



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍA DE LA MADERA



## Expansión Térmica y Resistencia a la Compresión de Cuatro Maderas Provenientes de Plantaciones Forestales

Tesis para obtener el título de:  
Ingeniero en Tecnología de la Madera

Presenta:  
IOVANY CARMONA DELGADO

Directores de Tesis:  
Dr. Raúl Espinoza Herrera

Dr. Luis Rafael Olmos Navarrete

Morelia, Mich., abril del 2017.

ÍNDICE	PÁG.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	4
2.1 Plantaciones forestales.....	4
2.2 Propiedades físicas y mecánica.....	5
2.2.1 Anisotropía.....	5
2.2.2 Cambios dimensionales.....	6
2.2.3 Compresión paralela a la fibra.....	8
2.2.4 Compresión perpendicular a la fibra.....	8
2.3. Módulo de Young (módulo de elasticidad).....	8
2.3.1 Esfuerzo al límite de proporcionalidad (ELP) o esfuerzo a la cedencia.....	9
2.3.2 Módulo de ruptura (MOR).....	9
2.4 Propiedades térmicas de la madera.....	9
2.4.1 Expansión térmica.....	9
2.4.2 Conductividad térmica.....	11
2.4.3 Calor específico.....	12
2.4.4 Difusividad térmica.....	12
2.4.5 Degradación térmica.....	12
2.4.6 Dilatometría.....	13
3. GENERALIDADES DE LAS ESPECIES .....	14
3.1 <i>Gmelina arborea</i> .....	14
3.2 <i>Tectona grandis</i> .....	15

3.3 <i>Acacia mangium</i> .....	17
3.4 <i>Eucaliptus nitens</i> .....	19
4. OBJETIVOS.....	22
4.1 Objetivo general.....	22
4.2 Objetivos particulares.....	22
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
5.1 Procedencia de las maderas.....	23
5.2 Aserrío.....	23
5.3 Secado.....	23
5.4 Preparación de las muestras.....	24
5.5 Expansión térmica evaluada por dilatometría.....	25
5.6 Ensayos de compresión en los tres ejes principales de la madera.....	29
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
8. BIBLIOGRAFIA.....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Fig. 2.1 Los tres ejes de la madera según la dirección de las fibras .....	6
Fig. 3.1.1 Árbol de <i>Gmelina arborea</i> .....	14
Fig. 3.1.2 Hojas de árbol <i>Gmelina arborea</i> .....	14
Fig. 3.2.1 Árbol de plantaciones de <i>Tectona grandis</i> .....	16
Fig. 3.2.2 Hojas y corteza de <i>Tectona grandis</i> .....	16
Fig. 3.2.3 Hojas de <i>Tectona grandis</i> .....	17
Fig. 3.2.4 Flor de <i>Tectona grandis</i> .....	17
Fig. 3.3.1 Árbol juvenil de <i>Acacia mangium</i> .....	18
Fig. 3.3.2 Hojas de árbol adulto de <i>Acacia mangium</i> .....	18
Fig. 3.4.1 Plantaciones forestales de <i>Eucalyptus nitens</i> .....	20
Fig. 3.4.2 Hojas de <i>Eucalyptus nitens</i> .....	20
Fig. 3.4.3 Corteza de <i>Eucalyptus nitens</i> .....	20
Fig. 5.1 Dilatómetro vertical Linseis L75V .....	26
Fig.5.2 Muestras de las cuatro especies en cada una de las direcciones de la madera.....	26
Fig. 5.3 Máquina universal Instron .....	29
Fig. 6.1 Deformación en función del tiempo a lo largo del ciclo térmico para <i>Eucalyptus nitens</i> .....	32
Fig.6.2 Deformación en función del tiempo a lo largo del ciclo térmico para <i>Tectona grandis</i> .....	33
Fig.6.3 Deformación en función del tiempo a lo largo del ciclo térmico para <i>Acacia mangium</i> .....	33
Fig. 6.4 Deformación en función del tiempo a lo largo del ciclo térmico para <i>Gmelina arborea</i> .....	34

Fig. 6.5 Deformación en función del tiempo a lo largo del ciclo térmico en el sentido tangencial para las cuatro maderas.....	35
Fig. 6.6 Velocidad de deformación para las cuatro maderas .....	36
Fig. 6.7 Deformación en función de la temperatura antes de la eliminación de humedad y coeficiente de expansión térmica en el sentido tangencial para las cuatro maderas.....	37
Fig. 6.8 Deformación en función de la temperatura antes de la eliminación de humedad y coeficiente de expansión térmica en el sentido radial para las cuatro maderas.....	37
Fig. 6.9 Esfuerzo en función de la deformación para las cuatro especies en las tres direcciones de la madera a) <i>Gmelina arborea</i> , b) <i>Eucaliptus nitens</i> , c) <i>Acacia mangium</i> , d) <i>Tectona grandis</i> . Sin tratamiento térmico.....	40
Fig. 6.10 Esfuerzo en función de la deformación para las cuatro especies en las tres direcciones de la madera a) <i>Gmelina arborea</i> , b) <i>Eucaliptus nitens</i> , c) <i>Acacia mangium</i> , d) <i>Tectona grandis</i> con tratamiento térmico.....	42
Fig. 6.11 Esfuerzo en función de la deformación para las cuatro maderas en el sentido longitudinal sin tratamiento (ST) y con tratamiento térmico (CT).....	43
Fig. 6.12 Módulo de Young para <i>Eucaliptus nitens</i> , <i>Acacia mangium</i> , <i>Tectona grandis</i> , <i>Gmelina arborea</i> , en eje longitudinal, con (CT) y sin tratamiento térmico (ST).....	45
Fig. 6.13 Límite elástico para <i>Eucaliptus nitens</i> , <i>Acacia mangium</i> , <i>Tectona grandis</i> , <i>Gmelina arborea</i> , en eje longitudinal, con (CT) y sin tratamiento térmico (ST).....	46
Fig. 6.14 Módulo de ruptura para <i>Eucaliptus nitens</i> , <i>Acacia mangium</i> , <i>Tectona grandis</i> , <i>Gmelina arborea</i> , en eje longitudinal, con (CT) y sin tratamiento térmico (ST).....	47

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Promedios de la densidad, pérdida de masa y coeficiente de dilatación térmica para las 4 maderas.....	38
Tabla 2. Tabla 2. Valores del módulo de Young, Esfuerzo a la cedencia y módulo de ruptura en las tres direcciones de la madera, sin tratamiento, con tratamiento y el incremento o reducción.....	48

## RESUMEN

El presente estudio se realizó con la finalidad de evaluar el coeficiente de expansión térmica de cuatro especies de maderas provenientes de plantaciones forestales, así como analizar la resistencia a la compresión en cada una de las direcciones principales de la madera. Se analizó el efecto de un tratamiento térmico a 140, 160 y 180°C. En general, la expansión térmica presentó una fuerte anisotropía en las cuatro especies, mostrando una mayor expansión térmica en el sentido tangencial. Las cuatro maderas presentaron valores muy similares en cuanto a la expansión térmica radial con condición húmeda ( $1.3$  a  $1.8 \text{ E}^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Las maderas con menor densidad presentaron mayor pérdida de masa ante el tratamiento térmico. El tratamiento térmico aumentó la resistencia a la compresión y aumentó la resistencia a la deformación. Hubo un aumento en el módulo de Young para las cuatro maderas después del tratamiento térmico, para *Eucalyptus nitens* 12.8%, *Acacia mangium* 62%, *Tectona grandis* 29.5% y *Gmelina arborea* 30.9%.

**Palabras clave:** expansión térmica, resistencia a la compresión, plantaciones forestales, anisotropía, dilatometría.

## ABSTRACT

The present study was carried out with the objective of evaluating the thermal expansion coefficient and compression strength of four species of wood obtained from forest plantations. The study was performed in each of the main directions of the wood in order to establish and quantify the anisotropy in both properties. It was also analyzed the effect of a heat treatment at 140, 160 and 180°C on both properties above mentioned. Results indicate that the thermal expansion showed a strong anisotropy in the four species, showing a greater thermal expansion in the tangential direction. The four woods had very similar values of thermal expansion coefficient in the radial direction for wet conditions ( $1.3$  to  $1.8 \text{ E}^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). The wood with lower density presented greater loss of mass after the heat treatment. The heat treatment increased the compressive strength and increased the resistance to deformation, which turns on an increase in the Young's modulus for the four woods after the heat treatment. The increment in mechanical properties obtained was 12.8%, 62%, 29.5% and 30.9% for *Eucalyptus nitens*, *Acacia mangium*, *Tectona grandis* and *Gmelina arborea*, respectively.

## 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el abastecimiento de la madera cada vez es más limitado. Para contrarrestar este problema se han establecido plantaciones forestales comerciales. Una Plantación Forestal Comercial (PFC) es el establecimiento y manejo de especies forestales en terrenos que han perdido su vegetación forestal natural, con el objeto de producir materias primas maderables y no maderables para su industrialización y/o comercialización. La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2008), menciona que existen aproximadamente 13.9 millones de hectáreas en México para el establecimiento de PFC, en donde se tiene calidad de suelo y climas favorables para obtener un rápido crecimiento. Actualmente, en México existen plantaciones forestales comerciales de especies introducidas tales como el *Eucalyptus nitens*, *Acacia mangium*, *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*.

La especie de *Eucalyptus nitens* originaria de Australia, debido a su rápido crecimiento, adaptabilidad a distintos sitios y su resistencia a las bajas temperaturas, ha sido utilizada en plantaciones comerciales para generar materia prima para la industria del papel y del tablero aglomerado. Sin embargo, poco a poco se está considerando como una opción para obtener madera aserrada.

*Gmelina arborea* (melina), es una especie forestal originaria del Sureste de Asia, especialmente de la India, Nepal, Bangladesh, Sri Lanka, Paquistán, Malasia y el sureste de China. Es de gran importancia económica para diferentes propósitos y se está estudiando ampliamente a nivel mundial. Su velocidad de crecimiento, su diversidad de usos y su fácil adaptación a las diversas condiciones ecológicas, han hecho que la incluyan en la mayoría de los programas de plantaciones forestales tropicales a nivel mundial (Downs, 2003). Países como Brasil, Colombia, Costa Rica y Nicaragua cuentan con plantaciones para el abastecimiento de las grandes industrias papeleras y de tableros. En México, esta especie se adapta fácilmente a las condiciones tropicales donde ha prosperado tanto en el trópico húmedo (Campeche, Tabasco, Veracruz, Quintana Roo, Chiapas y Oaxaca), como en el trópico seco (Nayarit, Colima, Guerrero, Michoacán y Yucatán), se ha desarrollado

adecuadamente en condiciones diversas de suelo, temperatura y precipitación (Downs, 2003).

La *Tectona grandis* (teca) nativa del sur de Asia, (India, Myanmar, Laos y Tailandia) es la especie de madera tropical más plantada en el mundo. Se estima que 74% del total de las plantaciones de maderas duras (latifoliadas) en el mundo son de teca (Keogh, 2009). Esta especie es cultivada hace más de 150 años en 50 países, dentro y fuera de su área de distribución natural (Keogh, 2009). La teca ha sido reconocida como una madera de alta calidad debido a sus excelentes propiedades, convirtiéndose en una de las más valiosas del mundo junto al cedro rojo (*Cedrela odorata*) y la caoba (*Swietenia macrophylla*). Su alta durabilidad natural, resistencia a termitas, hongos y químicos (Bhat *et al*, 2001), hace que la madera de teca presente una alta demanda para diferentes usos.

La *Acacia mangium* (Acacia) es una especie nativa del noreste de Australia, y del este de Indonesia. Gracias a su rápido crecimiento y a la tolerancia a condiciones adversas en suelos, ha venido utilizándose en plantaciones forestales con fines comerciales a lo largo de la franja tropical asiática, africana y recientemente en América. Es utilizada ampliamente en el mundo para la producción de papel, no obstante, recientemente ha comenzado a venderse como madera sólida para la industria del mueble y la construcción (Cacerí, 2016).

La baja conductividad térmica de la madera, en comparación con otros materiales, contribuye a la imagen que ésta tiene de ser un material tibio y agradable, dándole esta característica un gran valor como material aislante. Esta propiedad de la madera, permite su utilización en mangos de enseres de cocina y herramientas en general, no sólo porque conduce poco el calor que recibe, sino porque también se calienta mucho menos que si se empleara algún metal. A pesar de ello, la madera como todo material al ser calentada sufre una dilatación térmica y tiende a contraerse por la pérdida de humedad.

La madera es de naturaleza anisotrópica, por lo que sus características anatómicas, físicas y mecánicas, varían según la dirección en que se midan. La anisotropía de los cambios dimensionales, se asocia a defectos como deformaciones y grietas. Las variaciones en las dimensiones de la madera, son consideradas propiedades físicas importantes debido a que pueden limitar algunos usos (Coronel, 1994). La anisotropía también puede afectar las

propiedades mecánicas de la madera, teniendo una mayor resistencia en el sentido longitudinal que en el transversal.

A pesar de que las plantaciones forestales comerciales vienen a solventar el déficit de madera para la producción de papel y tableros, estas producen madera muy inestable debido al rápido crecimiento del árbol, generando una alta proporción de madera juvenil, ocasionando serios problemas durante su procesamiento (Garibay *et al*, 2014). Las maderas provenientes de plantaciones forestales comerciales tienen características diferentes a las de bosques naturales, debido a sus diferentes condiciones de crecimiento, por lo que es importante estudiarlas, para un mejor entendimiento de estos materiales.

En este trabajo se buscará analizar la anisotropía en relación a la expansión térmica y a la compresión de *Eucalyptus nitens*, *Acacia mangium*, *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*, especies con alta importancia comercial, provenientes de plantaciones forestales comerciales. Se generarán datos cuantitativos de las especies como fuente de conocimiento para su uso posterior en la industria forestal.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1 Plantaciones forestales**

Las plantaciones forestales corresponden a aquellos bosques que se han originado a través de la plantación de árboles de una misma especie o combinaciones con otras, efectuadas por el ser humano (CONAF, 2011).

Una plantación forestal se define de acuerdo con el grado de intervención del hombre en el establecimiento u ordenación del bosque. Una plantación forestal comercial es el establecimiento y manejo de especies forestales en terrenos de uso agropecuario o terrenos que han perdido su vegetación forestal natural, con el objeto de producir materias primas maderables y no maderables, para su industrialización y/o comercialización. En México, existen alrededor de 7 millones de hectáreas de clima templado y tropical, aptas para desarrollar plantaciones forestales comerciales, de las cuales el 80% se ubica en regiones tropicales y sub-tropicales del país, con tipos de suelos y climas favorables para lograr crecimientos rápidos, disponibilidad de mano de obra y un mercado interno que demanda más materias primas forestales cada día (CONAFOR, 2015).

