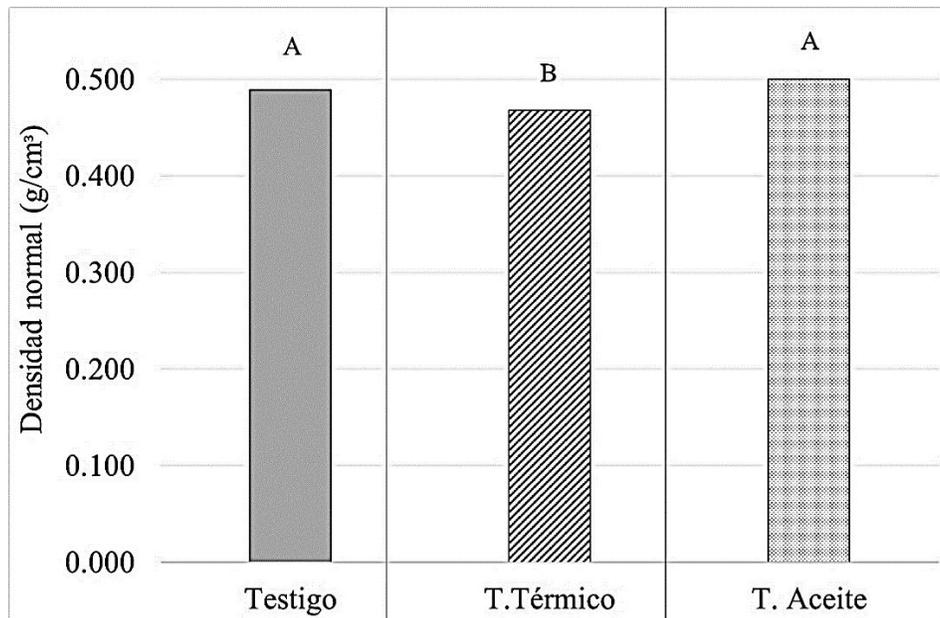


Figura 8. Efecto del termotratamiento en la densidad normal

Letras iguales significa que no hay diferencia estadística significativa a $\alpha=0.05$

El análisis estadístico se realizó por tipo de densidad

En la Fig. 9 se presenta los valores de la densidad básica de la madera sin tratar y las maderas tratadas térmicamente. La densidad básica de la madera sin tratar no presentó diferencia estadística significativa con la densidad básica de la madera tratada en aire caliente. Sin embargo, si presenta diferencia respecto a la densidad básica de la madera tratada en aceite, esto pudiera deberse principalmente a la absorción de aceite de la madera.

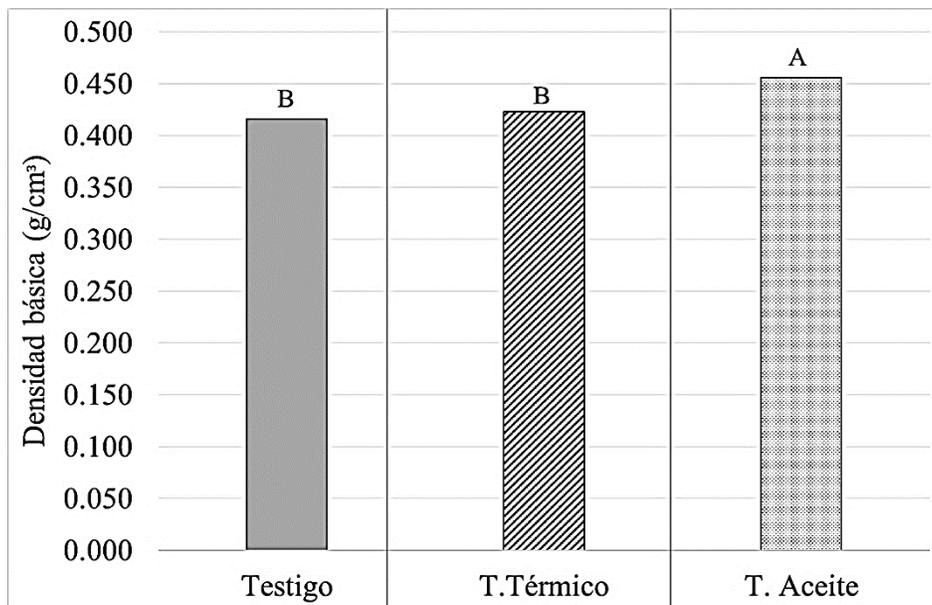


Figura 9. Efecto del termotratamiento en la densidad básica.

Letras iguales significa que no hay diferencia estadística significativa a $\alpha=0.05$
El análisis estadístico se realizó por tipo de densidad

En la Fig. 10 presenta los valores de la densidad anhidra de la madera sin tratar y las maderas tratadas térmicamente. La densidad anhidra en madera sin tratar fue de 0.45 g/cm^3 similar a lo reportado por (Equihua, 2016; Arévalo y Londoño, 2005; Moya y Leandro, 2010). La densidad anhidra de madera sin tratar no presentó diferencia estadística significativa con la densidad anhidra de madera tratada en aire caliente de 0.46 g/cm^3 . Sin embargo, si presenta diferencia respecto a la densidad anhidra de la madera tratada en aceite, esto pudiera deberse principalmente a la absorción de aceite de la madera.

La densidad anhidra de la madera tratada en aire caliente fue de 0.45 g/cm^3 , similar a lo reportado por Méndez (2016).

La densidad anhidra disminuye debido a que existe una degradación térmica y pérdida de masa como resultado del tratamiento térmico. En estudios con otras maderas, *Vitex gaumeri*, *Eucaliptus nitens*, *Juniperus virginiana*, *Acer trautvetteri*, *Pyrus elaeagnifolia*, se ha encontrado el mismo resultado, dónde la densidad disminuye con el termotratamiento (Rivera, 2015; Garibay, 2015; Kasemsiri y col. 2012; Korkut y Guller, 2008; Gunduz y col. 2009).

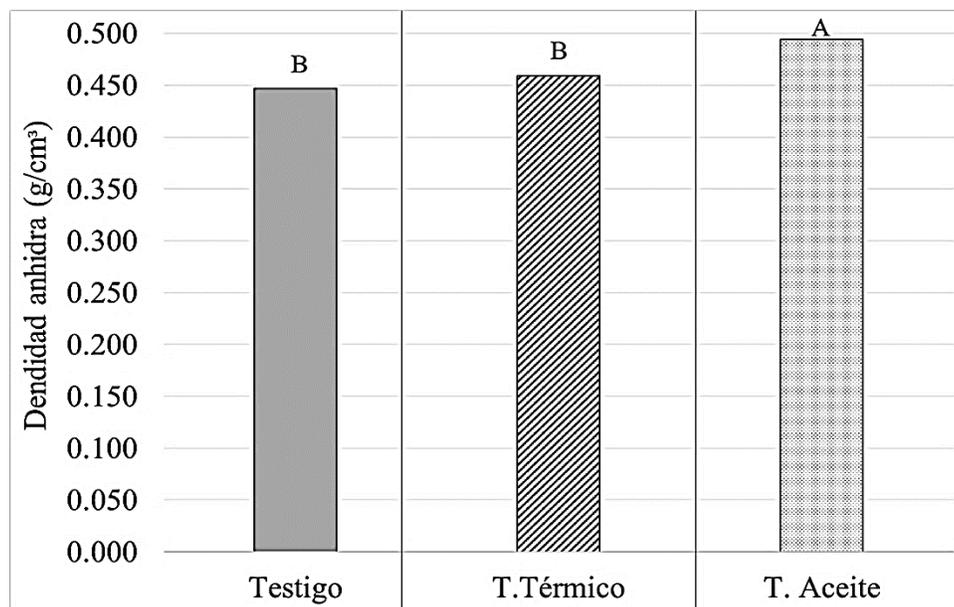


Figura 10. Efecto del termotratamiento en la densidad básica.
 Letras iguales significa que no hay diferencia estadística significativa a $\alpha = 0.05$
 El análisis estadístico se realizó por el tipo de densidad

7.2 Absorción de agua (%)

En la Fig. 11 se presentan los valores de absorción de agua a 2, 24 y 48 h en madera sin tratar y madera termotratada. La absorción de agua a 2 h si presentó diferencias estadísticamente significativas en la madera tratada en aire caliente y tratada en aceite caliente con respecto a la madera sin tratar. La absorción de agua a 24 y 48 h en la madera tratada en aire caliente si presentó diferencias estadísticas significativas de 51.6 y 72.0% en relación a la madera sin tratar de 27.1 y 38.6% de absorción de agua respectivamente. La madera tratada en aceite caliente no presentó diferencias estadísticamente significativas a 24 y 48 h.

Méndez (2016) menciona que la absorción de agua de madera tratada térmicamente en aire caliente en *Gmelina arborea*, presentó un comportamiento irregular, aumentando y

disminuyendo la absorción de agua a diferentes temperaturas, no quedando claro el efecto del termotratamiento sobre la absorción de agua. Dónde se puede observar lo variable que puede ser madera. En estudios realizados por Garibay (2015) con madera de *Eucaliptus nitens* termotratado en aire a temperaturas de 140 y 180°C presenta un aumento en la absorción de agua. Sin embargo, maneja una disminución de la absorción de agua cuando utiliza una temperatura a 220°C por un tiempo de 2.5 y 3.5 horas. Mientras que Kasemsiri y col. 2012, mostró que la absorción de agua de las muestras tratadas de *Juniperus virginiana* a temperaturas 120, 160 y 190°C durante 2 y 8 h, presentaban una disminución al aumentar la temperatura y duración del proceso de tratamiento térmico. Por otro lado, Bazyar (2012), menciona que la madera de *Populus tremuloides* tratada en aceite caliente mostró una disminución en absorción de agua.