Las plantaciones forestales representan tan sólo una proporción muy reducida de la superficie mundial de bosques. Se estima que en 1995 abarcaban unos 123.7 millones de hectáreas, lo que equivale al 3.5% aproximadamente del total de superficie forestal en el mundo. La mayor parte del área total de plantaciones se encuentra repartida en unos pocos países: China, Rusia, Estados Unidos de América, India y Japón, han establecido más de 10 millones de hectáreas de plantaciones forestales cada uno. Estos cinco países representan en conjunto el 64.7% de los recursos mundiales de plantaciones. La superficie de plantaciones forestales supera el millón de hectáreas sólo en 18 países. Las plantaciones de bosques tropicales y subtropicales constituyen el 44.7% de los recursos mundiales. Las especies latifoliadas tropicales ocupan el 56.7% de la superficie de plantaciones forestales tropicales, en las que predominan dos géneros: *Eucalyptus* y *Pinus*. En los países templados y boreales las plantaciones conforman el 55.3% de los recursos mundiales, y en ellas predominan las

especies de coníferas. De éstas, las más importantes pertenecen a los géneros de *Picea*, *Pinus* y *Abies* (Brown, 2000).

## **2.2 Propiedades físicas y mecánicas**

Las propiedades físico-mecánicas de la madera son importantes, pues se utilizan como índices para evaluar si una madera es adecuada para un uso en particular (Panshin y DeZeeuw, 1980).

### **2.2.1 Anisotropía**

La anisotropía es la propiedad general de la materia donde las propiedades físicas de la misma varían según el sentido en el que son medidas o cuantificadas (De Santis, 2015).

La madera, como todo material proveniente de un proceso orgánico, es un producto complejo y variable, que fue creado como un tejido funcional de las plantas, más que como un material diseñado para satisfacer las necesidades de los carpinteros. Las células que constituyen a la madera presentan cierta variabilidad en cuanto a su ordenación, disposición y abundancia. Son el resultado de las necesidades fisiológicas y mecánicas que tuvo el árbol a lo largo de su desarrollo (Ortega, 1989).

La madera es un material altamente anisotrópico debido a la forma alargada de sus células y la estructura orientada de las paredes celulares. La anisotropía resulta de la diferenciación de los tamaños de las células a lo largo de una temporada de crecimiento del árbol y en parte de la dirección de ciertos tipos de células (Kuklík, 2008), por lo que sus características anatómicas, físicas y mecánicas, varían según la dirección en que se midan. Dentro de la madera tenemos tres ejes principales: el eje longitudinal el cual es paralelo al eje del árbol, el eje tangencial que es perpendicular al eje longitudinal y tangente a los anillos de crecimiento, y el eje radial el cual es paralelo a los rayos medulares y perpendicular a los ejes longitudinal y tangencial (fig. 2.1).

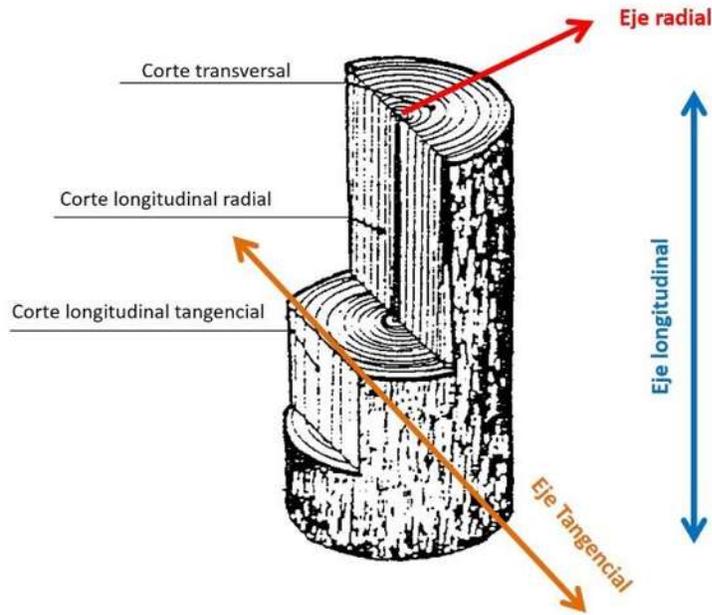


Fig.2.1 Los tres ejes de la madera según la dirección de las fibras.

La anisotropía, es importante para el diseño de productos estructurales (columnas, vigas, etcétera), donde la colocación relativa de los elementos anatómicos de la madera, en diferentes combinaciones con sus direcciones de anisotropía, juegan un papel importante para resistir esfuerzos de compresión (AWC, 1992).

### 2.2.2 Cambios dimensionales

La madera durante su vida útil sufre cambios dimensionales (aumento o disminución) como respuesta a las variaciones de contenido de humedad (CH) que se registran en su interior. Estos cambios dimensionales se originan debido a que la madera está formada por polímeros que contienen grupos hidroxilos y otros grupos funcionales con oxígeno que atraen a la humedad a través de puentes de hidrógeno. Los cambios dimensionales de la madera se realizan cuando sus paredes celulares empiezan a perder o ganar el agua presente en ellas (Panshin y Zeeuw, 1980). Debido a que el espacio existente entre las microfibrillas y sobre todo interfibrillas elementales, disminuye cuando disminuye el contenido del agua o aumenta cuando aumenta el contenido de agua en la madera (Vignote y Jiménez, 2000).

Según Pérez (1983) el punto de saturación de la fibra en un contenido de humedad en el cual se ha eliminado el agua libre del interior de las células; sin embargo, las paredes celulares permanecen saturadas de humedad. Generalmente corresponde de un 28 a 30% de C.H.

La madera por su carácter higroscópico siempre está expuesta a cambios en su contenido de humedad (CH) y por consiguiente también a la modificación de sus dimensiones lineales, es decir, si su CH cambia, estas pueden incrementar o disminuir, por lo que se habla de hinchamiento o contracción de la madera, según el ambiente en el que esté (Forest Products Management Development Institute, 1998).

Los cambios dimensionales de la madera involucran principalmente la contracción e hinchamiento que se produce entre diferentes estados de su saturación en las direcciones longitudinal, radial y tangencial. La magnitud de estos cambios caracteriza el comportamiento de una madera frente a los cambios de humedad y en especial frente al secado. Particularmente, el coeficiente de anisotropía expresa la relación entre el comportamiento tangencial y el radial. Cuanto mayor sea, mayor es la magnitud del problema. Según Coronel (1994), los valores del índice o coeficiente de anisotropía, que se encuentran comprendidos entre 1.2 y 1.5 se consideran bajos, en tanto que entre 1.6 y 1.9 se consideran normales y los mayores arriba de 2.0, originan dificultades para determinados usos de la madera. Los cambios dimensionales se relacionan con la densidad de la madera.

### **Las propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas de la madera son aquellas que definen la aptitud de un material para resistir cargas externas. El estudio de las características tecnológicas de la madera mediante ensayos estandarizados permite ampliar el espectro de usos de las maderas (Roussy *et al*, 2013).

### **2.2.3 Compresión paralela a la fibra**

Este tipo de ensayo se realiza aplicando dos fuerzas axiales y opuestas, tendiendo a producir un acortamiento en la pieza de madera. La madera sometida a este tipo de esfuerzo presenta una falla igual que en un cilindro cuando sale de su propio eje, iniciándose por aplastamiento de las paredes celulares en las zonas débiles, que normalmente son los campos de cruzamiento. Esta propiedad es importante para todos aquellos elementos sometidos a cargas axiales como columnas, pilotes y postes (Ortega, 1989).

### **2.2.4 Compresión perpendicular a la fibra**

La resistencia a este tipo de esfuerzo está íntimamente relacionada con la dureza de la madera y con la resistencia al corte perpendicular de las fibras. Debido a que en la práctica no existe falla del elemento, se suele tomar para fines prácticos la resistencia alcanzada en el límite de proporcionalidad, debido a que para alcanzar la resistencia máxima se necesitaría aplastar las células modificando los lúmenes, hasta que desaparezcan completamente los huecos y aun así la pieza de madera seguiría manteniendo su capacidad de carga (Grigoriev, 1985).

En este tipo de ensayo se ha observado que en las especies de latifoliadas con rayos medulares anchos, la resistencia a la compresión radial es 1.5 más alta que la compresión tangencial; y en las coníferas la resistencia tangencial es más alta (Grigoriev, 1985). Cuando se aplica una carga de compresión en sentido perpendicular a la fibra de la madera, se produce un estrés que deforma las células perpendiculares. Una vez que las cavidades de las células se contraen, la madera es más fuerte porque no hay ningún vacío (Winandy, 1994).

### **2.3. Módulo de Young (módulo de elasticidad)**

El módulo de Young (E), o módulo de elasticidad, representa la fuerza necesaria para obtener una deformación unitaria. Se denomina módulo de elasticidad a la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria. Si el

esfuerzo es una tensión o una compresión, se denomina módulo de Young, y tiene el mismo valor para una tensión que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda un valor máximo denominado límite elástico (Martínez y Azuaga, 1997).

Tanto el módulo de Young como el límite elástico, son distintos para las diversas sustancias. El hecho de que la variación de deformación unitaria sea directamente proporcional a la variación de esfuerzo, siempre que no se sobrepase el límite elástico, se conoce como ley de Hooke (Martínez y Azuaga, 1997).

### **2.3.1 Esfuerzo al límite de proporcionalidad (ELP) o esfuerzo a la cedencia**

Se define como el esfuerzo máximo que puede soportar un material sin sufrir una deformación permanente o rotura. Una vez que cesa la fuerza aplicada, la energía puede ser recuperada hasta ese punto, pero una vez superado el límite elástico, la longitud o la forma ya no se recuperan por completo (Fitzgerald *et al*, 2004).

### **2.3.2Módulo de ruptura (MOR)**

Módulo de ruptura en compresión paralela, es el esfuerzo máximo capaz de soportar la madera bajo una carga de aplastamiento aplicada a lo largo de su eje longitudinal (Silva *et al*, 2010).

## **2.4 Propiedades térmicas de la madera**

### **2.4.1 Expansión térmica**

Las propiedades de la expansión térmica de la madera que contiene agua son difíciles de definir. Cuando la madera con humedad se calienta, tiende a expandirse debido a la normalidad de la expansión térmica y al mismo tiempo se contrae debido a que el secado se

produce con el aumento de temperatura, a menos que la madera posea un contenido de humedad de aproximadamente 3 a 4%, la contracción será mayor que la expansión térmica.

La expansión térmica de la madera es tan pequeña que no es tan perceptible como la contracción o hinchamiento debido a la humedad, por lo que, es mucho menor que los cambios dimensionales asociados con el contenido de humedad (Simpson, 1991).

La dilatación térmica de la madera es prácticamente nula. Sobre todo si se compara con otros materiales metálicos (Vignote y Jiménez, 2000).

El coeficiente de expansión térmica es una medida del cambio relativo de dimensión causada por el cambio de temperatura. Los coeficientes de expansión térmica de la madera completamente seca son positivos en todas las direcciones; es decir, la madera se expande al calentarse y se contrae al enfriarse. Las investigaciones han sido limitadas a explorar la influencia de la expansión térmica en la madera. El coeficiente de expansión térmica de madera seca al horno y paralelo a la fibra parece ser independiente de la gravedad específica y de la especie. En las pruebas de ambas maderas, latifoliadas y coníferas, los valores en forma paralela a la fibra han oscilado entre aproximadamente  $3.1$  a  $4.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Los coeficientes de dilatación térmica en sentido de la fibra (radial y tangencial) son proporcionales a la gravedad específica. Estos coeficientes tienen un intervalo aproximadamente de 5 a 10 veces mayor que los coeficientes en el sentido paralelo a la fibra, son de más práctico interés. Los coeficientes de dilatación térmica pueden considerarse independientes de la temperatura en el rango de  $-51$  a  $54^\circ\text{C}$ . La madera que contiene humedad reacciona de manera diversa a diferente temperatura que la madera seca. (Simpson y Tenwolden, 1987).

La madera a niveles de humedad intermedia (entre 8 y 20%) primero se dilatará cuando se calienta, y luego se reducirá gradualmente a un volumen menor que el volumen inicial conforme la madera gradualmente pierde agua en el estado caliente (Simpson y Tenwolden, 1987).

En la dirección longitudinal a la fibra, donde el cambio dimensional causado por la pérdida de humedad es muy pequeño, estos cambios predominarán sobre los correspondientes

cambios dimensionales causados por la expansión térmica a menos que la madera inicialmente esté muy seca (Simpson y Tenwolden, 1987).

#### **2.4.2 Conductividad térmica**

La conductividad térmica (K) es una medida de la tasa de flujo de calor ( $W\text{-cm}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) a través de un material sometido a la unidad diferencia de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) a través de unidad de espesor (cm). La conductividad térmica de la madera estructural es mucho menor que la conductividad de los metales con que la madera a menudo se acopla en la construcción. Se trata de dos a cuatro veces la de los materiales aislantes comunes. Por ejemplo, la conductividad de la madera de conifera estructural al 12% de humedad está en el intervalo de 0.001 a  $0.0014\text{ W}\text{-cm}\text{-}^{\circ}\text{C}^{-1}$ . En comparación con 2.16 para el aluminio, 0.45 para el acero, 0.009 para el hormigón, 0.01 para el vidrio, 0.07 para el yeso, y 0.00036 para la lana mineral. La resistividad térmica es simplemente el recíproco de la conductividad térmica. (Simpson y Tenwolden, 1987).

La conductividad térmica de la madera se ve afectada por una serie de factores básicos: la densidad, contenido de humedad, contenido de extraíbles, dirección de la fibra, defectos estructurales tales como rajaduras y los nudos, el ángulo de la fibra, y la temperatura. La conductividad térmica aumenta a medida que la densidad, el contenido de humedad, la temperatura, o contenido extraíbles también incrementan. La conductividad térmica es casi la misma en la dirección radial y tangencial. Sin embargo, la conductividad a lo largo de la fibra ha sido reportada por Simpson y Tenwolden (1987), como mayor que la conductividad a través de la fibra por un factor de 1.5 a 2.8, con una media de aproximadamente 1.8.

El efecto de la temperatura sobre la conductividad térmica es relativamente menor. La conductividad aumenta entre 2 a 3% por cada  $10^{\circ}\text{C}$  (Glass y Zelinka, 2010).

La madera es uno de los materiales más aislantes que tiene el hombre, sólo superado por el corcho, o ciertos materiales sintéticos, no resistentes (poliuretanos, poliestirenos etc.) (Vignote y Jiménez, 2000).

### **2.4.3 Calor específico**

El calor específico se define como la cantidad de energía necesaria para aumentar una unidad de temperatura (°C) por unidad de masa (kg). El calor específico de la madera depende de la temperatura y el contenido de humedad, pero es prácticamente independiente de la densidad o especie (Simpson y Tenwolden, 1987).

### **2.4.4 Difusividad térmica**

La difusividad térmica es una medida de la rapidez con que un material puede absorber el calor de su entorno. Se define como la relación de conductividad térmica entre la densidad por la capacidad calorífica. Por lo tanto, las conclusiones en cuanto a su variación con la temperatura y la densidad se basan a menudo en el efecto de estas variables, en la capacidad de calor y conductividad térmica. Debido a la baja conductividad térmica, densidad moderada y capacidad térmica de la madera, la difusividad térmica de la madera es mucho menor que la de otros materiales estructurales, tales como metal, ladrillo y piedra. Un valor típico de la madera es de  $1.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{-s}^{-1}$  frente a  $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{-s}^{-1}$  para el acero y  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{-s}^{-1}$  de la piedra y la lana mineral. Por esta razón, la madera no se siente extremadamente caliente o fría para el tacto al igual que algunos otros materiales (Glass y Zelinka, 2010).

La difusividad térmica es una propiedad poco valorada que interpreta la velocidad con que un material se calienta, puesto en contacto con una fuente de calor. Es una propiedad muy requerida en muebles que vayan a estar en contacto con el hombre, pues si la difusión térmica es alta, el mueble quita o cede calor al hombre muy rápidamente, sintiendo este frío o calor, es la misma medida que la diferencia de temperatura entre ambos. La difusión térmica es muy baja si se compara con otros materiales (Vignote y Jiménez, 2000).

### **2.4.5 Degradación térmica**

La degradación térmica consiste en la ruptura de cadenas moleculares a elevadas temperaturas. Una consecuencia de esto es que algunos polímeros experimentan reacciones

químicas que producen gases. Estas reacciones se evidencian por la pérdida de peso del material. La estabilidad térmica de los polímeros es una medida de su resistencia a esta descomposición (Calliester, 2007).

La organización física de la pared celular tiene como base la celulosa y comienza a descomponerse químicamente cerca de los 200°C. De entre los tres componentes, las hemicelulosas son las más susceptibles a la degradación térmica, seguida por la celulosa, por otro lado la lignina contribuye más a la formación del carbón y, consecuentemente contribuye menos a la formación de las llamas cuando es comparada con la celulosa (Rowell, 1991).

La madera es un combustible sólido. Como tal, pasa por un proceso de degradación térmica cuando es sometida a temperaturas elevadas (Moura *et al*, 2007).

La acción térmica sobre la madera causa su degradación a través del proceso de combustión de sus componentes y de la liberación de vapor, gases combustibles y carbón. Esto reduce su capacidad de carga debido a la disminución de la sección transversal por carbonización y a las variaciones de sus propiedades de resistencia y rigidez, ocasionadas por la exposición a altas temperaturas (Moura *et al*, 2007).

#### **2.4.6 Dilatometría**

La dilatometría es una técnica de estudio de las transformaciones de fase en materiales sólidos. Por medio de incrementos controlados de temperatura se cuantifica si el material manifiesta variaciones en su longitud y a qué temperatura se presentan las dilataciones o contracciones, según el cambio en las pendientes de la curva (Alvarado, 2010).

La técnica mecánica de dilatometría es ampliamente utilizada, y ésta consiste en el calentamiento de la muestra en un horno, que toma la medición en el cambio de la longitud de la muestra durante todo el ciclo térmico programado en el horno. La dilatometría es una técnica utilizada para medir la expansión de los materiales sólidos por calentamiento y contracción por enfriamiento, el mayor cambio dimensional se encuentra en la longitud (ASM, 2002).

### 3. GENERALIDADES DE LAS ESPECIES

**3.1 Nombre científico:** *Gmelina arborea* Roxb.

**Nombre común:** melina, yemané (Myanmar, Malasia), gomari (India), soh (China), gamar (Bangladesh), white teak, gumhar, white beech.

**Familia:** *Verbenaceae*

#### Descripción de la especie

Es un árbol de mediano a grande que en sitios buenos y en plantaciones bien manejadas tiene un fuste largo, recto y claro, con un mínimo de aguzamiento y una copa bien formada. La melina se reconoce como una especie maderable con un crecimiento extraordinariamente rápido. La corteza es lisa, corchosa y de color café claro o grisáceo. El espesor de la corteza es de alrededor 10 mm (Gonzales y Serrano, 2004). Se muestra el árbol y hojas de melina en las figuras 3.1.1 y 3.1.2



Fig. 3.1.1 Árbol de *Gmelina arborea* Roxb



Fig. 3.1.2 Hojas de árbol de *Gmelina arborea* Roxb

## **Descripción de la madera**

La especie es de secado lento y no presenta problemas en el rajado durante el proceso, si se realiza un programa adecuado de secado. En exteriores la especie ha dado muy buenos resultados; resiste bien a la humedad debido al contenido de ceras, grasas y resinas naturales en su tejido.

## **Usos de la especie**

La madera es utilizada para aserrío, construcciones rural y construcción en general, tarimas, leña, muebles, artesanía, contrachapados, embalajes, postes, tableros, carpintería, tableros y aglomerados. La madera tiene uso industrial por sus fibras fuertes e impregnable, se extrae para papel de buena calidad. Industria farmacéutica: la corteza se utiliza con fines medicinales. Otros usos: ebanistería, palillos para fósforos, palos de escoba, lápices, ataúdes, tacones y hormas para zapatos, embalajes (Muñoz, 1988; Rojas y Murillo, 2004).

### **3.2 Nombre científico:** *Tectona grandis* L. F.

**Nombre común:** El nombre común más conocido en la mayoría de los países donde se ha introducido esta especie es teca. En la India, se le conoce como sagun, sagon, saguan, skuhu, toak, shilp tru, Indian oak.

**Familia:** *Verbenaceae*

## **Descripción de la especie**

En su lugar de origen el árbol puede alcanzar más de 50 m de altura y 2 m de diámetro. En América central, alcanza alturas superiores a los 30 m. Es un árbol de fuste recto, con corteza áspera y delgada, fisurada, de color café. La madera es moderadamente dura, pesada y presenta anillos de crecimiento.

La teca crece muy rápido al principio, alcanzando 8-10 m de alto; después el crecimiento es lento, y en suelos no muy buenos no tiene buena forma. Una producción de 10 m<sup>3</sup> por hectárea, por año es común durante los primeros 10-15 años (Geilfus, 1994).

### Descripción de la madera

La albura es amarillenta blancuzca, el corazón es de color verde oliva y al cortarse se torna café oscuro. La madera es moderadamente dura, pesada y presenta anillos de crecimiento. La madera de teca es fina y dura, cualidad muy apreciada para diversos usos; es fácil de trabajar, secar y preservar; su durabilidad natural es buena y tiene buena estabilidad dimensional. Tiene resistencia a las termitas, los hongos y a la intemperie (Chaves y Fonseca, 1991). Se muestra de la fig. 3.2.1 a 3.2.4 el árbol, hojas y flores de la teca.



Fig. 3.2.1 Árbol de plantaciones de *Tectona grandis* L.  
F.



Fig. 3.2.2 Hojas y corteza de *Tectona grandis*



Fig. 3.2.3 Hoja de *Tectona grandis* L. F



Fig. 3.2.4 Flor de *Tectona grandis* L. F.

### Usos de la especie

La madera de teca es dura, pesada y excepcionalmente duradera y resistente. Se usa para construcciones pesadas, barcos, etc. La madera con menores diámetros sirve para postes y varas. Da una buena leña. Sirve para rompe vientos (Geilfus, 1994).

### 3.3 Nombre científico: *Acacia mangium* Wild.

**Nombre común:** Acacia, Acacia nogal (Inglaterra y Australia). Tongke Hutan (Indonesia), Mangium, Krathin (Malasia) (Brum *et al.*, 2003).

**Familia:** *Leguminosae*.

### Descripción de la especie

Es originaria del norte de Australia (Queensland), Nueva Guinea y las islas Molucas (este de Indonesia). Actualmente se conoce que las mayores extensiones de plantaciones de *Acacia mangium* están ubicadas en Sabah (norte de Borneo), en Indonesia y otras partes de Malasia.

El árbol alcanza generalmente entre 10 y 15 metros de altura, con un fuste recto, se muestra en la fig. 3.3.1 y 3.3.2. En rodales naturales se han observado fustes de hasta 90 cm. La copa es abierta en arboles aislados en plantaciones (Ugalde, 1997).

### Descripción de la madera

De acuerdo con estudios realizados en los laboratorios de Tecnología de la Madera en INRENARE en Panamá. La madera de *Acacia mangium* es moderadamente pesada con una densidad media de  $0.47 \text{ g-cm}^{-3}$ . El valor de contracción, verde al estado anhidro es de 10.6%. Esta relación indica que la madera es estable y presenta buen comportamiento en el secado. La madera es fácil de aserrar, tornear, cepillar, moldear y lijar. La madera de *Acacia mangium* presenta características y propiedades adecuadas para su industrialización (Ugalde, 1997). Se muestran el árbol y hojas de acacia figuras 3.3.1 y 3.3.2.



Fig. 3.3.1 Árbol juvenil de *Acacia mangium*.  
(Tomada de Krisnawati *et al* 2011).



Fig. 3.3.2 Hojas de árbol adulto de *Acacia mangium*. (Tomada de Krisnawati *et al* 2011).

## **Uso de la especie**

De acuerdo con los estudios efectuados, la madera de *Acacia mangium* es recomendada para construcciones internas y carpintería en general, para muebles y gabinetes de alta calidad, trabajos en torneado, en ebanistería, para cajas, chapas, fabricación de juguetes e instrumentos musicales de alta calidad (Gonzales y Serrano, 2004).

### **3.4 Nombre científico:** *Eucalyptus nitens*.

**Nombre común:** Eucalipto nitens, eucalipto brillante, eucalipto de las heladas. Shining gum (Australia).

**Familia:** *Mirtaceae* (Flández, 2006)

### **Descripción de la especie**

Es un árbol de gran desarrollo que llega de 60 a 70 m de altura y ocasionalmente a 90 m con diámetros de 1 a 2 m, en condiciones favorables. Esta especie ha cobrado gran importancia en Chile debido a su excelente desarrollo, ya que se trata de la especie de más rápido crecimiento plantada en ese país y tiene gran resistencia al frío.

La especie en estado natural, se encuentra en distribución muy discontinua, por lo que presenta una gran variabilidad genética (Ugalde, 1997).

### **Descripción de la madera**

El color de duramen es rosado y liviano para ser de eucalipto. Los más livianos son más fáciles de trabajar, se obtienen mayores rendimientos, proporcionan una gama mayor de productos, pero poseen menos dureza y densidad. La densidad básica promedio de muestras obtenidas en Chile es de  $0.495 \text{ g-cm}^{-3}$  y en Australia varía entre  $0.645$  y  $0.720 \text{ g-cm}^{-3}$  (Ugalde, 1997).

En la fig. 3.4.1 se muestran arboles juveniles de eucalipto en una plantación forestal. Se presentan hojas y corteza de eucalipto fig. 3.4.2 y 3.4.3.



Fig. 3.4.1 Plantación forestal de *Eucalyptus nitens*.



Fig. 3.4.2 Hojas de *Eucalyptus nitens*.



Fig. 3.4.3 Corteza de *Eucalyptus nitens*.

### **Usos de la especie**

En España su uso es principalmente energético. En Australia se usa en la industria de la celulosa en mayor medida que el *Eucalyptus globulus*. También es muy adecuada para ebanistería y carpintería. Se usa en la fabricación de postes y traviesas, así como en vagones y construcción de edificios (Flández, 2006).

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo general**

Determinar la expansión térmica y la resistencia a la compresión en las tres direcciones principales de la madera de 4 especies provenientes de plantaciones forestales y evaluar el efecto de un tratamiento térmico sobre las variables estudiadas.

### **4.2 Objetivos particulares**

Determinar la expansión térmica en la madera de *Eucaliptus nitens*, *Acacia mangium*, *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*.

Determinar la pérdida de masa para las cuatro especies durante un tratamiento térmico de 140, 160 y 180°C. Con un tiempo de permanencia de 1 hora para cada temperatura.

Determinar el módulo de Young (módulo de elasticidad), esfuerzo al límite de proporcionalidad (ELP) o esfuerzo a la cedencia a la compresión y el módulo de ruptura (MOR) en las tres direcciones principales de la madera con y sin tratamiento térmico.

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1 Procedencia de las Maderas**

La madera de *Eucalyptus nitens* utilizada para este estudio fue colectada en una PFC de 8 años ubicada en el municipio de Maravatío, Michoacán, México, el cual se localiza al noreste del estado en las coordenadas 19° 54'' de latitud norte y 100° 27'' de longitud oeste a una altura de 2020 msnm, su clima es templado con lluvias en verano y con una precipitación pluvial anual promedio de 897.7 milímetros y temperaturas que oscilan entre los 14 y 30°C. La madera de *Gmelina arbórea* y *Tectona grandis*, se obtuvieron de árboles de 12 años aproximadamente. La plantación se localiza en el 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. Los árboles de *Acacia mangium* se obtuvieron en el estado de Veracruz, con temperaturas que oscilan entre 13 y 32°C y una precipitación media anual de 1500 mm.

### **5.2 Aserrío**

El aserrío y el desarrollo del habilitado de las maderas se realizaron en el laboratorio Francisco Carreón Reyes en el área de física y mecánica de la madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera en Morelia, Michoacán. Para el aserrío de la madera se utilizó una sierra vertical simple de 4'' dotada con sistema de fricción.

### **5.3 Secado**

Una estufa convencional marca Hildebrand® con capacidad de 1 m<sup>3</sup> se utilizó para el secado de la madera. Se utilizaron programas de secado con base a lo establecido por Simpson (1996), dejando la madera a un contenido de humedad final del 12%.

## **5.4 Preparación de las Muestras**

### **Clasificación**

Se seleccionó la madera de las cuatro especies, que estuvieran libres de defectos, sin nudos, alabeos, rajaduras para su posterior habilitado.

### **Canteado**

Se manejó una canteadora para obtener uno de los lados de la madera lo más recto posible, para posteriormente tener un corte más preciso en la obtención de listones de madera.

### **Obtención de listones**

Una sierra circular de banco de 24 dientes se utilizó para la obtención de listones de madera, el banco cuenta con un motor de 3 caballos de fuerza. Se obtuvieron listones de madera largos en los tres sentidos de la madera, dándole una medida mayor para poder manipular la madera y después dejarla a la medida final. Las tiras o listones de madera que se obtuvieron fueron de 10 mm de ancho.

### **Cepillado**

Un cepillo de tres cuchillas con un motor de 15 Amperes y 10 000 rpm fue utilizado para dar la medida final a los listones de madera. Se buscó el sentido bien orientado en cada una de las direcciones principales de la madera.

### **Corte transversal**

Una sierra de inglete marca DEWALT de 15 Amperes, 4000 rpm, con un disco con dientes de carburo de tungsteno de 12 pulgadas, se utilizó con el fin de dar un corte preciso para la obtención de las probetas.

Las probetas que fueron utilizadas en los ensayos de dilatometría y resistencia a la compresión tenían unas medidas de 8 x 8 x 20 mm.

## 5.5 Expansión térmica por Dilatometría

Los ensayos de expansión térmica fueron realizados por medio de un dilatómetro vertical Linseis L75V (fig. 5.1). Debido a la anisotropía de la madera se midieron los cambios dimensionales de la madera en sus 3 direcciones principales: radial, tangencial y longitudinal. Se obtuvieron 30 muestras de cada especie y en cada sentido de la madera con las medidas finales mencionadas anteriormente, donde la dimensión más grande representa la dirección a evaluar, como se muestra en la fig. 5.2. Las muestras acondicionadas a 12% C.H. fueron sometidas a una velocidad de calentamiento de 10°C/min hasta llegar a 140, 160 y 180°C, respectivamente con un tiempo de permanencia de 1h en cada temperatura. Después de enfriar, las muestras se calentaron a 100°C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min con el fin de estimar el coeficiente de expansión térmica para las pruebas sin humedad. A partir de los datos de dilatometría, los coeficientes de expansión térmica lineal se estimaron mediante el trazado de la deformación axial como una función de la temperatura y el ajuste lineal que permite estimar el coeficiente de expansión térmica. Este valor se calculó en cada muestra y en la dirección estudiada, y en las dos condiciones: la madera acondicionada a 12% de C.H. y la madera anhidra. Los ensayos realizados son una propuesta propia, las muestras se ajustaron a los equipos que se utilizaron teniendo en cuenta la relación de las dimensiones de las muestras en algunos ensayos normalizados.