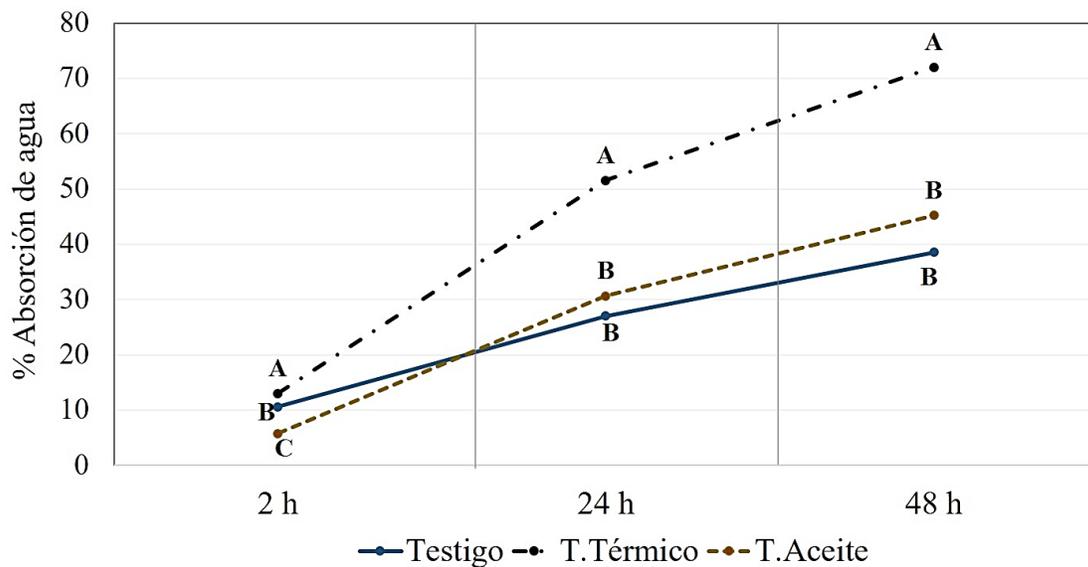


Figura 11. Absorción de agua en madera termotratada
 Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando $\alpha=0.05$
 El análisis estadístico se realizó por tiempo de inmersión

7.3 Hinchamiento

En la Fig. 12 se presentan los valores de hinchamiento radial de madera sin tratar y tratada térmicamente. El hinchamiento radial a 2 h no presentó diferencias en la madera si tratar tratada en aire caliente y tratada en aceite caliente con respecto a la madera sin tratar.

El hinchamiento radial de madera tratada en aire caliente fue de 2.79 y 2.72 % a 24 y 48 h de inmersión en agua mostrando que no hay diferencias estadísticamente significativas respecto a la madera sin tratar. La madera tratada en aceite caliente presentó un hinchamiento radial de 2.88 y 2.99% a 24 y 48 h en relación a la madera sin tratar de 2.48 y 2.54% respectivamente.

Equihua (2016), reportó valores de hinchamiento radial, tangencial, longitudinal y volumétrico de 2.3, 6.3 y 9.9% para la misma especie.

Algunos estudios con maderas tratadas de *Eucalyptus nitens*, *Vitex gaumeri* Greenm, *Fagus orientalis*, *Melia azedarch*, *Swietenia macrophylla*, *Quercus falcate* Michx, *Pinus taeda*, *Quercus rubra*, *Juniperus virginiana*, *Hevea brasiliensis*, *Pyrus elaeagnifolia* Pall, presentaron una reducción en el hinchamiento radial, tangencial y longitudinal en comparación con las muestras sin tratar (Garibay, 2015; Rivera, 2015; Bal, 2015; Priadi y Hiziroglu, 2013; Bakar y col. 2013; Gunduz y col. 2009; Kasemsiri y col. 2012).

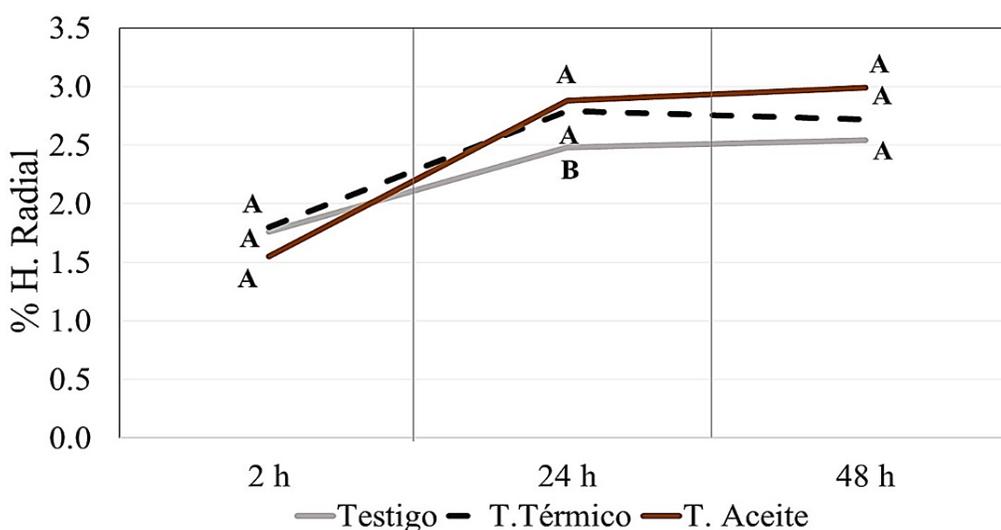


Figura 12. Hinchamiento radial en madera termotratada

Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando $\alpha=0.05$
El análisis estadístico se realizó por eje de la madera

La Fig. 13 se presentan los valores de hinchamiento tangencial en madera sin tratar y tratada térmicamente en aire caliente y tratada en aceite caliente. El hinchamiento tangencial a 2 h de inmersión en agua no presentó diferencias estadísticamente significativas en madera tratada en aire caliente y tratada en aceite caliente respecto a la madera sin tratar.

El hinchamiento tangencial en madera sin tratar presentó diferencia estadística significativa a 24 h de 4.89% en relación a la madera tratada en aire caliente de 5.97% y tratada en aceite caliente de 6.00%. Sin embargo, no presentó diferencias estadísticamente significativas en madera tratada en aire caliente y tratada en aceite caliente. La madera sin tratar a 48 h de inmersión en agua presentó un valor de hinchamiento tangencial de 5.48% y la madera tratada en aire caliente de 6.24% no presentando diferencias estadísticas significativa. Sin embargo, el hinchamiento tangencial en madera tratada en aceite caliente de 6.48% si presentó diferencia estadística significativa respecto a la madera sin tratar. La madera tratada en aire caliente y tratada en aceite caliente no presentan diferencias estadísticas significativas.

Algunos estudios con maderas de *Populus tremuloides* y *Fagus orientalis*, tratadas en aceite caliente de linaza reportaron una disminución en el hinchamiento radial, tangencial, volumétrico en relación a la madera sin tratar (Bazyar 2012, y Bal., 2015).

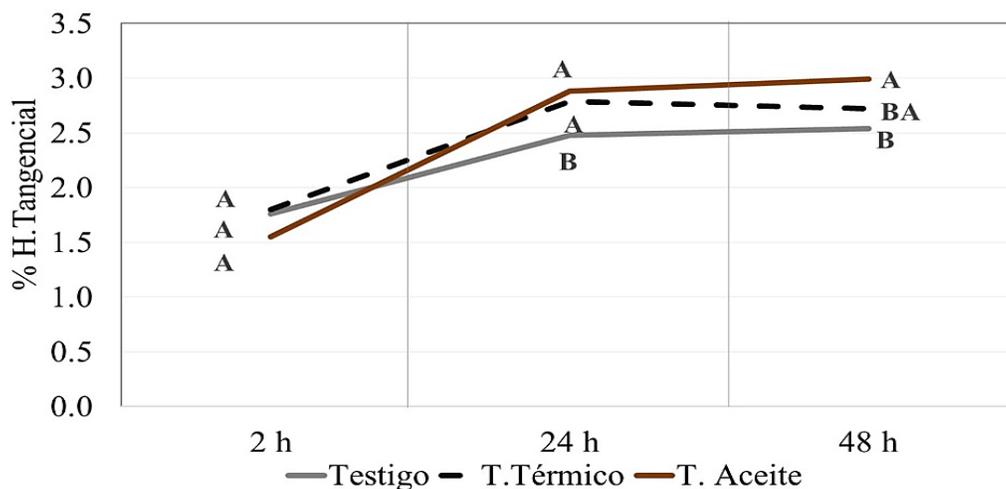


Figura 13. Hinchamiento tangencial en madera termotratada
 Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando $\alpha=0.05\%$
 El análisis estadístico se realizó por tipo de eje de la madera

El hinchamiento volumétrico que presentó la madera sin tratar fue de 4.09, 6.86 y 7.54%; la madera tratada en aire caliente de 4.48, 8.18 y 8.42%, la madera tratada en aceite caliente de 3.15, 7.47 y 8.12% para 2, 24 y 48 h de inmersión en agua respectivamente.

7.4 Contracción

En la Fig. 14 se presentan los valores de contracciones en madera sin tratar y maderas termotrataadas. La madera sin tratar presentó una contracción tangencial media y baja en la contracción radial, la contracción volumétrica también se considera baja de acuerdo a los criterios de clasificación Echenique y Plumptre (1994). Sin variación significativa en la contracción longitudinal. Valores muy similares fueron reportados por Equihua (2016), Moya y Leandro (2010), Benítez y Montesinos (1988).

La madera tratada en aire caliente no presentó diferencias estadísticamente significativas en la contracción radial en relación a la madera sin tratar. La contracción tangencial en la madera tratada en aire caliente presentó diferencias estadísticas significativas de 6.16% en relación a la madera sin tratar. La contracción longitudinal no presentó diferencia estadística significativa en madera tratada en aire caliente. La contracción volumétrica en madera tratada en aire caliente si presentó diferencias estadísticamente significativas de 8.60% en relación a la madera si tratar de 7.14 %. Méndez (2016) reportó valores en contracción radial de 1.62, 1.86, 2.20 y 2.33% y contracción tangencial de 1.89, 2.25, 2.40 y 2.36% para temperaturas de 185, 190, 195 y 200°C en *Gmelina arborea* tendiendo a aumentar conforme incrementa la temperatura. Sin embargo, otros estudios con diferentes maderas reportan que la contracción disminuye con la aplicación del termotratamiento (Garibay, 2015; Rivera, 2015; Kasemsiri y col. 2012).

La contracción radial en madera tratada en aceite caliente si presentó diferencias estadísticamente significativas de 3.03% en relación a la madera sin tratar. La contracción tangencial tratada en aceite si presentó diferencias estadísticamente significativas 6.23% en relación a la madera sin tratar. La contracción longitudinal no presentó diferencias estadísticamente significativas en madera tratada en aceite caliente. La contracción volumétrica de madera tratada en aceite caliente presentó diferencias estadísticamente significativas 9.04% en relación a la madera sin tratar.

La relación CT/CR se emplea para determinar el índice de distorsiones y alabeos en la madera. La madera sin tratar presentó diferencias estadísticas significativas en la CT/CR de 2.34% respecto a la madera tratada en aire caliente de 2.31% y tratada en aceite caliente de 2.12%, clasificándose como altos de acuerdo a los criterios de Echenique y Plumtre (1994). Valores similares fueron reportados por (Equihua, 2016; Benítez y Montesinos, 1988). Por lo que esta madera es muy susceptible a presentar distorsiones y alabeos durante el proceso de secado.