Para estimar la deformación axial instantánea de la muestra durante un ciclo térmico se utilizó la ecuación 1.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

$\epsilon$  = Es la deformación axial

$\Delta l$  = Es el cambio de longitud

$l_0$  = Es la altura inicial de la muestra



Fig. 5.1 Dilatómetro vertical Linseis L75V.

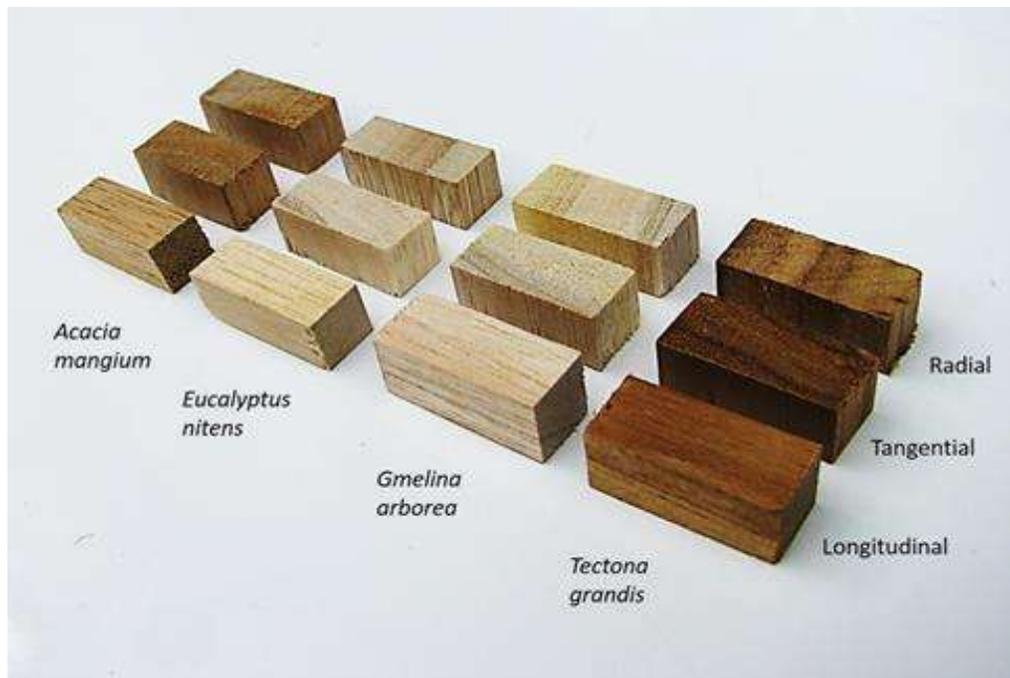


Fig. 5.2 Muestras de las cuatro especies en cada una de las principales direcciones de la madera.

La expansión térmica se estimó a partir de los datos obtenidos por los ensayos de dilatometría y utilizando la ecuación 2 para calcular el coeficiente de expansión térmica.

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$\alpha$  = Coeficiente de expansión térmica ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$T$  = Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$l_0$  = Longitud inicial ( $\mu\text{m}$ )

$l_f$  = Longitud final ( $\mu\text{m}$ )

$\Delta l = l_f - l_0$  Cambio de longitud ( $\mu\text{m}$ )

$\Delta T = T_f - T_0$  Cambio de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

De la ecuación 2 se llega a la ecuación 3

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T \quad \text{Ec. 3}$$

Para estimar el ajuste lineal, se sustituyó de la ecuación 3 para llegar a la ecuación de la recta (Ec. 4).

$$Y = mx + c \quad \text{Ec.4}$$

Donde:

$$Y = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$m = \alpha$  Coeficiente de expansión térmica (CET) ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$x = \Delta T$  Cambio de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$c =$  Constante

De donde la pendiente del ajuste lineal corresponde al coeficiente de expansión térmica.

### **Degradación Térmica**

Las muestras de la madera se sometieron a temperaturas de 140, 160 y 180 $^{\circ}\text{C}$  en un dilatómetro vertical Linseis L75V con un tiempo de 1h en cada temperatura. Se utilizaron muestras de 8 x 8 x 20 mm de las cuatro especies para la determinación de la degradación térmica mediante la pérdida de masa.

Las muestras se pesaron antes y después del termotratamiento con una balanza analítica Ohaus con una resolución de 0.01 g. A partir de los datos obtenidos se calcularon la pérdida de masa de las muestras de madera, de acuerdo con la (Ec. 5).

$$\text{Pérdida de masa (\%)} = \left( \frac{m_i - m_f}{m_i} \right) (100) \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$m_i =$  masa inicial

$m_f =$  masa final

## 5.6 Ensayos de compresión en los tres ejes principales de la madera

Las muestras fueron sometidas a un ensayo de compresión axial por triplicado en una máquina universal Instron 1195/4360 con una capacidad de carga máxima de 10 toneladas, el dispositivo experimental utilizado en la prensa se muestra en la fig.5.3. Las muestras que se utilizaron fueron con y sin tratamiento térmico. La prueba fue realizada a una velocidad de 5 mm/min hasta que la muestra se fracturó conduciendo a una falla inminente en las muestras ensayadas. Se obtuvieron los datos del ensayo para graficar el esfuerzo en función de la deformación a partir de celdas de carga y un software proporcionado por el fabricante. Una vez graficada la información, se obtuvieron los datos de módulo de Young o módulo de elasticidad, límite elástico o esfuerzo a la cedencia y esfuerzo máximo respectivamente. El módulo de Young fue obtenido a partir de la gráfica esfuerzo deformación, mediante la pendiente que se forma en la zona elástica antes de que el material alcance la zona plástica. Para el cálculo del límite elástico convencional se trazó una línea paralela a la línea de proporcionalidad en la zona elástica que parte cuando la deformación es igual a 0.2%, la intersección entre la curva trazada del diagrama esfuerzo deformación y la paralela corresponden al esfuerzo de cedencia.

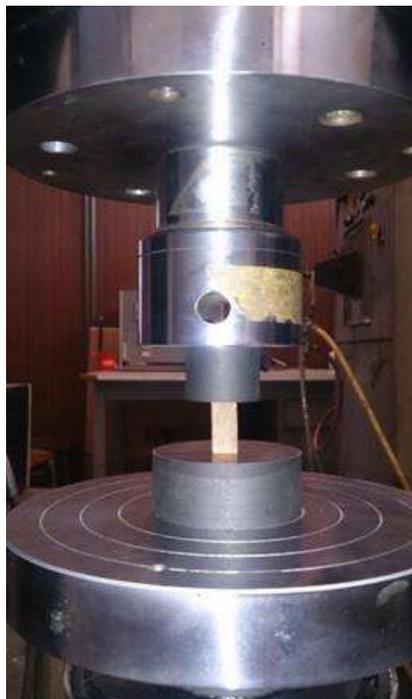


Fig. 5.3 Máquina universal Instron.

El módulo E se estimó a partir de los datos obtenidos en la zona elástica con la ayuda de la ley de Hooke, Ec. 6 (Tsai, y Miravete de Marco, 1988).

$$\sigma = E \varepsilon \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo (MPa)

$E$  = Modulo de Young (GPa)

$\varepsilon$  = Deformación (adimensional)

Con el objetivo de determinar los cambios sufridos por la madera con el tratamiento térmico, se determinó el módulo de Young (E) y esfuerzo al límite de proporcionalidad (ELP) o esfuerzo a la cedencia y el módulo de ruptura de las diferentes maderas en sus tres respectivas direcciones antes y después del tratamiento.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Dilatometría

De la figura 6.1 a la 6.4 se presenta la deformación sufrida para el *Eucalyptus nitens*, *Tectona grandis*, *Acacia mangium* y *Gmelina arborea* en las 3 direcciones radial, tangencial y longitudinal durante el ciclo utilizado para realizar el tratamiento térmico de las maderas. Se puede observar que al comienzo de cada curva, hay una dilatación que es debido a la expansión térmica, la cual alcanza un valor máximo. Posteriormente, hay una fuerte contracción que se presenta alrededor de los 80°C, se asume que ésta es causada por la pérdida de agua. La contracción termina cuando la temperatura alcanza la temperatura isotérmica a los 140°C. Durante ese periodo se observa una línea horizontal que indica que la contracción alcanzó su equilibrio. Después de eso, se observa una nueva expansión térmica cuando la temperatura aumenta hasta 160°C. A lo largo de esta temperatura, no se detectó ningún cambio dimensional. Se detecta otra expansión cuando la temperatura aumenta hasta 180°C, enseguida, se observa una contracción en el rango de 180 °C, que se asume que es causada por cierto nivel de degradación de la madera debido a la exposición a altas temperaturas. Se observó el mismo comportamiento para todas las muestras, aunque se observa que en la dirección tangencial la deformación es más grande seguida de la dirección radial. La dirección longitudinal mostró el cambio dimensional más bajo. Estas tendencias son similares a los reportados por varios autores (Brown *et al*, 1952; Kollmann y Cote, 1968; Kubler *et al*, 1973) cuando determinaron la expansión térmica de diferentes tipos de madera, cuyas conclusiones se refieren a expansiones más grandes en el sentido tangencial.

En la fig. 6.1 se muestra la deformación durante el ciclo térmico para la madera de *Eucalyptus nitens*. Se aprecia el mismo comportamiento que para el caso de la *Tectona grandis* (fig. 6.2). Se observa que en la dirección longitudinal hay una leve contracción, debido a la eliminación de la humedad y posteriormente se mantiene inerte hasta al final del ciclo térmico. En la dirección radial muestra una contracción debido a la pérdida de agua en las muestras de madera, en el cambio de temperatura en los 160 y 180°C se detectó una contracción que se asume es por pérdida de masa por la exposición al ciclo térmico. El sentido tangencial se observa una gran contracción por la pérdida de agua, la contracción es 2.3 veces mayor que el sentido radial. Se detectó una dilatación mayor que en el eje radial y longitudinal. Se presentó una pérdida de masa a partir de los 180°C.

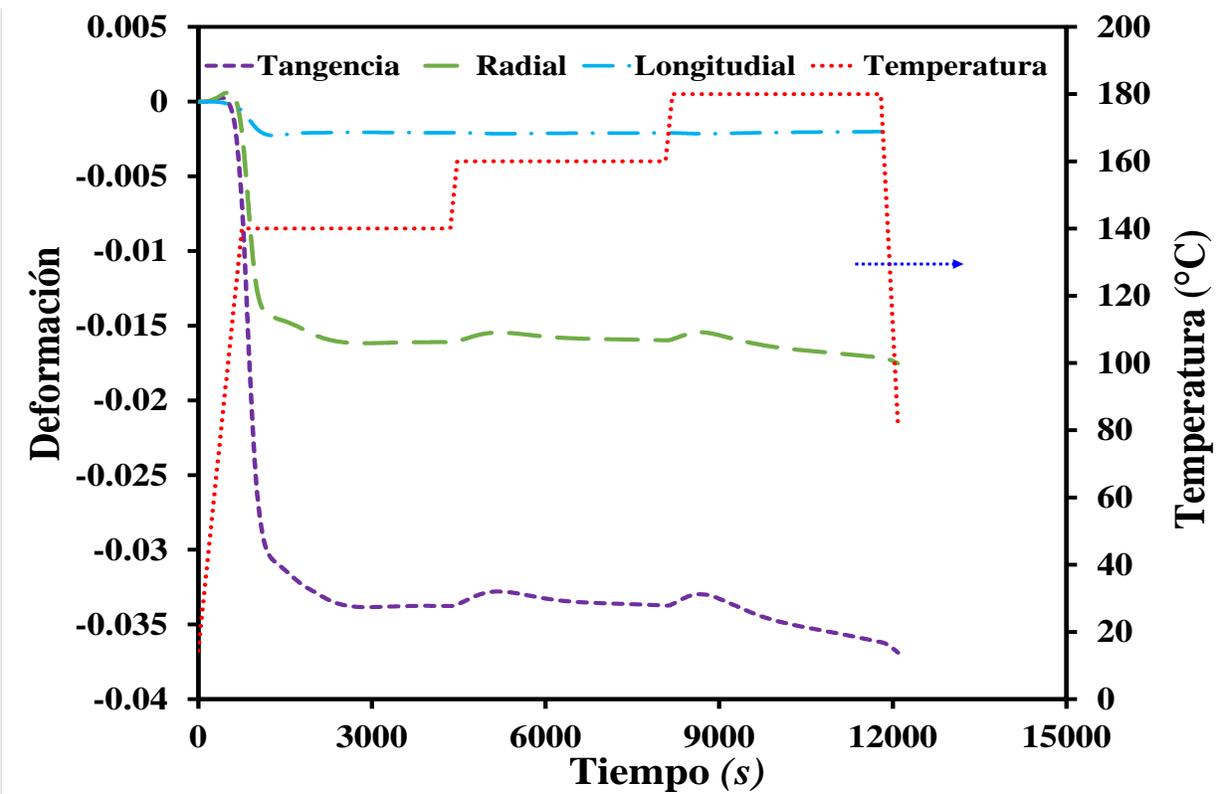


Fig. 6.1 Deformación en función del tiempo a lo largo del ciclo térmico para *Eucalyptus nitens*.

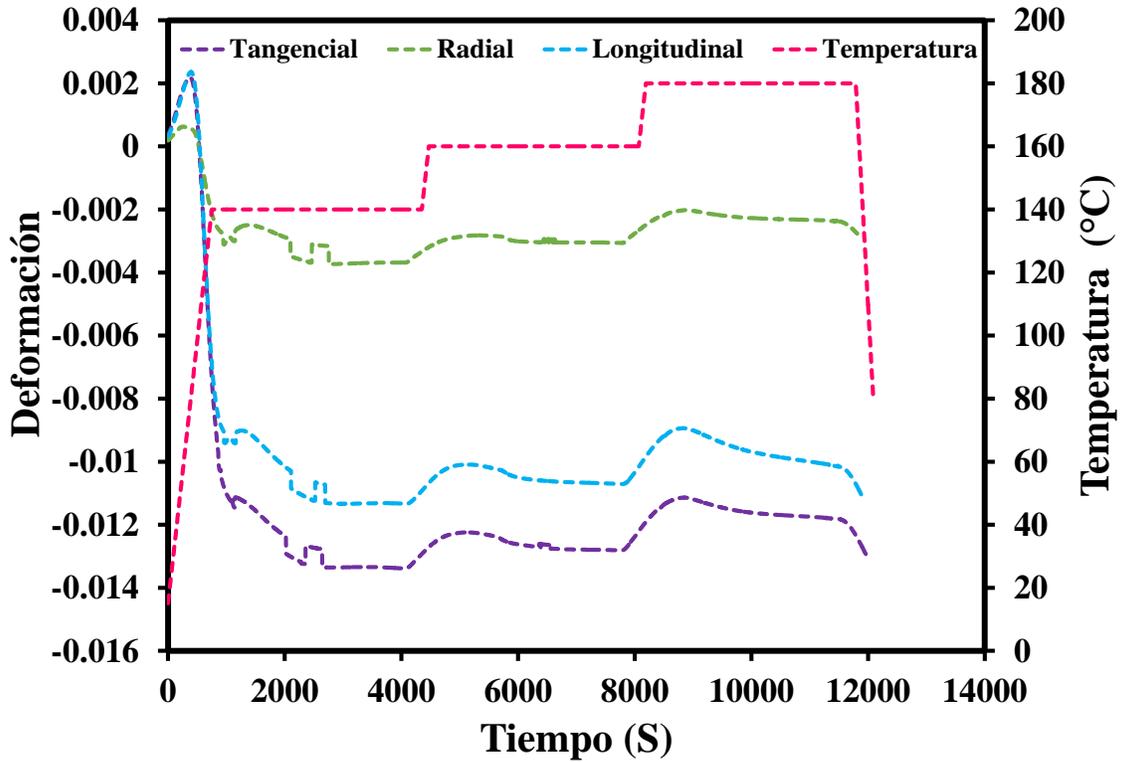


Fig. 6.2 Deformación en función del tiempo a lo largo del ciclo térmico para *Tectona grandis*.

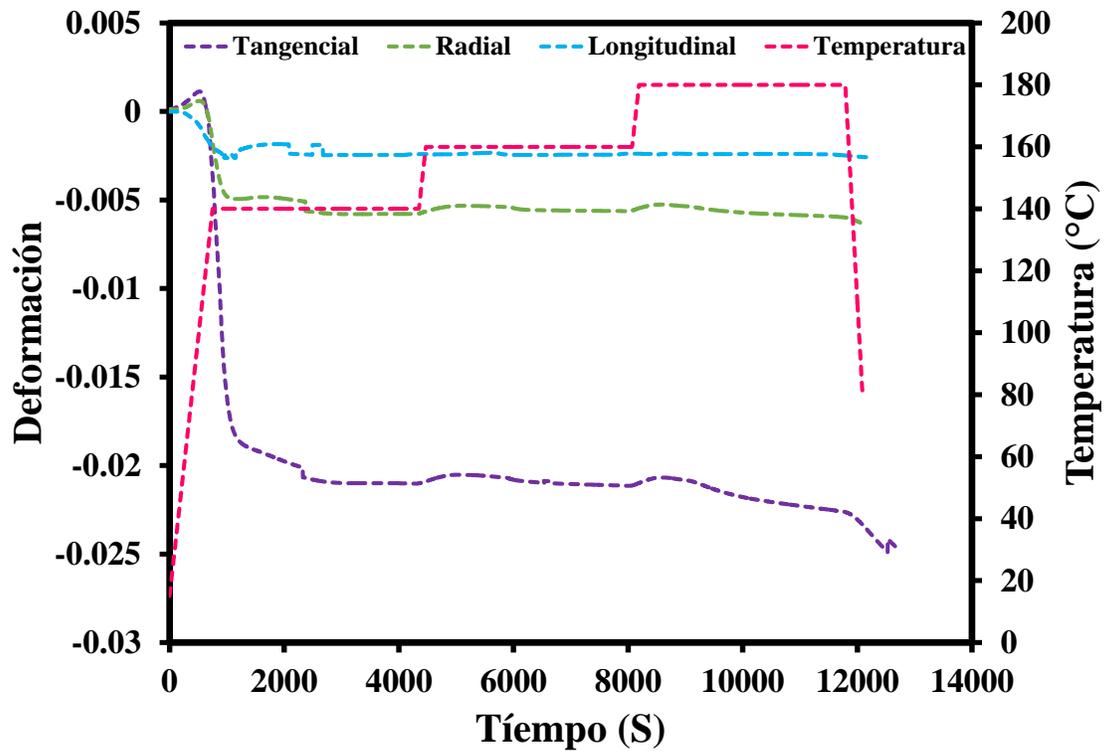


Fig. 6.3 Deformación en función del tiempo a lo largo del ciclo térmico para *Acacia mangium*.

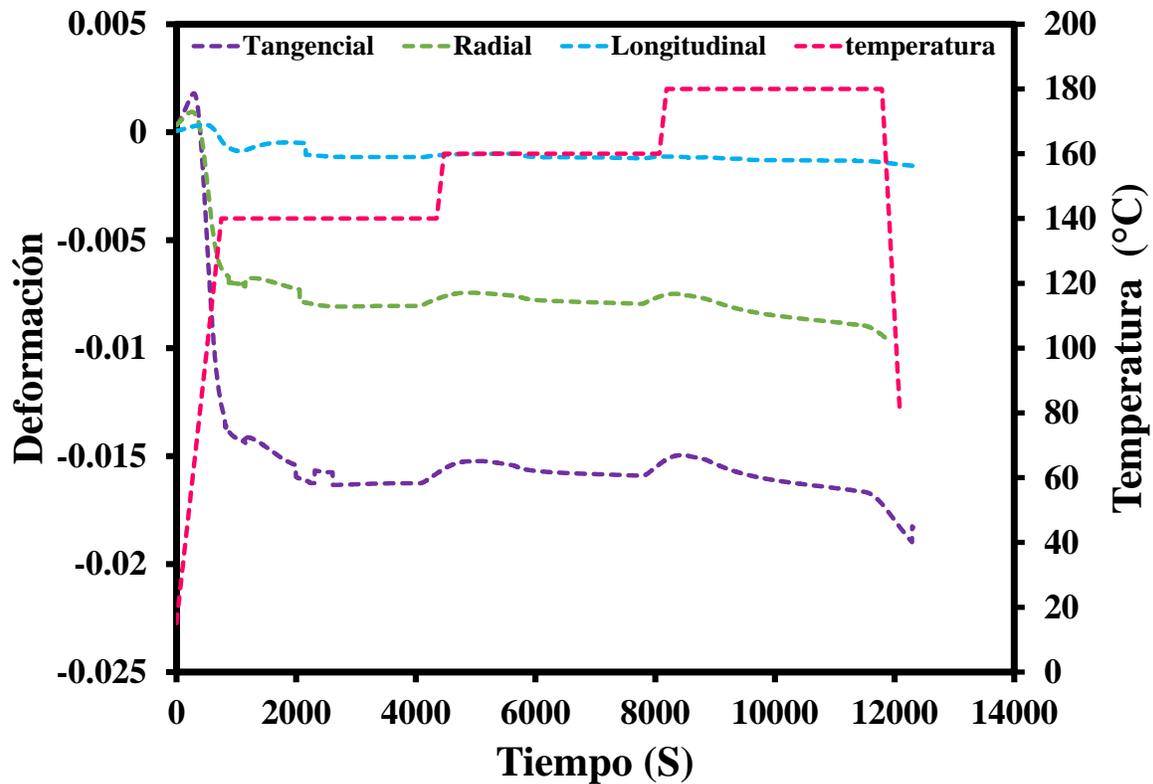


Fig. 6.4 Deformación en función del tiempo a lo largo del ciclo térmico para *Gmelina arborea*.

La fig. 6.5 muestra la comparación de la deformación en función del tiempo para las cuatro maderas en el sentido tangencial. La dirección tangencial fue la que tuvo mayor deformación, se aprecia que al inicio del ciclo térmico hay una dilatación en todas las maderas, la madera de *Gmelina arborea* es la que tiene una mayor dilatación. Posteriormente se observa una fuerte contracción que se asume es por la pérdida de agua en la madera se mantiene estable y al aumentar la temperatura a los 160°C se vuelve a presentar una leve expansión, así como también a los 180°C. Se observa que el *Eucalyptus nitens* es la es el que presenta la mayor deformación, la *Acacia mangium* se deformó 1.7 veces menos, la *Gmelina arborea* 2.4 veces menos y la *Tectona grandis* 2.7 veces menos que el *Eucalyptus nitens*.

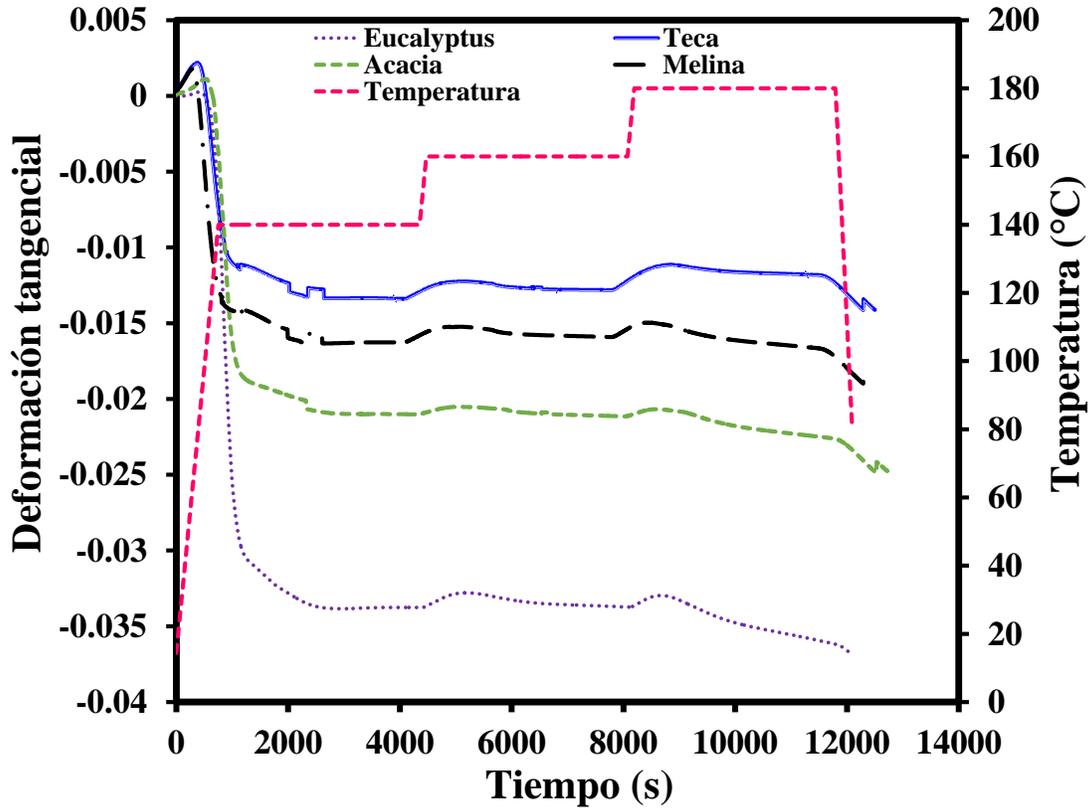


Fig. 6.5 Deformación en función del tiempo a lo largo del ciclo térmico en el sentido tangencial para las cuatro maderas.

Con el fin de evaluar la degradación de la madera, que se asocia con la contracción a 180°C, la tasa de deformación se representa como una función del tiempo durante la contracción que se mide a los 180°C. En la fig.6.6 se puede observar un aumento de la velocidad de deformación al comienzo, hasta que se alcanza un valor máximo, después, se nota una disminución en la velocidad de deformación. Se encontró que la madera de eucalipto es más susceptible al daño en el marco del tratamiento térmico, debido a que la velocidad de deformación es casi 7 veces más alta que la obtenida para la *Tectona grandis*. Los resultados muestran una pérdida de masa característica a 180°C causada principalmente por la degradación térmica de la hemicelulosa (Espinoza y Cloutier, 2009). Las hemicelulosas son menos estables al calor que la celulosa y la lignina (Poncsak *et al*, 2006). La pérdida de hemicelulosas desempeña un papel clave en las propiedades físicas de la madera sometida a altas temperaturas (Aydemir, 2007).

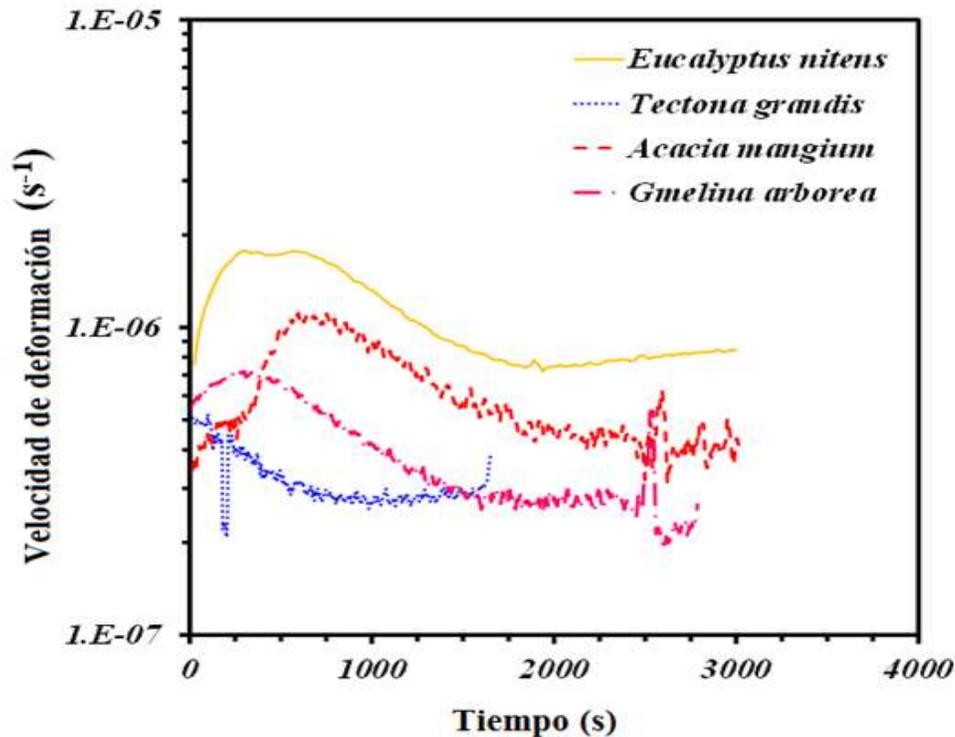


Fig. 6.6 Velocidad de deformación para las 4 maderas.

### Coefficiente de dilatación térmica (CET)

El coeficiente de dilatación térmica en la dirección radial y la dirección tangencial son 5 a 10 veces mayor que en la dirección longitudinal. El coeficiente de expansión térmica para la dirección longitudinal es muy pequeño, para fines prácticos no se toma en cuenta (Simpson y Tenwolden, 1987). El CET se presenta para todas las muestras en ambas direcciones, tangencial (fig. 6.7) y radial (fig. 6.8). Se observó que el CET cambia cuando la dirección de la madera lo hace, y se presentan mayores valores de CET en la dirección tangencial. Se estimó para la madera de *Tectona grandis* que resultó ser 4 veces mayor que el de la madera de *Eucalyptus nitens* en la dirección tangencial. Por otro lado, en la dirección radial de la madera *Gmelina arborea* presenta el valor más alto de CET. Sin embargo, los valores encontrados son relativamente cerca para todas las muestras, excepto para el *Eucalyptus nitens* que presentó el más bajo. Los CET estudiados fueron similares a los valores reportados por (Brown *et al*, 1952). De diferentes maderas  $2.01$  a  $3.08 \text{ E}^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Sin embargo, fueron más bajos que los reportados para los pinos mexicanos  $6.4 \text{ E}^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  (Robles y Echenique, 1983). Esta diferencia podría explicarse por el rápido crecimiento de

las especies estudiadas en este trabajo, donde las células tienen espacios de aire más grandes y las células de las paredes son más delgadas.