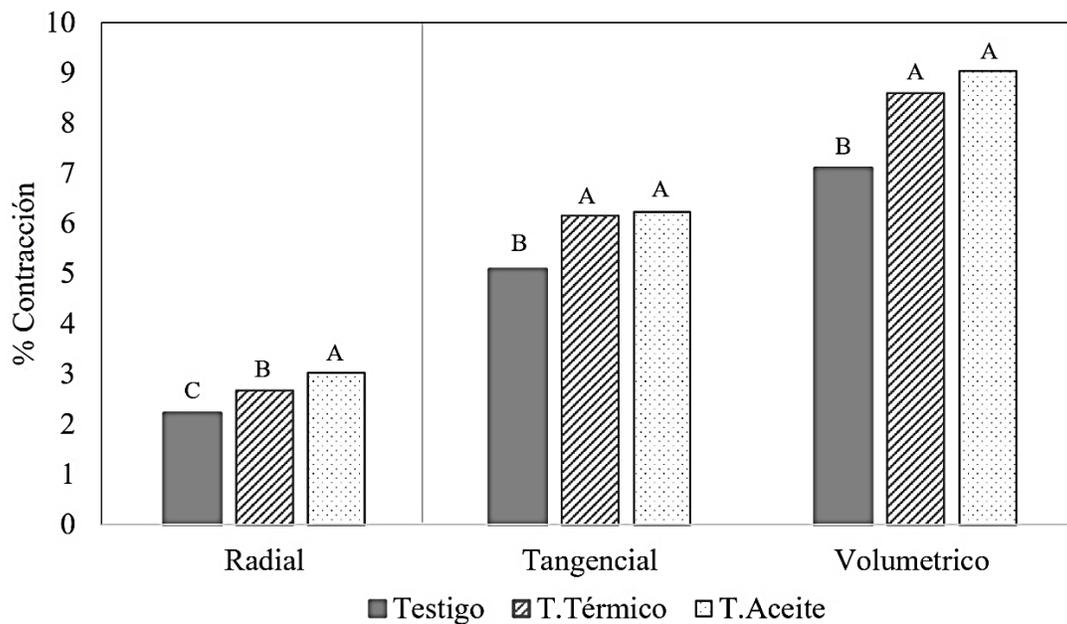


Figura 14. Contracción radial en madera termotratada

Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando $\alpha=0.05$
El análisis estadístico se realizó por tipo de eje en la madera

7.5 Compresión paralela a la fibra

La Fig.15 muestra los valores de módulo de ruptura (MOR) para los diferentes tratamientos. La madera sin tratar presentó un MOR de 37.1 Mpa que se clasifica como bajo de acuerdo a los criterios de Echenique y Plumtre (1994). El MOR de la madera tratada en aire caliente y en aceite caliente mostraron un incremento de 28.2 y 22.1%, lo que origina que ahora el MOR sea clasificado como medio.

En general, los resultados de este estudio son similares con estudios relacionados con el efecto del tratamiento térmico en diversas propiedades con diferentes especies. Rivera (2015)

reportó que la compresión en madera de *Vitex gaumeri* tratadas térmicamente a 160 y 200°C por un tiempo de 2.5 horas, presentaron un incremento de 16 y 24% respectivamente. Garibay (2015) observó que la resistencia a la compresión (MOR) en madera de *Eucalyptus nitens* presentó un aumento del 17% cuando se utilizó una temperatura de 140°C, sin embargo, disminuye un 21% a 220°C por 3.5 horas para dicha especie. Boonstra y col. (2007) reportó un aumento de 28 % en la resistencia a la compresión paralela de madera de *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, y *Picea abies* tratadas térmicamente. Colonego y col. (2011) reportan que la resistencia a la compresión incrementa un 5.6% en madera de *Eucalyptus grandis* con la aplicación de termotratamiento.

Por otro lado, otras investigaciones han encontrado una disminución en la resistencia a la compresión cuando es aplicado algún termotratamiento. Yildiz y col. (2006) examinaron los efectos del tratamiento térmico sobre la resistencia a la compresión de la madera de *Picea orientalis* tratada a cuatro temperaturas 130, 150, 180 y 200°C, por un tiempo de 2, 6 y 10 h. Obteniendo que los valores de resistencia a la compresión se redujeron al aumentar la duración y la temperatura de la exposición, debidos a la degradación térmica y las pérdidas de sustancia después de los tratamientos térmicos

Konkut (2007), reportó que la madera de *Abies bornmuellerinana* tratada térmicamente a 120, 150 y 180°C durante 2, 6 y 10 h, presentó una disminución en la resistencia a la compresión de 6.8, 5.7 y 6.5 % a 120°C, 7.1, 8.1 y 8.7 para 150°C y 9.0, 9.2 y 28% a 180°C. Korkut y col. (2008) mostraron que la madera de *Pinus sylvestris* tratada presentó pérdidas máximas de contracción del 25.4% a 180°C. Gunduz y col. (2009), encontraron una reducción de la resistencia a la compresión en madera de *Pyrus elaeagnifolia* de 7.42, 12.38 y 13.71% a 160°C y 11.16, 16.49 y 18.73% a 180°C, durante 2, 4 y 6 h. Korkut y Hiziroglu (2009), reportan que madera termotratada de Hazelnut (*Corylus colurna*) a 120, 150 y 180°C por tiempo de 2 h, presentó una disminución en la resistencia a la compresión de 0.38, 11.45 y 20.2%, respectivamente. Sin embargo, el valor de resistencia a la compresión más bajo fue de 25.55% a 180°C por un tiempo de 10 h.

En cuanto al tratamiento en aceite caliente en el presente estudio se obtuvo un incremento del 22.1% en la resistencia a la compresión de la madera de *Gmelina arborea*. Bak y Nemeth

(2012) reportaron que la madera de *Robinia pseudoacacia* tratada en aceites de girasol, linaza y colza a 160 y 200°C durante 2, 4 y 6 h aumentó la resistencia a la compresión en un 5-15%, mientras que el tratamiento a 200°C causó una pérdida del 5-10%, dependiendo del aceite utilizado. En cuanto a la madera de *Populus euramericana* mostraron que la resistencia a la compresión se incrementó de un 15-25% por efecto del tratamiento en aceite.

En la Fig. 15 se muestra que la madera sin tratar expuesta a 3 meses al hongo *Trametes versicolor* tuvo un incremento del 12% y una disminución a los 6 meses de exposición de 9.4%, mientras que la madera expuesta al hongo *Gloeophyllum trabeum* no presentó diferencia significativa en resistencia a la compresión paralela en los dos periodos de evaluación (Fig. 16). Bari y col. (2016) evaluaron los comportamientos destructivos de dos hongos de podredumbre blanca, *Pleurotus ostreatus* y *Trametes versicolor*, y compararon sus capacidades de degradación en madera *Fagus orientalis*, mostrando que *Pleurotus ostreatus* tuvo un efecto de reducción en la resistencia a la compresión paralela al grano del 45% en comparación con *Trametes versicolor* del 56% a los 120 días de exposición.

La madera tratada en aire caliente expuestas a 3 y 6 meses a *Trametes versicolor* mostro una disminución en la resistencia a la compresión de 3 y 20.4 %. La madera expuesta al hongo *Gloeophyllum trabeum* a 3 y 6 meses presentó una disminución de 8 y 21%. La madera tratada en aceite expuestas a *Trametes versicolor* presentó una disminución de 12 y 9.9% y para *Gloeophyllum trabeum* mostro una disminución del 7 y 17% para 3 y 6 meses.

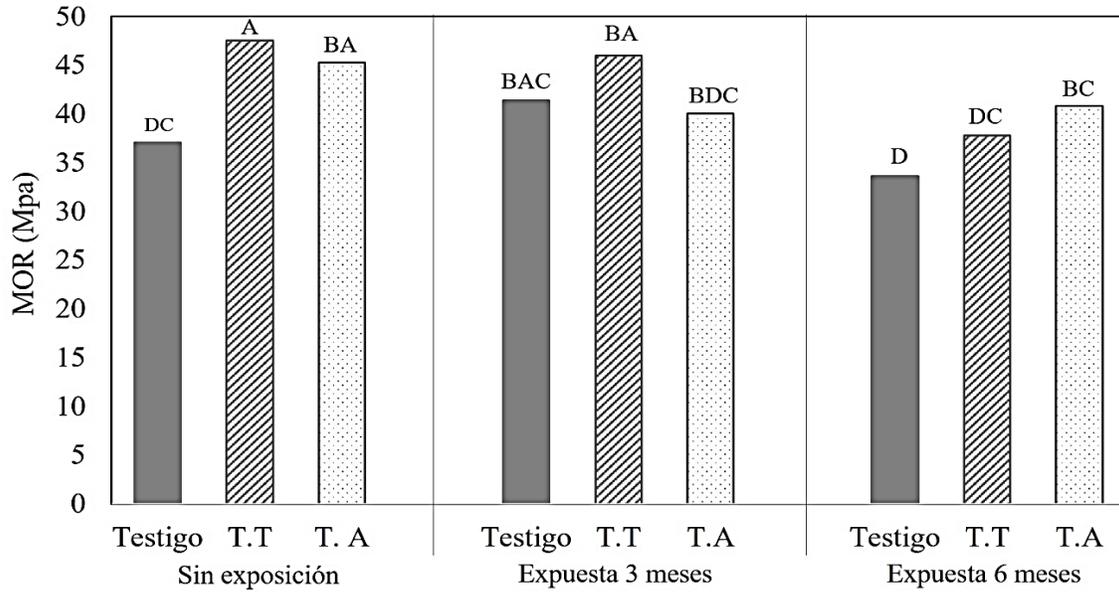


Figura 15. Módulo de ruptura en diferentes tratamientos expuestos a *Trametes versicolor*.

Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente cuando $\alpha=0.05$

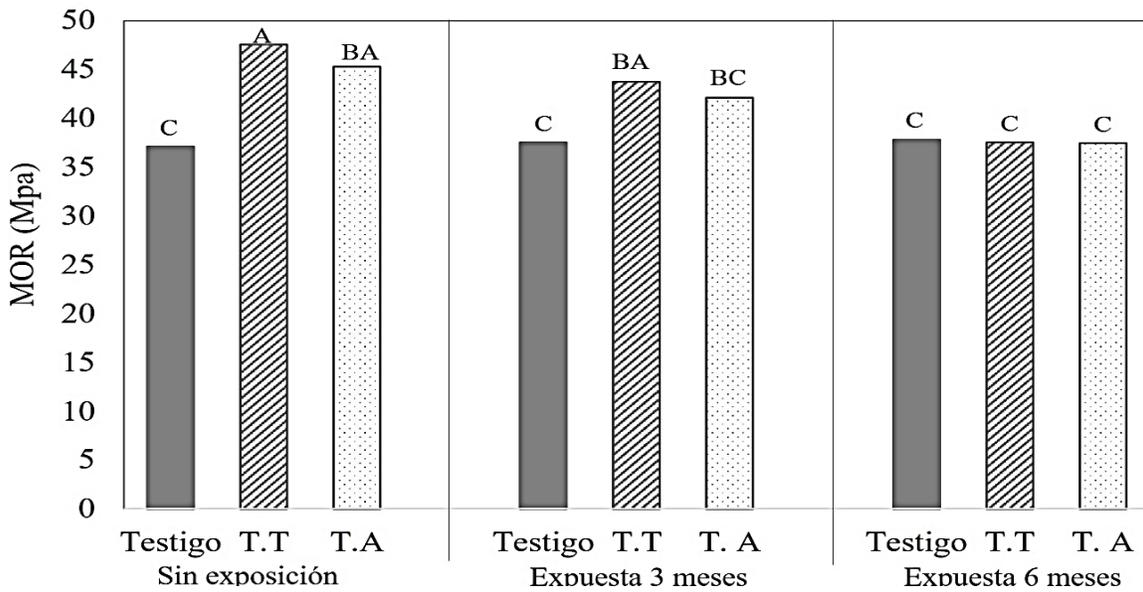


Figura 15. Módulo de ruptura en diferentes tratamientos expuestos *Gloeophyllum trabeum*.

Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente cuando $\alpha=0.05$

En la Fig.17 se muestran los valores de módulo de elasticidad (MOE) para los diferentes tratamientos. La madera sin tratar presentó un MOE de 4894 Mpa, y la tratada térmicamente

en aire de 6432 Mpa incrementando un 31.4% y la tratada en aceite de 4723 Mpa disminuyendo un 3.4% en relación a la madera sin tratar.

La madera sin tratar expuesta al hongo *Trametes versicolor* presentó una disminución en el MOE de 19 y 49%, las muestras expuestas al hongo *Gloeophyllum trabeum* presentaron una disminución de 19 y 31% a 3 y 6 meses respectivamente.

El MOE disminuyó un 12 y 17%, en madera tratada térmicamente en aire caliente expuesta a *Trametes versicolor*. En la Fig.18 muestran los valores de madera tratadas expuestas a *Gloeophyllum trabeum* el MOE disminuyó un 15 y 40 % a 3 y 6 meses. La madera tratada en aceite caliente disminuyó un 7 y 20 % el MOE a 3 y 6 meses de exposición a *Trametes versicolor*. Mientras que las muestras con *Gloeophyllum trabeum* presentaron una disminución de un 8 y 19% a 3 y 6 meses de exposición.

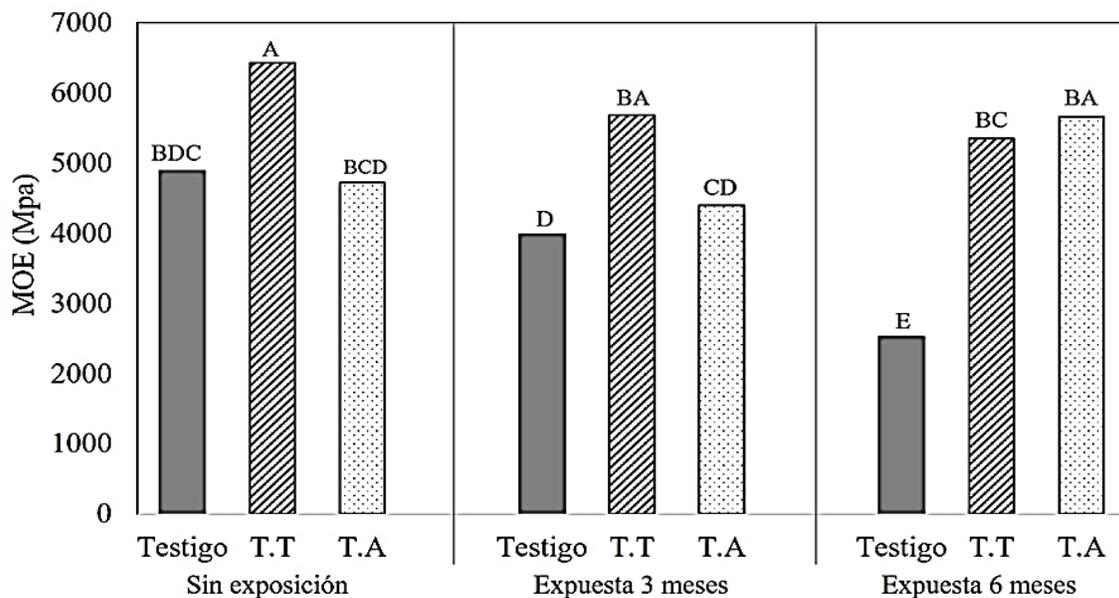


Figura 17. Módulos de elasticidad en diferentes tratamientos expuestos a *Trametes versicolor*.

Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando $\alpha=0.05$

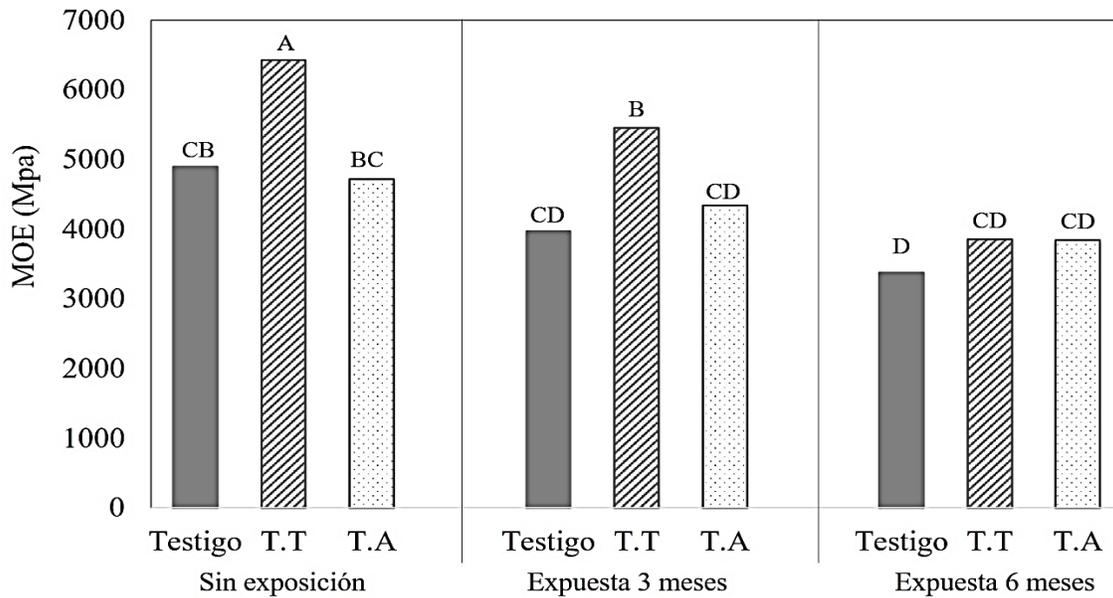


Figura 16. Módulos de elasticidad en diferentes tratamientos expuestos a *Gloeophyllum trabeum*.

Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando $\alpha=0.05$

En la Fig. 19 y 20 se presentan los esfuerzos al límite de proporcionalidad (ELP) en los diferentes tratamientos. La madera sin tratar presentó un ELP de 28 Mpa y la madera tratada en aire y en aceite caliente presentaron un incremento de 39.3 y 23.1%. Mientras que la madera sin tratar expuesta 3 meses a *Trametes versicolor* mostró incremento de un 9.2%, y una disminución de 19% a 6 meses. Las muestras expuestas 3 meses a *Gloeophyllum trabeum* mostraron un incremento de 7.4% y una disminución de 5.5% a los 6 meses de exposición al hongo. La madera tratada en aire caliente expuestas a *Trametes versicolor* mostró que el ELP disminuyó un 5.9 y 29.8%, mientras que con el hongo *Gloeophyllum trabeum* disminuyó un 7.4 y 56.6%.

El ELP en madera tratada en aceite caliente expuesta a *Trametes versicolor* disminuyó un 6.4 y 8.7%, mientras que las muestras expuestas a *Gloeophyllum trabeum* un 6.0 y 23.8%.

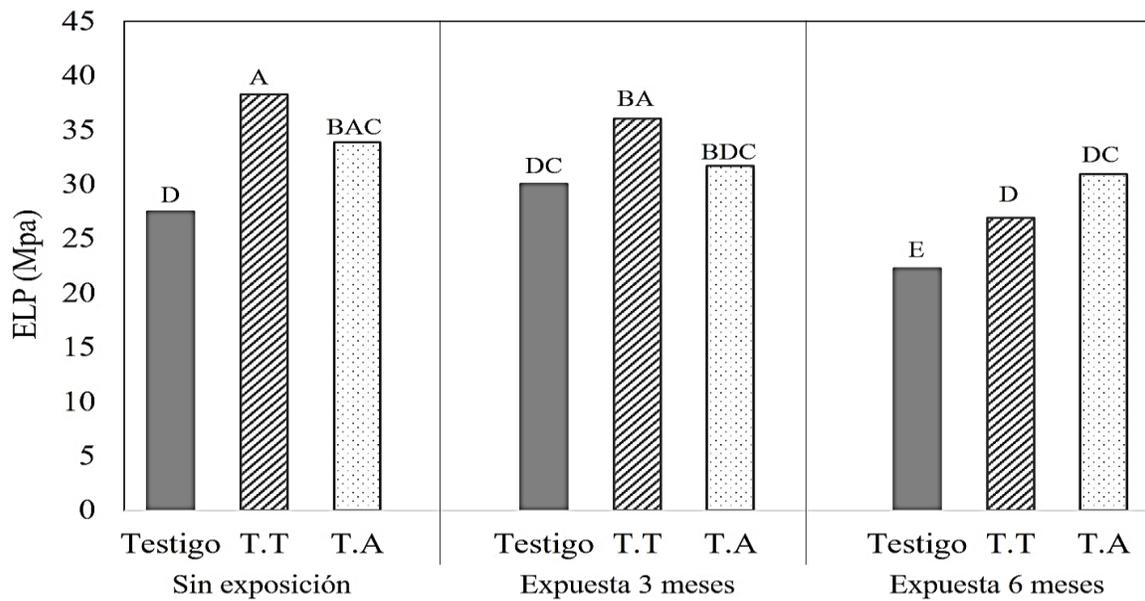


Figura 17. Esfuerzos al límite de proporcionalidad en diferentes tratamientos expuestas a *Trametes versicolor*.

Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa $\alpha=0.05$

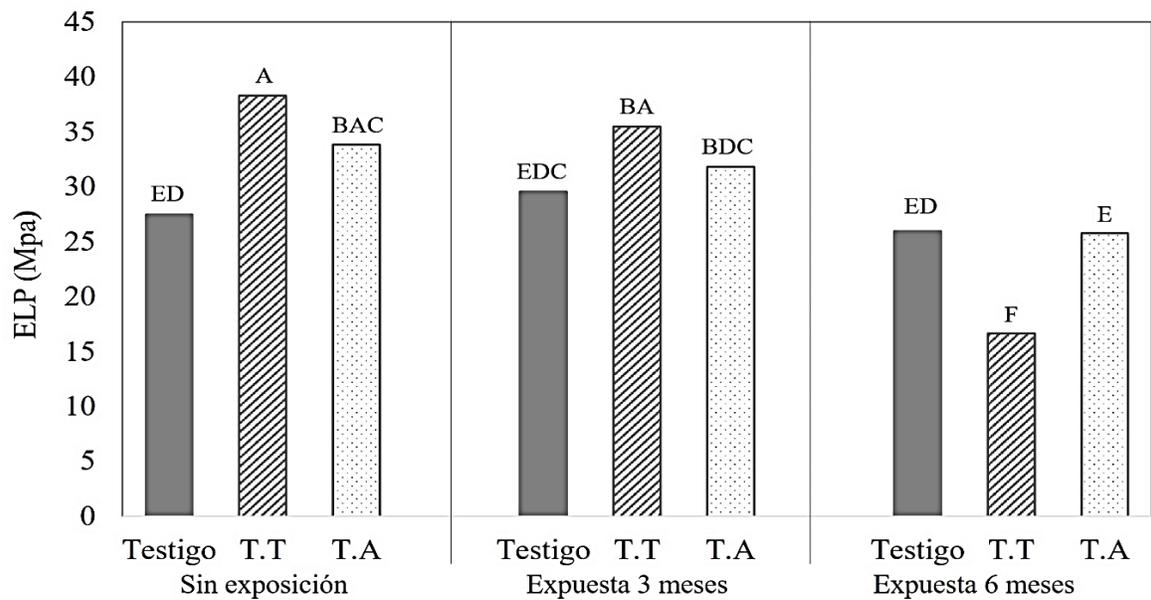


Figura 18. Esfuerzos al límite de proporcionalidad en diferentes tratamientos expuestos a *Gloeophyllum trabeum*.

Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa $\alpha=0.05$

7.6 Crecimiento de los hongos de pudrición

En la Fig. 21 se presentan las probetas sin tratar, tratadas en aire caliente y en aceite caliente expuestas a 3 meses al hongo *Trametes versicolor*. Se puede observar que las probetas tratadas en aceite caliente mostraron un mayor crecimiento de micelios pudiera ser a que se empleó un aceite vegetal el cual favoreció al crecimiento del hongo.



Figura 19. Crecimiento del micelio a 3 meses de exposición a *Trametes versicolor*;
a) probetas sin tratar, b) probetas tratadas en aire caliente, c) probetas tratadas en aceite caliente

En la Fig. 22 se muestra el crecimiento del micelio en probetas expuestas a 3 meses a *Gloeophyllum trabeum*. Dónde se puede observar un mayor desarrollo del hongo en las probetas tratadas térmicamente en aire caliente y tratadas en aceite caliente pudiera ser a que la madera expuesta a 180°C no es afectada para esta madera.



Figura 20. Desarrollo del hongo *Gloeophyllum trabeum* a 3 meses de exposición en la
madera;
a) madera sin tratar; b) madera tratada en aire caliente; c) madera tratada en aceite caliente

7.7 Pérdida de peso

Las pérdidas de peso para la madera control expuesta a *Trametes versicolor* durante 3 y 6 meses fueron de 7.91 y 7.08% respectivamente.

Méndez (2016) reportó una pérdida de masa superior para la madera sin tratar de *Gmelina arborea* del 17.76% para *Trametes versicolor*. Bari y col. (2016) reportan pérdida de masa en madera de *Fagus orientalis* expuesta a 120 días al hongo de *Trametes versicolor* de 26.4%. Polanco y col. (2013), reportaron que la madera de *Caryodaphnopsis cogolloi* expuesta a cuatro meses al hongo de pudrición *Trametes versicolor* y *Gloeophyllum trabeum* mostraron pérdidas de peso 5.9% para los dos hongos.

La madera tratada térmicamente en aire presentó una pérdida de masa de 8.96 y 26.27 % para el hongo *Trametes versicolor* a 3 y 6 meses respectivamente. Méndez (2016) reportó valores de pérdida de masa de 11.95, 6.65, 22.44 y 7.82% en madera termotratada de *Gmelina arborea* a 185, 190, 195 y 200°C, respectivamente cuando fueron expuestas a *Trametes versicolor*.

La madera tratada en aceite caliente expuesta a *Trametes versicolor* presentó una pérdida de masa promedio de 17.09 y 7.91 % como se muestra en la Fig.21. Rapp y Sailer (2001) mostraron una reducción adicional de pérdida de peso por decaimiento fúngico de 2.0% y 0.0% en muestras de *Pinus sylvestris*, y *Picea abies* tratadas con aceite caliente. En otros estudios Bazyar (2012), investigo la resistencia a la desintegración de la madera de *Populus tremula* tratada en aceite de linaza contra hongos de pudrición blanca (*Coriolus versicolor*) y hongos de pudrición marrón (*Coniphora puteana*), los resultados mostraron una mejoría en la pérdida de masa de un 71 y 77% contra dichos hongos en relación a las muestras control respectivamente. Salier y col. (2000) mencionaron que el tratamiento térmico con aceite a temperaturas de 190 y 220°C mejoro la resistencia de la madera a la pudrición parda (*Coniphora puteana*) disminuyendo la pérdida de masa un 48 y 40% a aproximadamente un 11 y 5.5% en madera de pino y abeto.

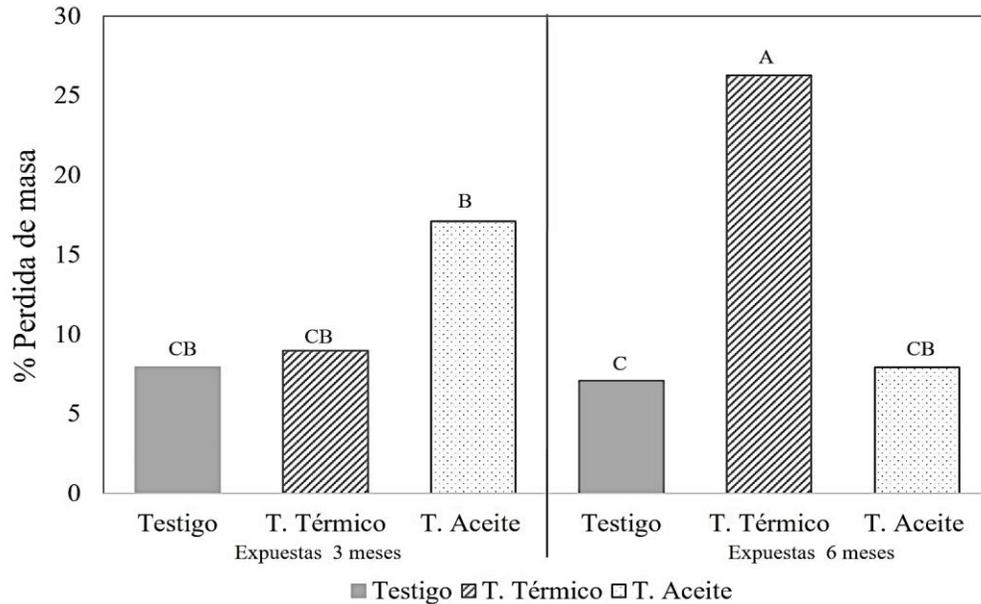


Figura 21. Pérdida de masa expuesta a *Trametes versicolor*.
 Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa $\alpha=0.05$

Como se muestra en la Fig. 24 la madera sin tratar expuesta a *Gloeophyllum trabeum*, mostró un porcentaje de pérdida de masa de 7.28 y 7.65 % sin variación significativa a los 3 y 6 meses. Polanco y col. (2013), reportaron que la madera de *Caryodaphnopsis cogolloi* expuesta *Gloeophyllum trabeum*, presentó valores de 4.8 y 7.6%. Cárdenas y Polanco (2004), determinaron la durabilidad de la madera de *Trichospermum colombianum* (algodoncillo) expuesta al hongo *Pycnoporus sanguineus*, *Gloeophyllum trabeum* y *Trametes versicolor*, mostrando que *Trichospermum colombianum* es resistente al hongo *Gloeophyllum trabeum* (14.92%) y moderadamente resistente a los hongos *Pycnoporus sanguineus* (42.83%) y *Trametes versicolor* (33.33%).

La madera de *Trichospermum colombianum* es resistente al hongo *Gloeophyllum trabeum* (14.92%) y moderadamente resistente a los hongos *Pycnoporus sanguineus* (42.83%) y *Trametes versicolor* (33.33%). De acuerdo con el promedio resultante de los tres hongos se clasifica a *Trichospermum colombianum* moderadamente resistente (30.36%).

La madera tratada térmicamente presentó una pérdida de masa de 33.14% a los 3 meses de exposición al hongo, mientras que a los 6 meses presentó una disminución de 16.72%.

En la Fig. 24 se muestran la madera tratada en aceite caliente expuesta a 3 y 6 meses al hongo *Gloeophyllum trabeum* presentó un promedio de pérdida de masa de 16.48 y 19.12%

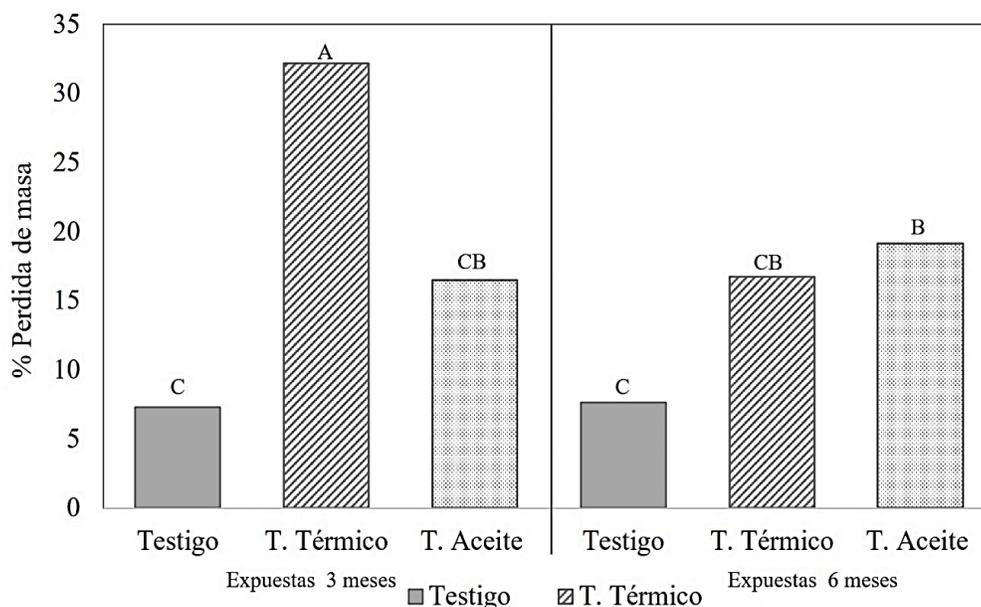


Figura 22. Pérdida de masa expuesta a *Gloeophyllum trabeum*.
Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa $\alpha=0.05$

7.8 Porcentaje de compuestos extraíbles de la madera de *Gmelina arborea*

La harina de albura y duramen sin tratamiento presentó un contenido de humedad de 6.17 y 6.03%, respectivamente. Mientras que la harina de albura y duramen tratada en aire caliente presentó un contenido de humedad de 3.86 y 3.62%, respectivamente.