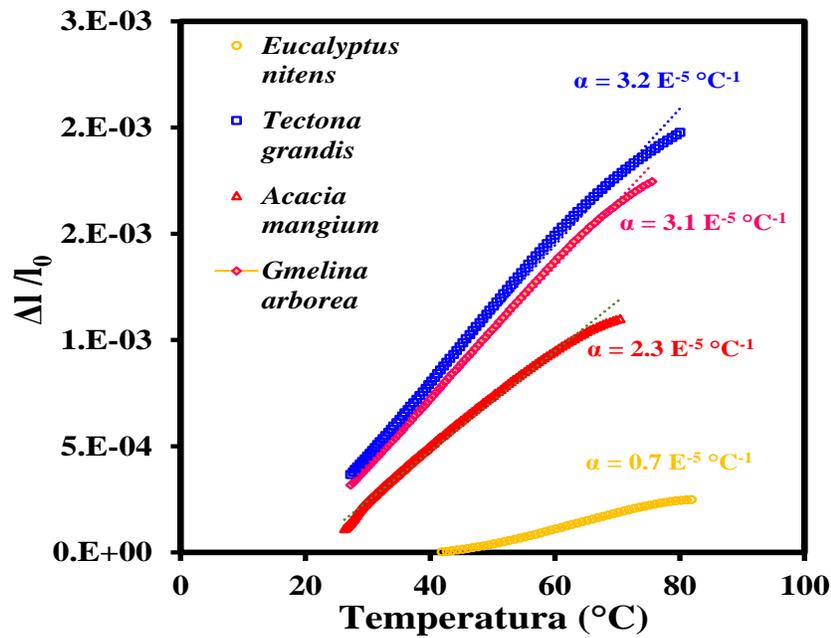


Fig. 6.7 Deformación en función de la temperatura antes de la eliminación de humedad y coeficiente de expansión térmica en el sentido tangencial para las cuatro maderas.

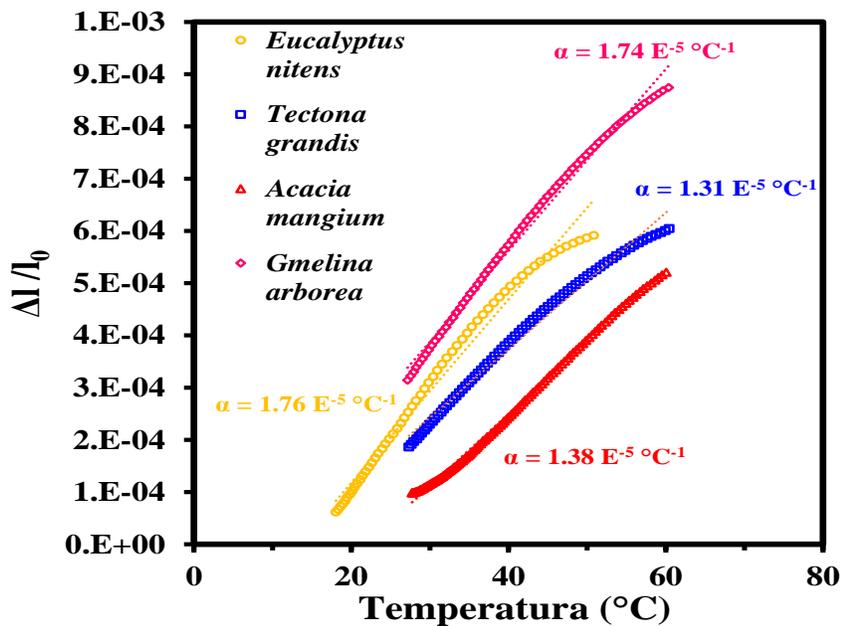


Fig. 6.8 Deformación en función de la temperatura antes de la eliminación de humedad y coeficiente de expansión térmica en el sentido radial para las cuatro maderas.

La tabla 1 presenta los valores de la densidad, antes y después del tratamiento térmico de las cuatro maderas. Se puede observar que la densidad se redujo después del tratamiento térmico, debido a la eliminación de la humedad y la degradación sufrida en cada madera. Además, la tabla 1 incluye los valores del CTE de la madera para las direcciones radial y tangencial de la madera seca, es decir después del tratamiento térmico. Dado que los valores en la dirección longitudinal estaban cerca de cero, fueron excluidos. Para la comparación, también se enumeran los valores de la madera con la humedad. Se encontró que los valores de CTE aumentaron en las muestras secas, que podría estar asociado a que ya no hay contracción generada por la eliminación de la humedad. Se encontró que la anisotropía entre las 3 direcciones concuerda según lo informado por otros autores Kubler *et al*, (1973). Donde el CTE resultó ser aproximadamente dos veces mayor en la dirección tangencial que en la radial, valor que también es relativamente parecido en todas las maderas, sólo con la diferencia que sufrieron las muestras en la contracción durante la eliminación de la humedad.

Tabla 1. Promedio de la densidad, pérdida de masa y coeficiente de dilatación térmica para las 4 maderas.

Especies	$\rho_0$ densidad inicial	$\rho_f$ densidad final	Pérdida de masa	$\alpha_T$ (CET) tangencial	$\alpha_R$ (CET) radial	$\alpha_T$ (CET) humedo	$\alpha_R$ (CET) seco
	g-cm <sup>-3</sup>		%	E <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>			
<i>Eucalyptus nitens</i>	0.605	0.573	5.7	0.7	1.8	3.0	2.2
<i>Tectona grandis</i>	0.697	0.669	7.2	3.2	1.3	4.9	2.9
<i>Acacia mangium</i>	0.427	0.398	11.3	2.3	1.4	4.9	2.2
<i>Gmelina arborea</i>	0.522	0.484	11.9	3.1	1.7	4.8	3.2

## **DEGRADACIÓN TÉRMICA (pérdida de masa)**

La pérdida de masa después del tratamiento térmico se muestra en la tabla 1, la cual es mayor para la madera de *Gmelina arborea* y *Acacia mangium*. El valor es casi el doble que el obtenido para el *Eucalyptus nitens*. Los datos obtenidos son relativamente parecidos a los presentados por algunos autores. Ortega *et al*, (2011), estudió térmicamente la madera de *Hevea brasiliensis* obteniendo valores en la pérdida de masa del 6.0 al 8.9%.

En el tratamiento térmico los cambios en las propiedades de la madera se deben principalmente a la degradación térmica de las hemicelulosas y tienen un efecto más significativo sobre las propiedades físicas de la madera. En el tratamiento térmico, la pérdida de masa depende de la temperatura, el tiempo de exposición y el tamaño de las muestras (Gunduz y Aydemir, 2009).

## **EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS**

### **Ensayos de compresión en las tres direcciones principales de la madera**

En las figuras 6.9, a, b, c y d se presentan las gráficas del esfuerzo en función de la deformación para las cuatro especies de madera sin del tratamiento térmico, en cada una de las direcciones. Se observa que el sentido longitudinal soporta mayor esfuerzo, el cual es de 5 a 6 veces más que las otras dos direcciones, siguiéndolo el sentido radial y por último el sentido tangencial, esta tendencia general se sigue en las cuatro maderas.

## Muestras sin del tratamiento térmico

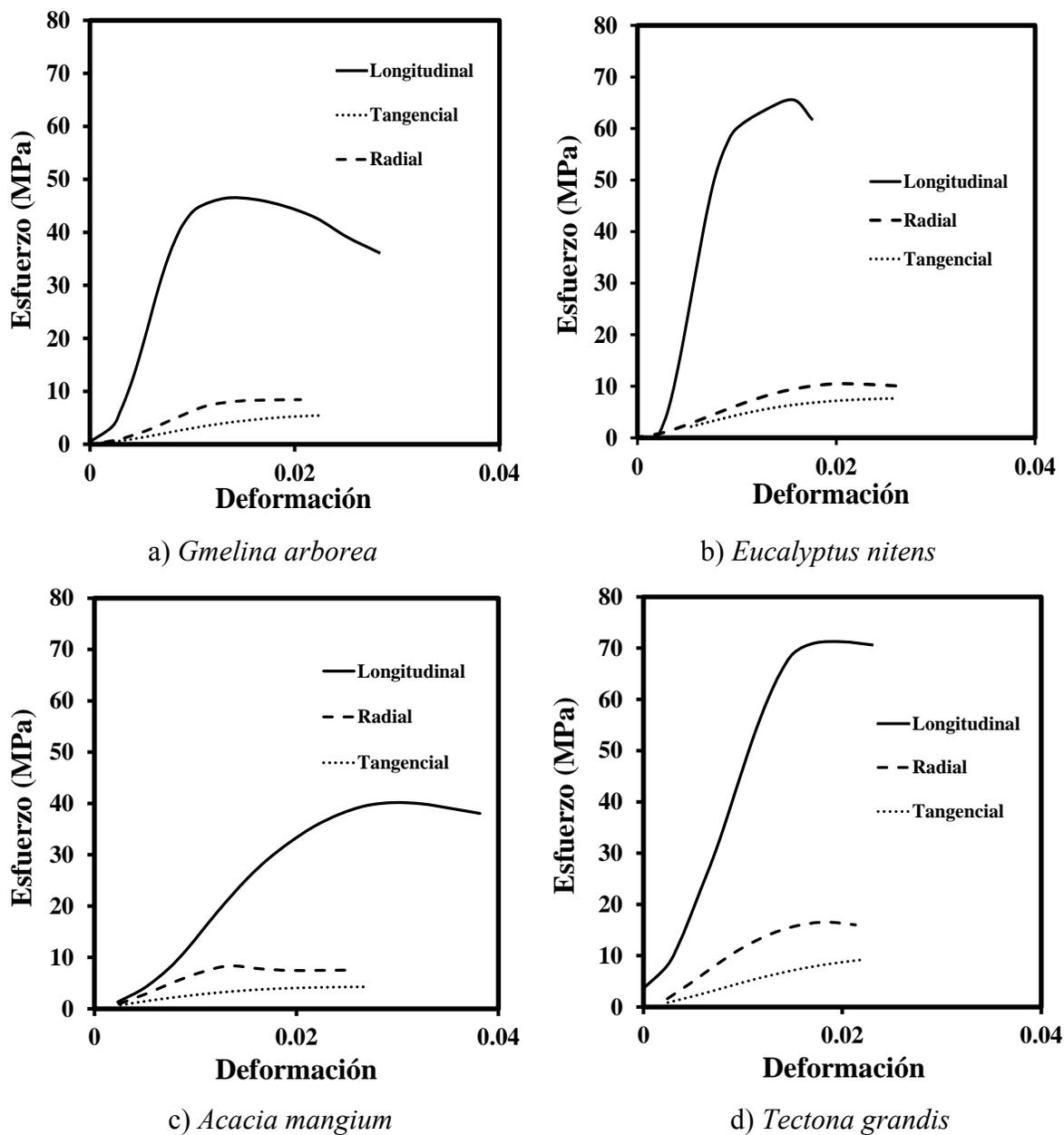
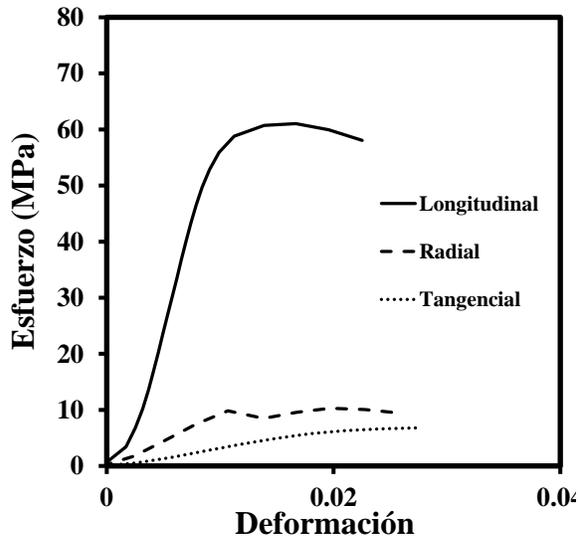


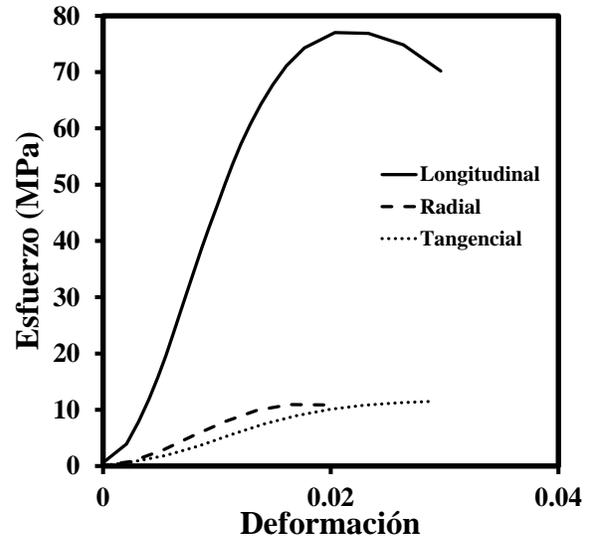
Fig. 6.9 Esfuerzo en función de la deformación para las cuatro especies en las tres direcciones de la madera a) *Gmelina arborea*, b) *Eucalyptus nitens*, c) *Acacia mangium*, d) *Tectona grandis*. Sin tratamiento térmico.

### **Muestras con tratamiento térmico de 140, 160 y 180 °C**

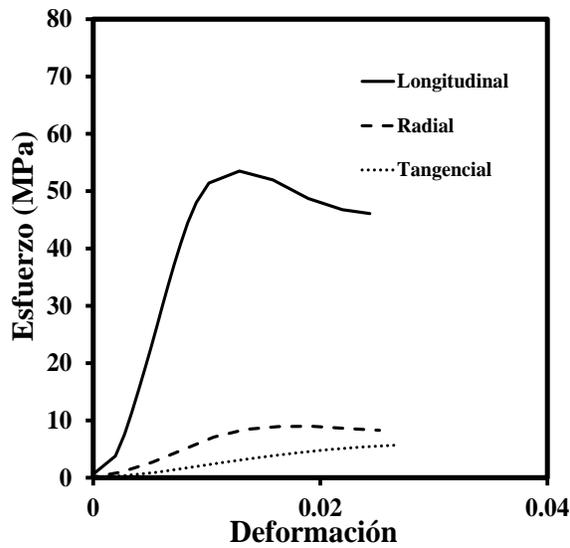
Las figuras 6.10, a, b, c y d muestran la gráfica del esfuerzo en función de la deformación para las cuatro especies en las tres direcciones de la madera con tratamiento térmico. Se encontró el mismo comportamiento que sin tratamiento térmico, es decir, los valores más altos fueron para la dirección longitudinal. Sin embargo, los valores del esfuerzo aumentaron con el tratamiento térmico. De igual manera se encontró una reducción en la deformación, al menos en la dirección longitudinal. Se calculó que en las cuatro maderas el sentido longitudinal es el que sufre una menor deformación y soporta de 4 a 5 veces más que en el sentido radial y tangencial.



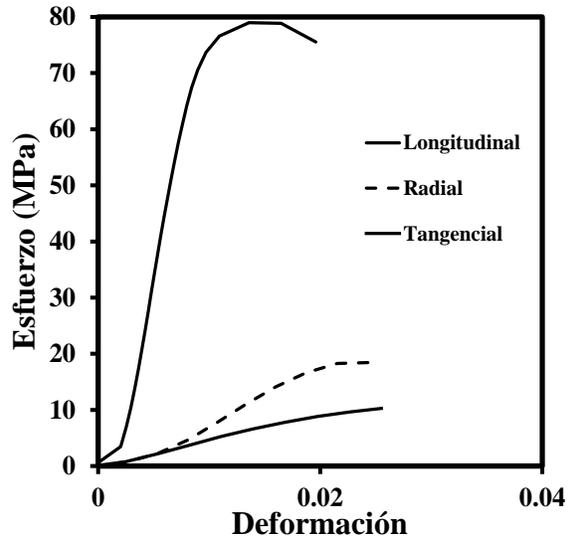
a) *Gmelina arborea*



b) *Eucalyptus nitens*



c) *Acacia mangium*



d) *Tectona grandis*

Fig. 6.10 Esfuerzo en función de la deformación para las cuatro especies en las tres direcciones de la madera a) *Gmelina arborea*, b) *Eucalyptus nitens*, c) *Acacia mangium*, d) *Tectona grandis*. Con tratamiento térmico.

Con el afán de comparar la resistencia de las 4 maderas estudiadas la figura 6.11 muestra el esfuerzo en función de la deformación en el sentido longitudinal para las cuatro maderas sin tratamiento (ST) y con tratamiento (CT). Se omitieron las otras dos direcciones ya que la dirección longitudinal fue la que presentó mayores valores de esfuerzo. Se observa que hay un aumento en el esfuerzo en las maderas con tratamiento térmico, como se mencionó anteriormente. También se aprecia que los valores más altos son para el *Eucalyptus nitens* y *Tectona grandis*, esto se puede atribuir a que son las maderas que presentan mayor densidad, le siguen la *Gmelina arborea* y por último la *Acacia mangium*.

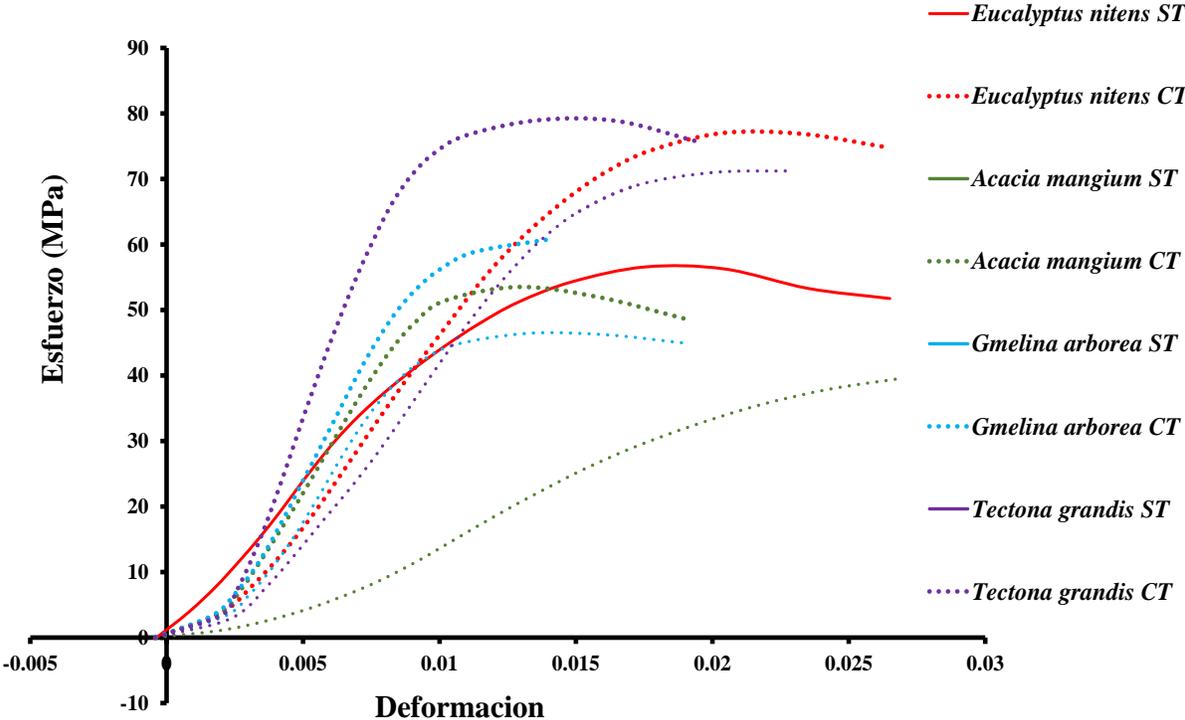


Fig. 6.11 Esfuerzo en función de la deformación para las cuatro maderas en el sentido longitudinal sin el tratamiento térmico (ST) y con el tratamiento térmico (CT).

La figura 6.12 muestra los valores del módulo de Young para probetas con y sin tratamiento térmico para *Eucalyptus nitens*, *Acacia mangium*, *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* en el sentido longitudinal que fue la dirección que presentó valores más altos. Para *Eucalyptus nitens* el valor del módulo de Young sin tratamiento térmico fue de 3.9 GPa, y 4.4 GPa con tratamiento térmico. Para *Acacia mangium* se determinaron valores del módulo de Young de 2.9 GPa sin tratamiento y de 4.7 GPa con tratamiento térmico, los valores se acercan a los obtenidos por Hamami *et al*, (1998) que van de 3.7 a 7.9 GPa para *Acacia mangium* sin tratamiento térmico. Para *Tectona grandis* se determinaron valores del módulo de Young de 4.4 GPa sin tratamiento y 5.7 GPa con tratamiento. Este valor es similar al de *Tectona grandis* reportado por Blanco *et al* (2014) que obtuvieron valores de 6.8 GPa; y a los de Valero *et al*, (2005) que reportaron valores de 4.4 GPa. Para *Gmelina arborea* se obtuvieron valores del módulo de Young de 4.2 GPa sin tratamiento térmico y 5.5 GPa con tratamiento. Estos valores obtenidos fueron menores a los reportados por Saravia, (2009) que obtuvo un valor promedio de 8.4 GPa para *Gmelina arborea* sin tratamiento térmico. Para *Eucalyptus nitens* se encontró un aumento del 12.8% del módulo de Young para madera tratada. Para *Acacia mangium* hubo un aumento en el módulo de Young del 62% debido al tratamiento térmico. Para *Tectona grandis* se encontró un aumento del 29.5% con el tratamiento térmico. Para *Gmelina arborea* se encontró un aumento en el módulo de Young del 30.9% a causa del tratamiento térmico.

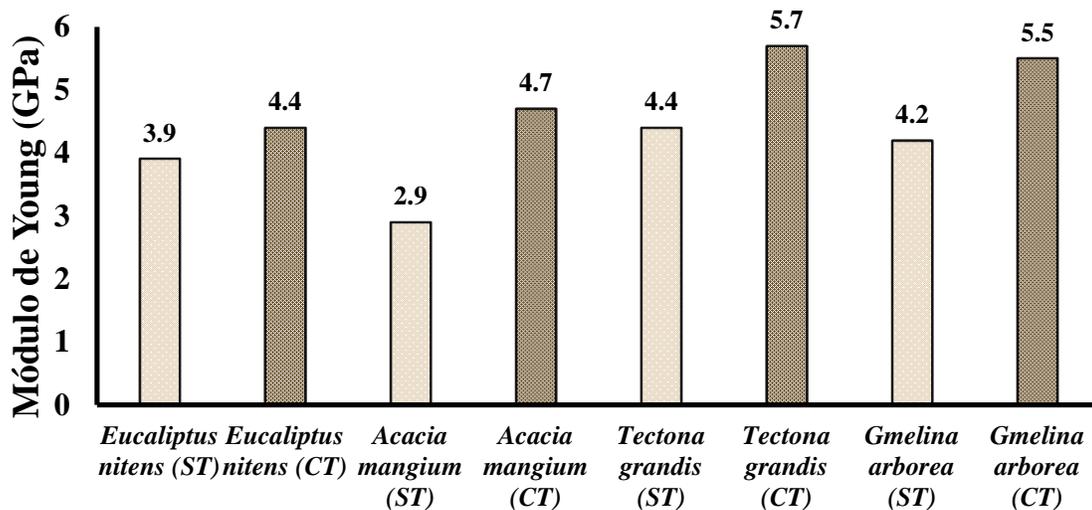


Fig. 6.12 Módulo de Young para *Eucalyptus nitens*, *Acacia mangium*, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, en eje longitudinal, con tratamiento (CT) y sin tratamiento térmico (ST).

La Fig. 6.13 muestra el esfuerzo al límite de proporcionalidad o esfuerzo a la cedencia para *Eucalyptus nitens*, *Acacia mangium*, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, en el sentido longitudinal sin tratamiento (ST) y con tratamiento térmico (CT). Se determinó un aumento considerable en el esfuerzo a la cedencia después del tratamiento térmico para todas las maderas a pesar de la degradación sufrida a alta temperatura por las maderas. La madera de *Tectona grandis* presenta el valor de esfuerzo más alto, le sigue el *Eucalyptus nitens*, posteriormente *Gmelina arborea* y finalmente la *Acacia mangium*. Las cuatro maderas presentaron un aumento en el esfuerzo a la cedencia. En el sentido longitudinal el eucalipto tuvo un aumento del 15.6%, la acacia 27.3%, teca 15.7% y finalmente melina con un aumento del 26.8%.

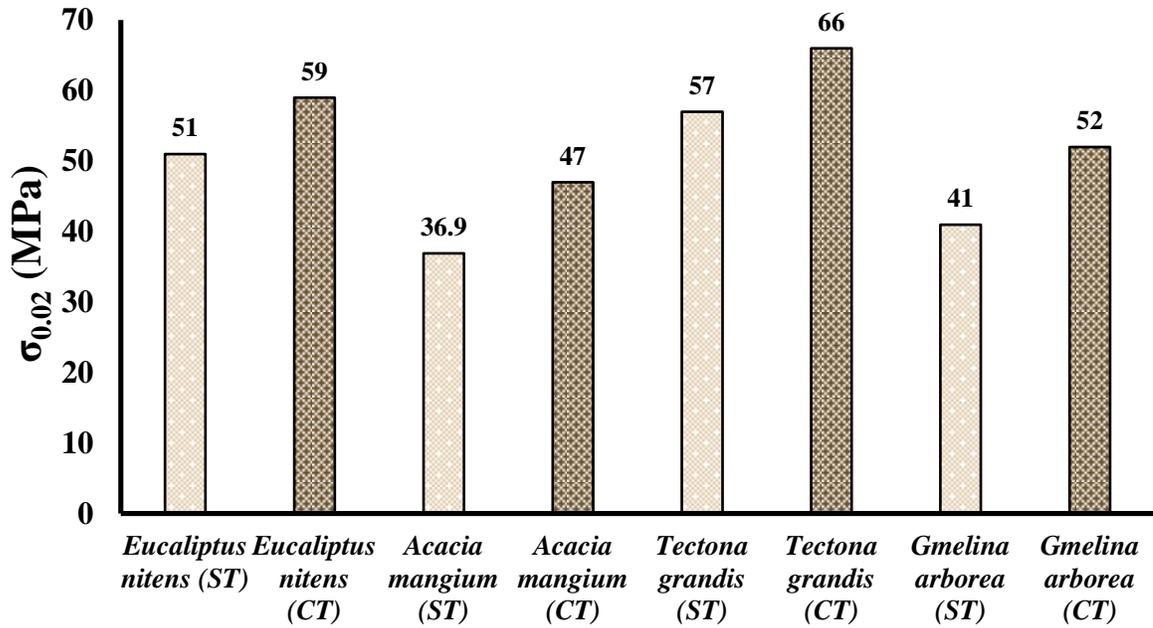


Fig. 6.13 Límite elástico para *Eucalyptus nitens*, *Acacia mangium*, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, en eje longitudinal, con (CT) y sin tratamiento térmico (ST).

La fig. 6.14 muestra el módulo de ruptura para *Eucalyptus nitens*, *Acacia mangium*, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, en el sentido longitudinal, sin tratamiento (ST) y con tratamiento (CT). Se determinó un aumento significativo en el módulo de ruptura para las cuatro especies. La teca fue la que tuvo valores más elevados, posteriormente eucalipto. Las cuatro maderas presentaron un aumento en el módulo de ruptura, eucalipto 11.7%, acacia 25.1%, teca 11.9% y finalmente melina con un aumento del 30.3%.

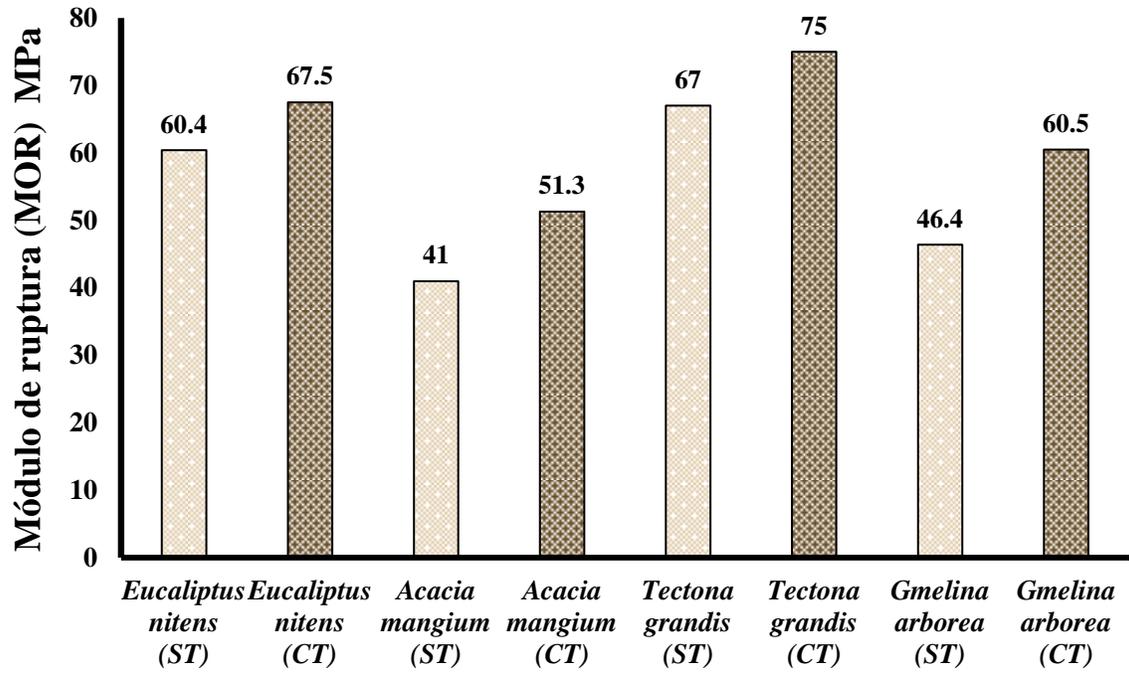


Fig. 6.14 Módulo de ruptura para *Eucaliptus nitens*, *Acacia mangium*, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, en eje longitudinal, con (CT) y sin tratamiento térmico (ST).