En la Fig. 25 y 26 se muestran los porcentajes de extractos de albura y duramen sin tratar y tratadas térmicamente. El porcentaje de extractos totales en albura y duramen sin tratar fue de 10.66 y 9.11 %, en otros estudios reportaron un contenido de extractos totales de 7.9-10% en madera de *Gmelina arborea* (Blanco y Carpio, 2005; Moya y Leandro, 2010; y Paz, 2008). Mientras que la madera de albura y duramen tratada térmicamente presentó 7.19 y 9.42%.

Con el hexano, se puede solubilizar la parte lipofílica de las sustancias extraíbles de la madera, que comprenden grasas, ceras y aceites (Kurth y Tokos, 1953; Fengel y Wegener, 1984) y dependiendo de la especie de madera, también se pueden encontrar ácidos grasos, ácidos resínicos, alcoholes y esteroides (Fengel y Wegener, 1984; Hafizoğlu y Holmbom,

1995). Los extractos solubles con hexano que corresponden a las sustancias lipofílicas no se vieron afectados en la albura como en el duramen tratado térmicamente. La extracción con acetato de etilo también puede extraer compuestos lipofílicos (Hillis, 1968), con el disolvente acetato de etilo se obtuvieron rendimientos más altos en comparación al hexano en albura y duramen. Sin embargo, el duramen presentó mayor porcentaje de sustancias lipofílicas que la albura tanto con el hexano como con el acetato de etilo.

Con la acetona, suelen extraerse la mayor parte de las sustancias extraíbles de la madera, sobre todos materiales colorantes y sustancias polifenólicas (NTRI, 1979; Fengel y Wegener, 1984; Lewin y Goldstein, 1991). La extracción con la disolvente acetona obtuvo mejor rendimiento en la madera de albura sin tratar que el duramen sin tratar.

Con el agua se pueden extraer taninos, carbohidratos, sales inorgánicas, almidones y algunos colorantes (Fengel y Wagener, 1984). El mayor rendimiento de extractos solubles en agua fue en la madera de albura sin tratar. En los resultados obtenidos se puede mostrar que la mayor proporción de sustancias extraíbles presentes en la madera de *Gmelina arborea* corresponden a compuestos solubles en acetona y agua, principalmente en la albura. Los extractos mostraron una disminución con todos los disolventes empleados tanto para albura y duramen tratados térmicamente. Moya y col. (2017) reportaron valores obtenidos de extractos en agua caliente (HW) de 7.81% y agua fría (CW) de 9.04%, en hidróxido de sodio (NaOH) de 26.13%, en una solución de etanol-tolueno de 0.82% y en diclorometano ($\text{CH}_2\text{-Cl}_2$) de 14.17 % para madera de *Gmelina arborea*.

Esteves y col. (2013) reportaron que la albura y duramen de *Pinus pinaster* tratados térmicamente presentaron una disminución inicial de los extractivos con diclorometano, es seguida por un aumento, mientras que los extractos de agua disminuyen. Los extractivos de etanol sin embargo aumentan a lo largo del tratamiento.

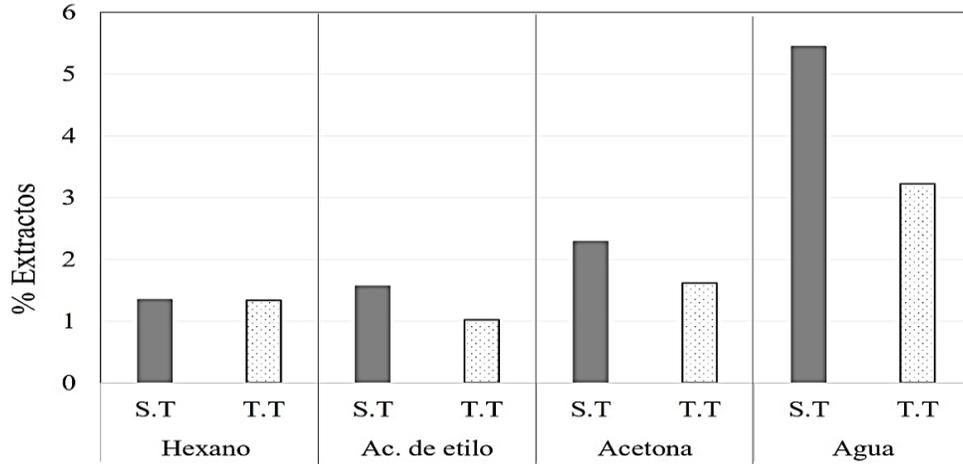


Figura 23. Porcentajes de extractos de albura de *Gmelina arborea*

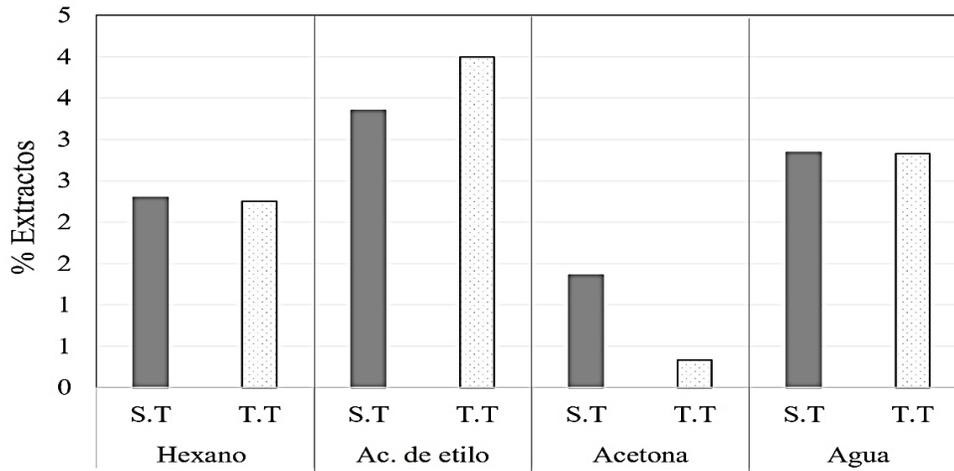


Figura 24. Porcentajes de extractos de duramen de *Gmelina arborea*

7.9 Análisis de FT-IR.

En este estudio, se encontró que el efecto del tratamiento térmico sobre las propiedades químicas de la madera era diferente para albura y duramen. Los espectros FTIR de las muestras de madera no tratadas y tratadas térmicamente exhibían bandas de absorción típicas de componentes de madera.

En la Fig. 27 se muestran las asignaciones de bandas de absorción en la región entre 4000 y 800 cm^{-1} para madera de albura y duramen se calcularon utilizando el área bajo la curva. La

banda de absorción a 3349.75 cm^{-1} correspondiente al estiramiento en los grupos hidroxilos mostro una mayor afectación en madera de duramen. En las bandas de $1735.52\text{-}1736.20\text{ cm}^{-1}$ corresponden al estiramiento $\text{C}=\text{O}$ en el grupo carboxilo (Colom y col. 2003; Hakkou y col. 2005). Este grupo carboxilo para la madera de albura tratada térmicamente aumento lo cual puede estar relacionado con la formación de subproductos de degradación, como los ácidos carboxílicos, durante el tratamiento (Colom y col. 2003.). Sin embargo, disminuyo para el duramen tratado térmicamente. En la banda a 1504.56 cm^{-1} que es característica para el estiramiento C-C de las vibraciones en esqueletos aromáticos (Mburu y col. 2008; Gérardin y col. 2007; Tjeerdsma y Militz, 2005; Hakkou y col. 2005), incrementaron en madera de albura termotratada. Mientras que en la madera de duramen tratada térmicamente disminuyó este estiramiento C-C. Akgül y col. 2007 y Kotilaninen y col. 2000, atribuyen este comportamiento en *Pinus sylvestris* y en *Abies nordmaninana* a la condensación de la lignina y la división de las cadenas laterales alifáticas en lignina durante el calentamiento. Se ha informado que las bandas crecientes a 1369.25 cm^{-1} correspondientes a la deformación C-H en celulosa y hemicelulosas para muestras de albura y duramen tratadas térmicamente (Gérardin y col. 2007). Las temperaturas por encima de 175°C causan la condensación de lignina, que conduce a diversos cambios en estos picos dependiendo de las especies de madera (Akgül y col. 2007; Fengel y Wegener, 1984). Las bandas características en $1322.30\text{-}1320.58\text{ cm}^{-1}$ demuestra la presencia de anillos de siringilo, anillos de guaiacilo y grupos fenol, después del tratamiento térmico, estas bandas disminuyeron tanto para la madera de albura como para la madera de duramen. Se ha informado que el pico creciente a $1231.81\text{-}1232.39\text{ cm}^{-1}$ en madera de albura y duramen que es característica de la respiración del anillo de siringilo y estiramiento C-O en la lignina y xileno. Las bandas correspondientes al estiramiento C-O en la celulosa y hemicelulosas a $1032.30\text{-}1031.74\text{ cm}^{-1}$ en albura y duramen tratadas térmicamente mostraron una disminución. En la banda 898.67 cm^{-1} correspondiente a la deformación C-H en la celulosa no presentó cambios en madera de albura y duramen sin tratar y con tratamiento.