Tabla 2. Valores del módulo de Young, Esfuerzo a la cedencia y módulo de ruptura en las tres direcciones de la madera, sin tratamiento, con tratamiento y el incremento o reducción.

<i>Eucalyptus nitens</i>	Módulo de Young			Esfuerzo a la cedencia (ELP)			Módulo de Ruptura (MOR)		
	(ST)	(CT)	(I/R)	(ST)	(CT)	(I/R)	(ST)	(CT)	(I/R)
Dirección	GPa	GPa	%	Mpa	Mpa	%	Mpa	Mpa	%
Longitudinal	3.9	4.4	12.8	51	59	15.6	60.4	67.5	11.7
Radial	0.57	0.52	-8.7	9.9	11	11.1	10.1	11.4	12
Tangencial	0.53	0.54	1.8	8.9	10.9	22.4	11.3	11.8	4.4
<i>Acacia mangium</i>									
Longitudinal	2.9	4.7	62	36.9	47	27.3	41	51.3	25.1
Radial	0.65	0.58	-10	8.4	8.1	-3.5	8.4	8.7	3.5
Tangencial	0.21	0.25	19	4.4	5.4	22.7	4.8	6.3	31.2
<i>Tectona grandis</i>									
Longitudinal	4.4	5.7	29.5	57	66	15.7	67	75	11.9
Radial	0.73	0.81	10.9	13	15.3	17.6	13.3	15.8	18.7
Tangencial	0.47	0.39	-17	9.3	9.1	-2.1	11.5	11.6	0.8
<i>Gmelina arborea</i>									
Longitudinal	4.2	5.5	30.9	41	52	26.8	46.4	60.5	30.3
Radial	0.58	0.86	48.2	8.1	9.5	17.2	9.1	10	9.8
Tangencial	0.29	0.25	-13.7	5.1	5.9	15.6	5.6	6.5	16

(ST)= muestras sin tratamiento (CT)= con tratamiento (I/R)= incremento o reducción.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La expansión térmica presentó una fuerte anisotropía, presentando una mayor expansión térmica en el sentido tangencial, seguido de la radial y muy poca en el sentido longitudinal. El CTE resultó ser aproximadamente dos veces mayor en la dirección tangencial que en la radial.
- Las cuatro maderas presentaron valores muy similares en cuanto a la expansión térmica radial (húmeda) de  $1.3$  a  $1.8 \text{ E}^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Sin embargo, presentaron mayores diferencias en el sentido tangencial ( $0.7$  a  $3.2 \text{ E}^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).
- La mayor pérdida de masa por el tratamiento térmico la presentó la Gmelina arbórea y la Acacia mangium, las maderas con menor densidad
- El tratamiento térmico aumentó la resistencia a la compresión y aumento la resistencia a la deformación de las cuatro maderas estudiadas en este trabajo.
- Adicionalmente, se observó que el tratamiento térmico oscureció a la madera.
- Los valores más altos de resistencia a la compresión se presentaron en la dirección longitudinal. La resistencia radial fue mayor que la tangencial. Por lo que se pudo observar claramente la anisotropía de la madera de acuerdo a las probetas utilizadas.
- Los valores más altos de resistencia a la compresión longitudinal los presentaron las maderas de teca y eucalipto, probablemente al presentar una mayor densidad.
- La madera que más se deformó fue la acacia, probablemente al presentar una menor densidad.
- Se recomienda estudiar maderas nacionales para tener un banco de datos sobre la expansión térmica.
- Se propone realizar ensayos con probetas de tamaños recomendados por algunas normas para ver si hay algún efecto debido al tamaño de las probetas.
- Debido a que las maderas utilizadas son provenientes de plantaciones forestales se recomienda realizar ensayos con maderas de bosques naturales.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- ASM American Society for Metals (2002). Thermal properties of Metals. Thermal Expansion.
- Alvarado, M. (2010). Estudio de la Temperatura de Transformación  $M_s$  y Microestructuras en un Acero Inoxidable Martensítico con 0.12% c Mediante Análisis Térmico. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. 26-27 pp.
- AWC Wood Structural Design Data. The American Wood Council (1992). American Forest and Paper Association Washington D. C. 13-14 pp.
- Aydemir, D. (2007). The Effect of Heat Treatment on Some Physical, Mechanic and Technological Properties of Uludag fir (*Abies bornmülleriana* Mattf.) and hornbeam (*Carpinus betulus* L.). Woods. Master Thesis. Zonguldak Karaelmas University, Bartin, Turkey.
- Blanco, J.; Trugilho, P.; Lima J.; Hein, P.; Moreira, J. (2014). Characterization of Young Wood *Tectona grandis* L. F. Planted in Brazil. *Maderas y Bosques*. 20(1): 18-19 pp.
- Bhat, K. M.; Priya, P. B y Rugmini, P. (2001). Characterisation of juvenile wood in teak. *Wood Science and Technology* 34(6): 517-532 pp.
- Brum, K. M.; Azevedo, P. C.; Rodríguez, S. C. (2003). *Acacia mangium*. Embrapa. Manaus. Brasil. 9-10 pp.
- Brown, C. (2000). Estudio de las perspectivas mundiales de los productos forestales. Dirección de políticas forestales. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 8-9 pp.
- Brown, H. P.; Panshin, A. J y Forsaith, C. (1952). The Physical, Mechanical and Chemical Properties of the Commercial Woods of the United States. *Textbook of Wood Technology*. McGraw-Hill Vol. (2).
- Calliester, D. W. (2007). *Introducción a la Ingeniería de los Materiales*. Editorial Reverté. Barcelona España. 603-604 pp.
- Cacerí. (2016). *Acacia mangium*. Reforestadora Cacerí. Medellín Colombia. [Internet]. Disponible en [www.caceri.com](http://www.caceri.com) [consulta: febrero 21, 2016].

- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2008). Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. [Internet]. Disponible en [http://biblioteca.xoc.mx/docs/consulta/1365\\_35.pdf](http://biblioteca.xoc.mx/docs/consulta/1365_35.pdf). [Consulta: agosto 15, 2016].
- CONAF (Corporación Nacional Forestal). (2011). Plantaciones forestales. Ministerio de agricultura. Chile. [Internet]. Disponible en <http://www.conaf.cl/nuestros-bosques/plantaciones-forestales/> [consulta: febrero 3, 2016].
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2015). [Internet]. Disponible en <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/plantaciones-forestales/> [consulta: julio 25, 2016].
- Coronel, E.O. (1994). Fundamentos de las Propiedades Físicas y Mecánicas de las Maderas. Aspectos Teóricos y Prácticos para la Determinación de las Propiedades y sus Aplicaciones. Instituto de Tecnología de la Madera. Editorial El Liberal Santiago del Estero Argentina.
- Chaves, E y Fonseca, E. (1991). *Tectona grandis* L. F. Especies de Árbol de Uso Múltiple en América. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica. 4-8 pp.
- Kretschmann, D.E. (2010). Mechanical Properties of Wood In: Wood Handbook wood As An Engineering Material U. S. Department of Agriculture. (5) 101p.
- Downs, G. (2003). Estudio Tecnológico de la Madera de *Gmelina arborea* Roxb, Proveniente de Plantaciones Jóvenes del Estado de Campeche Tesis. UACH. División de Ciencias Forestales. 59-60 pp.
- De Santis, A. J. (2015). Análisis de Fallos en Sistemas Aeronáuticos. PARANINFO. España. 76 p.
- Espinoza, H. R, y Cloutier, A. (2009). Thermal Degradation and Thermal Conductivity of Gypsum-Cement Particleboard, Wood Fiber Sci. 41(1): 13-21 pp.
- Flández, G. J. (2006). Efecto de Ayudantes en el Pulpaje Kraft Basado en Antraquinonas y Surfactantes sobre Pulpa de *Ecucalyptus nitens*. Tesis Profesional. Universidad Austral de Chile. 3-4 pp.
- Fitzgerald, H. R.; Herbert, K.; Malkani, L. (2004). Ortopedia I. Panamericana. Argentina. (1) 146-147 pp.

- Forest Products Management Development Institute. (1998). *The Nature of Wood and Wood Products*. University of Minnesota.
- Glass, V. S y Zelinka, L. S. (2010). Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In: *Handbook Wood as an Engineering Material*. United States Department Agriculture (4) 93-94 pp.
- Garibay, García, G.A.; Casimiro, Cenobio, J.C., Sosa, Villanueva. H y Espinoza, Herrera. R. (2014). *La Madera de Eucalyptus nitens* Procedente de Plantaciones Comerciales. Memorias. Primer Simposio Internacional Día del Forestal. 28 de noviembre. 36-37 pp.
- Geilfus, F. (1994). *Manual de Agroforesteria para del Desarrollo Rural*. Edna. CATIE. Costa Rica. (2) 401-402 pp.
- Grigoriev. (1985). *Estudio para Materiales para Ebanista y Carpinteros*. Editorial MIR MOSCU-URSS. Rusia.
- Gonzales, G y Serrano, M. R. (2004). Propiedades y Utilizaciones de la Madera de (*Gmelina arborea Robx*) melina Procedente de Árboles Plantados en Costa Rica. *Revista Forestal Kurú*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. (1) 1-2 pp.
- Gunduz, G y Aydemir, D. (2009). The Influence of Mass Los son the Mechanical Properties of Heat-Treated Black Pine Wood. *Department of Forest Industrial Engineering, Turkey*. 54(4): 33-34 pp.
- Hamami, M.; Ashaari, Z., Razali, A.; Abdul, L. M. (1998). Physical Properties of *Acacia mangium* and *Acacia auriculiformis* From Different Provenance. *University Putra Malaysia*. 21(2): 78-79 pp.
- Keogh, R. M. (2009). Future of teak and the High-grade Tropical Hardwood Sector: Planted Forests and Trees Working Paper, Food and Agriculture Organization of the United Nations. [Internet]. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/012/k6549e/k6549e00.pdf> [consulta agosto 3, 2016].
- Kuklík, P. (2008). Wood properties In: *Handbook Timber Structure*. Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structure. TEMTIS. (1) 15-16 pp.
- Kubler, H., Liang, L.; Chang, L. S. (1973). Thermal Expansion of Moist Wood, *Wood and Fiber* 5 (3) 257-267 pp.

- Kollman, F. F. y Cote, Jr. W. A. (1968). Principles of wood Science and Technology. I Solid Wood. New York- Berlin.
- Krisnawati, H.; Kallio, M.; Kanninen, M. (2001). *Acacia mangium* Willd. Ecology, Silviculture and Productivity. CIFOR. Indonesia. 6-7 pp.
- Moura, E. P.; Rego, B. R.; Munaiar, J. C.; Calil, C. (2007). La Degradación Térmica de Vigas de *Eucalyptus*. *Revista Madera Ciencia y Tecnología*. 9(2): 135-144 pp.
- Muñoz, M. (1988). Propiedades y Usos de las Maderas de jaul y melina. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 13-15 pp.
- Martínez, P y Azuaga, M. (1997). Mediciones del Módulo de Elasticidad de Young. Laboratorio IV. Departamento de Física UBA. 2-4 pp.
- Ortega, E. F. (1989). Estructuras Biológicas de la Madera. Manual para el Diseño de Estructuras de Madera. Instituto de Ecología. A. C. Laboratorio o de Ciencia y Tecnología de la Madera Xalapa, Ver. 27-28 pp.
- Ortega, A. (2011). Modificación Térmica y Evaluación de las Propiedades Mecánicas y Resistencia Biológica de la madera de *Hevea brasiliensis*. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. 38-39 pp.
- Poncsak, S.; Kocaefe, D.; Bouazara, M.; Pichette, A. (2006). Effect of High Temperature Treatment on The Mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*) wood. *Wood Science and Technology* 40(8).
- Panshin, A y De Zeeuw, C. 1980. Textbook of wood technology. McGraw-Hill Book Company. 722p.
- Pérez, V. (1983). Manual de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera. Santiago, Chile. Corporación Nacional Forestal. 451 p.
- Rowell, R. M. (1991). Chemical Modification of Wood in: *Wood and cellulosic chemistry*. New York. (15) 703-704 pp.
- Rojas, R. F y Murillo, G. O. (2004). Botánica y Ecología. Manual para Productores de melina (*Gmelina arborea Robx*). 4-12 pp.
- Robles, F. V. y Echenique, M. R. (1983). Estructuras de Madera. LIMUSA. México D.F 367-368 pp.

- Roussy, L.; Keil, G.; Iaconis, A.; Abedini. (2013). Propiedades Tecnológicas de las Madera de *Citharexylum montevidense* (Spreng). Revista de Ciencia Forestal Quebracho 21(1, 2): 59-60 pp.
- Saravia, J. M. (2009). Estudio de las Propiedades de la Madera del Primer Raleo de Teca, Gmelina, Ciprés y Palo Blanco, Para Determinar su Potencial Industrial. CONCYT, SENACYT, Guatemala. 201-203 pp.
- Silva, G. J.A.; Fuentes, T. F.J.; Rodríguez A. R.; Torres, A. P.A.; Lomelí, R. M.G.; Ramos Q.J.; Waitkus, C.; Richter, H.G. (2010). Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e Importadas. Universidad de Guadalajara. 207 pp.
- Simpson, W. (1996) Method to Estimate Dry-kiln Schedules and Species Groupings: Tropical and Temperate Hardwoods Res. Pap. FPL-RP-548. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 57 pp.
- Simpson, W. (1991). Method to Estimate Dry-Kiln Schedules and Temperate Hardwoods Res. Pap. FPL-RP-548. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 57-58 pp.
- Simpson, W. y Tenwolden, A. (1987). A Physical Properties and Relations of Wood In: The Encyclopedia of Wood U. S. Department of Agriculture. (3) 15-21 pp.
- Tsai, S, W y Miravete de Marco, A. (1988). Diseño y Análisis de Materiales Compuestos. REVERTÉ. Barcelona España. 21-28 pp.
- Ugalde, A. L. (1997). Resultado de 10 años de Investigación de Silvicultura del Proyecto Madeleña en Panamá. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Costa Rica. 33-35 pp.
- Vignote, P. S y Jimenez, P. F. (2000). Tecnología de la Madera. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 109-121 pp.
- Valero, S. W.; Reyes, E.; Garay, D. (2005). Estudio de las Propiedades Físico-Mecánicas de las Especies de *Tectona grandis*, de 20 años de Edad, Provenientes de las Plantaciones de la Unidad Experimental de la Reserva Forestal Ticoporo, Estado Barinas. Forestal Venezolana. (49)1 70-71 pp.

Winandy, J. E. (1994). Wood properties. Encyclopedia of Agricultural Science. Orlando, FL: Academic Press, (4) 555-556 pp.