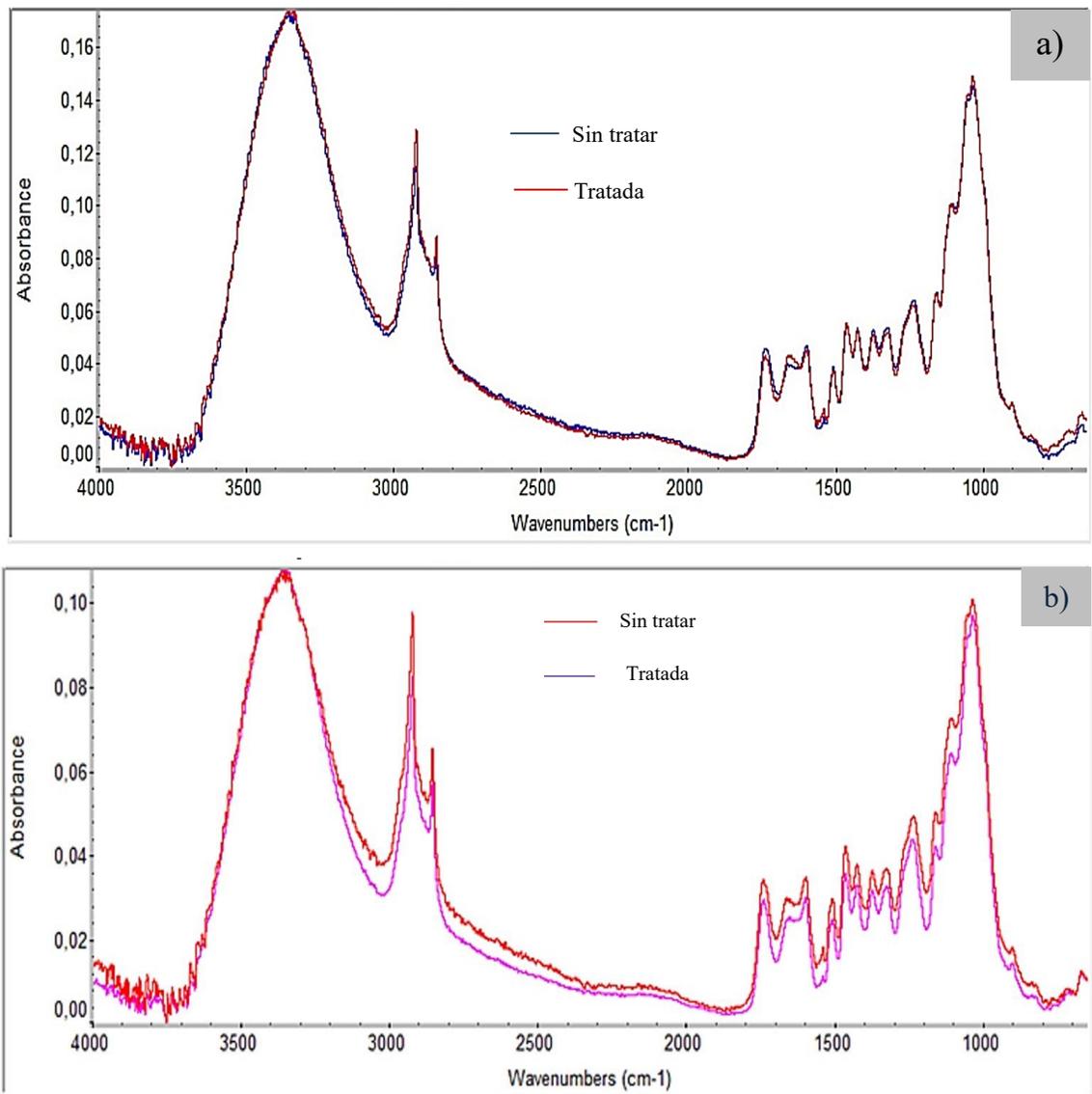


Figura 27. Espectros FTIR de madera de *Gmelina arborea* tratada térmicamente; a) albura ; b) duramen

8. CONCLUSIONES

Propiedades físicas:

- La densidad normal disminuye con el tratamiento térmicos en aire caliente y aumenta con el tratamiento en aceite caliente.
- Los tratamientos térmicos aumentan la absorción de agua en la madera.
- El hinchamiento y la contracción aumentaron con los tratamientos térmicos.

Propiedades mecánicas:

- El tratamiento térmico en aire caliente y en aceite caliente incrementaron el MOR en la resistencia a la compresión longitudinal
- La madera sin tratar no presentó degradación por los hongos de pudrición.
- La madera tratada en aire caliente presentó una disminución en el MOR hasta los 6 meses con los hongos.
- La madera sin tratar no presentó disminución en el MOE la resistencia a la compresión por los hongos. Mientras que a los 6 meses si se vio afecto el MOE.
- La madera de tratada térmicamente en aire caliente expuestas a los hongos no presentó reducciones en el MOE. Mientras que con el hongo *Gloeophyllum trabeum* si presentó una disminución en el MOE.
- El MOE en madera tratada en aceite caliente si presentó una reducción con el hongo *Trametes versicolor*. Mientras que con el hongo *Gloeophyllum trabeum* no se vio afectado el MOE.
- El ELP en madera sin tratar presentó una reducción hasta los 6 de exposición con el hongo. Mientras que el hongo *Gloeophyllum trabeum* no afecto al EIP.
- En el ELP en madera tratada en aire caliente presentó una disminución hasta los 6 meses de exposición con los hongos.
- El ELP en madera tratada en aceite caliente expuesta al hongo *Trametes versicolor* no se vio afectado. Mientras que con el hongo *Gloeophyllum trabeum* presentó una disminución hasta los 6 meses.

Porcentaje de pérdida de masa:

- La pérdida de masa en la madera sin tratar no presentó degradación por el hongo *Trametes versicolor*, mientras que con el hongo *Gloeophyllum trabeum* presentó una pérdida de masa hasta 6 meses.
- La madera tratada en aire caliente presentó una pérdida de masa hasta los 6 meses de exposición al hongo *Trametes versicolor*. Mientras que para el hongo *Gloeophyllum trabeum* a 3 meses presentó una pérdida de masa de 33.14%.
- La madera tratada en aceite caliente se vio afectada con el hongo *Trametes versicolor* los 3 meses de exposición. La pérdida de masa no se vio afectada con el hongo *Gloeophyllum trabeum*.

Porcentaje de extractos:

- El contenido total de extractos de la madera de albura y duramen sin tratar disminuyó con la aplicación del tratamiento térmico en aire caliente.
- El duramen presentó mayor porcentaje de sustancias lipofílicas que la albura tanto con el hexano como con el acetato de etilo.
- Las sustancias extraíbles con mayores porcentajes presentes en la madera de *Gmelina arborea* corresponden a compuestos solubles en acetona y agua, principalmente en la albura.

Análisis de espectroscopia FTIR:

- La espectroscopia FTIR en madera de duramen de *Gmelina arborea* tratada térmicamente mostraron que los componentes que presentaron mayores cambios se dieron en las bandas de absorción características de la lignina presentaron una disminución.
- Las bandas de absorción características de la hemicelulosa y celulosa presentaron una disminución en la madera de albura tratada térmicamente. Esto dio como resultado un aumento en la intensidad de las bandas de lignina características.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Arévalo, R.L., y Londoño, A. (2005). Manual para la Identificación de Maderas que se Comercializan en el Departamento de Tolima (CORTOLIMA). Ibagué.
- ASTM D143-94. (2000). Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber. American Society for Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards. Section 4, Construction. Volume 04.09 Wood. Philadelphia, U. S. A.
- ASTM D2017-81 (1981). Standard Method of Accelerated Laboratory Test of Natural Decay Resistance of Woods. Annual Book of ASTM Standards. Section 18.
- Akul, M., Gumuskaya, E., y Korkut, S. (2007). Crystalline structure of heat-treated scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Uludag fir (*Abies nordmanniana* (Stev) subsp. *bornmuelleriana* (Mattf.). *Wood Sci. Technol*, 41, 281-289.
- 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.
- Bakar, B.F. A, Hiziroglu., y S, Tahir, P.M. (2012). Properties of some thermally modified wood species. *Materials and Design*, 43, 348-355.
- Barrera, H. (2010). Evaluación dasométrica de una plantación de *Gmelina arborea* Roxb. (verbenaceae) en el municipio de Música Michoacán. (Trabajo de grado). Facultad de Agro biología. Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Bari E., Nazarnezhad, N., Kazemi., S.M., Ghanbary, T.AM., Mohebbi, B., Schmidt, O., y Clausen, A.C. (2015). Comparison between degradation capabilities of the white rot fungi *Pleurotus ostreatus* and *Trametes versicolor* in beech wood. *International Biodeterioration y Biodegradation*, 104, 231-237.
- Bazyar, B., (2012). Decay resistance and physical properties of oil heat treated aspen wood. *Bio-Resources*, 7(1), 696-705.

- Benítez, R.F., y Montesinos, J.L. (1988). Catálogo de cien especies forestales de Honduras Distribución, propiedades y usos. Escuela Nacional de Ciencias Forestales (ESCANIFOR).
- Brito, J.O., Silva, F.G, Leao, M.M., y Almeida, G. (2008). Chemical composition changes in *eucalyptus* and *pinus* woods submitted to heat treatment. *Bioresource Technology*, 99, 8545-8548.
- Blanco, M.L., Carpio, I.M., y Muñoz, F.M. (2005). Fichas técnicas de veinte especies maderables de importancia comercial en Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 102pp.
- Bourgeois J., Bartholin, MC., y Guyonnet, R. (1989). Thermal treatment of wood: analysis of obtained product. *Wood Sci Technol*, 23, 303–310.
- Boonstra, M.J., Acker, J., Tjeerdsma, B.F., y Kegel, E. (2007). Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Annals of Forest Science*, 64, 679-690.
- Candelier K., Dumarçay S., Petrissans A., Petrissans M., Deshamais L., Gérardin P., y Pétrissans, M. (2013). Comparison of chemical composition and decay durability of heat treated wood cured under different inert atmospheres: Nitrogen or vacuum. *Polymer degradation and stability*, 98, 677-681.
- Calonego, W.F., Severo, D.E.L., y Furtado, L.E. (2010). Decay resistance on thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood at 140°C, 160°C, 180°C, 200°C and 210°C. *Bioresource Technology*, 101, 9391– 9394.
- Calonego, F.W., Severo, ETD., y Ballarin, A.W. (2011). Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. *Eur J Wood Prod*, 70, 453–460.
- Castro, M.F., y Márquez, A. (2004). Biodeterioro de maderas de *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* Barr y *Gmelia arborea* Roxb. Caudada por hongos y bacterias del suelo. *Acta Biol, Venez*, 24(1), 13-19.

- Cárdenas, D., y Polanco, C. (2004). Durabilidad natural de la madera de *Trichospermum colombianum* (algodoncillo). *Revista Colombia Forestal*, 8, 120-129.
- Carpio, I.M. (2003). Maderas de Costa Rica, 150 Especies Forestales. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 338pp.
- Colom, X., Carrillo, F., Nogués, F., Garriga, P. (2003). Structural analysis of photodegraded Wood by means of FTIR spectroscopy. *Polym Degrad Stab.* 80.
- DETENAL. Descripción de Estudio del Territorial Nacional. (1979). Descripción de la leyenda de la carta edafológica. Folleto explicativo. Pub. FAO/UNESCO. México, D. F. México.
- Derya, S., y Bilgin, G. (2008). The effects of heat treatment on physical properties and surface roughness of red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) Wood. *Bioserorurce Technology*, 2846-2851.
- Downs, G. (2003). Estudio tecnológico de la madera de *Gmelina arborea* Roxb., proveniente de plantaciones jóvenes del estado de Campeche. Campeche, México.
- Echenique, R., y 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.
- Equihua, M.L. (2016). Anatomía y pruebas físico-mecánicas de la madera de *Gmelina arborea* Roxb. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Fackler, K., Stevanic, J.S., Ters, T., Hinterstoisser, B., Schwanninger, M., y Samén, L. (2011). Localisation and characterisation of incipient Brown-rot decay within spruce Wood cell walls using FT-IR imaging microscopy. *Enzime and Microbial Techology.* 47, 257-267.
- Fengel, D., y Wegener, G. (1984). Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions, Walter de Gruyter, Berlin, 613pp.

- Durmaz, S., Ozgenc, O., Boyaci, I.H., Yildiz, y U.C., Erisir, E. (2016). Examination of the chemical changes in spruce Wood degraded by Brown-rot fungi using FT-IR and FT-Raman Spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, 85, 202-207.
- Garibay, G.A. (2016). Efecto del Termotratamiento en las Propiedades Físico-Mecánicas de *Eucalyptus nitens* procedente de una plantación comercial. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Gérardin, P., Petric, M., Petrissans, M., Lambert, J., y Ehrhardt, J. (2007). Evolution of Wood Surface free energy after heat treatment. *Polymer Degrad Stabil*, 92, 653-657.
- González, G., y Serrano, J.R. (2004). Propiedades y utilidades de la madera de melina (*Gmelina arborea* Roxb) procedente de árboles plantados en Costa Rica. (En línea). *Kurú: Revista Forestal*, 1(1), 1-9. Disponible en <http://tecdigital.tec.ac.cr/servicios/ojs/index.php/kuru/article/viewFile/598/523>.
- Gunduz, G., Korkut, S., y Korkut, S.D. (2008). The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyani Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood. *Bioresource Technology*, 99, 2275-2280.
- Gunduz, G., Aydemir, D., y Karakas, G. (2009). The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood and changes in physical properties. *Materials & Design*, 30(10), 4391-4395.
- Hakkou, M., Petrissans, M., Zoulalian, A., y Gérardin, P. (2005). Investigation of Wood wettability changes during heart treatment on the basis of chemical analysis. *Polymer Degrad Stabil*, 89, 1-5.
- Hafizoğlu, H., Holm bom, B. (1995). Chemical Composition of Extractives from *Abies nordmanniana*. *Holz Roh Werkst*, 53, 273-275
- Hillis, W.E. (1968). Chemical Aspects of Heart wood Formation. *Wood Sci Technol*. 2, 241-259.

- Jamsa, S., y Viitaniemi, P. (2001). Heat treatment of wood better durability without chemicals. In: Rapp, A.O. (Ed.), Review on heat treatments of wood. Cost Action E22. Proceedings of the Special Seminar, Antibes, France, 17–22pp.
- Kasemsiri, P., Hiziroglu, S., y Rimdusit, S. (2012). Characterization of heat treated eastern redcedar (*Juniperus virginiana* L.). *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 1324-1330.
- Kamdem, D.P., Pizzi, A., y Jermannaud, A., (2002). Durability of heat treated wood. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 60, 1–6.
- Korkut, S., Akgul, M., y Dundar, T. (2008). The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris*L.) Wood. *Bioresource Technology*, 99, 1861-1868.
- Korkut, S.D., y Guller, B. (2008). The effects of heat treatment on physical and surface roughness of red-but maple (*Acer trautvetteri* Medw) wood. *Bioresource Technology*, 99, 1861-1868.
- Korkut, S, Hiziroglu, S. (2009). Effect of heat treatment on mechanical properties of hazelnut wood (*Corylus colurna* L.). *Materials and Design* , 30, 1853–1858.
- Kurth, E. F, Tokos, G. M. (1953). The Chemical Composition of Grand fir Bark. *Tappi*, 36(7), 301-304.
- Kotilaninen, R.A., Toivanen, T.J., y Alen, R.J. (2000). FTIR monitoring of chemical changes in soft-wood during heating. *Wood Chem. Technol*, 20(3), 307-320.
- Lacic, R., Hasan, M., Trajkovic, J., Sefc, B., Safran, B., y Despot, R. (2014). Biological Durability of Oil Heat Treated Alder Wood. *Drvna Industrija*, 65 (2), 143-150.
- Lewin, M., Goldstein, I.S. (1991). Wood Structure and Composition. *International Fiber Science and Technology*.11.

- Lomelí, R. M. G. (1992). Generalidades sobre la durabilidad natural de la madera al ataque de hongos xilófagos. *Amatl*, 7(1/2),11-163.
- Martínez, A. T., Speranza, M, Ruiz D., F. J, Camarero, S, Guillen, F, Martínez, M. J, Gutiérrez, A, y del Rio, J. C. (2005). Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *International Microbiology*, 8, 195-204.
- Mburo, F., Dumarcay, S., Bocquet, J.F., Petrissans., y Gérardin, P. (2008). Effect of chemical modifications caused by heat treatment on mechanical properties of *Grevilla robusta* Wood, *Polym. Degrad. Stab.* 93, 401-405.
- 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.
- Mitchell, P.H., (1988). Irreversible property changes of small loblolly pine specimens heated in air, nitrogen, or oxygen. *Wood and Fiber Science*, 20 (3), 320–355.
- Moya, R. R., y Leandro Z, L. (2010). Melina: *Gmelina arborea* Kunth. Verbenaceae. Ficha técnica 5. In tecnología de la madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. (En línea). *Revista Forestal Mesoamericana Kuru*, 7(18-19), 87-101. Disponible en www.tec.ac.cr/revistaforestal.
- Moya, R., Rodríguez Z, A., y Puente, A. (2017). Thermogravimetric and devolatilisation analysis for five plantation species: Effect of extractives, ash compositions, chemical compositions and energy parameters. *Thermochimica Acta*, 647, 36-46.
- Muñoz, F.M. (1998). Propiedades y Usos de las maderas de jaúl y melina. Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- NTRI (National Timber Research Institute). 1979. Composition of Bark – Report No. 2, Bark of *Pinus patula*. Council for Scientific and Industrial Research. Pretoria, South Africa. 11p.

- Niembro, A. (1986). Árboles y arbustos útiles de México. Ed. Limusa. México, D. F. México.
- Ozgenç, O., Durmaz, S., Boyacı, I.H., y Ekisi-Kocak, H. (2017). Determination of chemical changes in heat-treated Wood using ATR-FTIR and FT-Raman spectrometry. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 171, 395-400.
- Pardo, T., y Alfaro, J. (2013). White-rot fungal decay resistance of Teak and Melina wood treated with acetic anhydride. *International Biodeterioration y Biodegradation*, 88, 44-47.
- Paz, F.F.J. (2008). Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de melina (*Gmelina arborea* Roxb), de una plantación proveniente del departamento de Izabal. Tesis de licenciatura. Facultad de ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Priadi, T., y Hiziroglu, S. (2013). Characterization of heat treated wood species. *Materials and Desing*, 49,575-582.
- Polanco T, C., Velásquez, C., y Beltrán, D. (2014). Durabilidad Natural y Descripción Anatómica de la madera de la especie de *Caryodaphnopsis cogolloi* van der Werff. *Colombia Forestal*, 17 (1), 25-39.
- Popescu, C.M. (2013). Structural modifications of *Tilia cordata* Mill wood during heat treatment investigated by FT-IR and 2D IR correlation spectroscopy. *Journal of Molecular Structure*, 1033, 176-186.
- TAPPI. (2000). Test Methods (1994-1995). Technical Association for Pulp and Paper Industry. TAPPI Press. Atlanta, GA.
- 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.

- Rapp, A.O., (2001). Review on heat treatments of wood. In: Special Seminar: Environmental Optimisation of Wood Protection, Antibes, France. Proceedings. Antibes, France: Cost Action E 22, 68pp.
- Rivera, J.G. (2016). Efecto del termo tratamiento en propiedades físico-mecánicas de la madera de *Vitex gaumeri* Greenm (Ya'axnik). Tesis de licenciatura. Facultad de ingeniería en tecnología de la madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O., y Arguedas, M. (2004). Manual para productores de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica. Internet. Disponible: http://www.fonafifo.com/tex_files/proyectos/Manual%20prod%20Melina.pdf.
- Rowell, J. W., y Conner, A. H. (1979). Extractives in Eastern hardwoods, are view. General Technical Report FPL18. Madison, Wisconsin. 67pp.
- Salinas Q., R. y Pérez O., C. P. (1977). Prueba rápida de laboratorio indicadora de resistencias a la pudrición de dos especies de encino. Ciencia forestal. *Revista del Instituto de Investigaciones Forestales*. México. 2(6), 3-5.
- Sanderman, W., y Augustin, H. (1963). Chemical investigation on the thermal decomposition of Wood-Part III: chemical investigation on the course of decomposition. *Holzals Roh-und Werkstoff*, 22 (10), 377–386.
- Silva, J.A, Fuentes, Fco., y col., (2010). Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas. Universidad de Guadalajara.
- Syrjänen, T., y Kestopuu, Oy. (2001). Production and classification of heat treated wood in Finland. In: Review on heat treatments of wood, Proceedings of the special seminar of COST Action E22, Antibes, France.
- Tamarit, J.C., y López, J.L. (2007). Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México. Libro Técnico No. 3. INAFAP-CIR golfo centro, campo Experimental San Martinito. Tlahuapan, Puebla. México.

- Tjeerdsma, B., y Militz, H. (2005). Chemical changes in hydroheat Wood: FTIR analysis of combined hydroheat and dry heat- treated Wood. *Holz Roh- Werkst.* 63, 102-111.
- Voss A. (2001). Short summary of discussion on heat treatments. In: Review on heat treatments of wood, *Proceedings of the special seminar of COST Action E22*, Antibes, France.
- Winandy, J.E., y Rowell, R.M. (2005). Chemistry of Wood Strength. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites.* 303-347
- 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.
- Yildiz, S, Gezer, E.D, Yildiz, U.C. (2006). Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and Environment*, 41, 1762–1766