

**ANÁLISIS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA
MADERA TECA (TECTONA GRANDIS)**



AUTORES:

JULIO ANDRÉS CASTRO BLANCO

MARÍA JOSÉ PATERNINA REYES

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA – CÓRDOBA

2020

**ANÁLISIS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA
MADERA TECA (TECTONA GRANDIS)**

AUTORES:

JULIO ANDRÉS CASTRO BLANCO

MARÍA JOSÉ PATERNINA REYES

**Trabajo de grado presentado en la modalidad de monografía como parte de
los requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico**

DIRECTOR:

Ing. LUIS ARMANDO ESPITIA SANJUÁN, PhD

ÁREA:

MATERIALES Y PROCESOS DE MANUFACTURA

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA – CÓRDOBA

2020

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS.

Antes que nada, queremos agradecerle a Dios por permitirnos sonreír antes todos nuestros logros que son el resultado de tu apoyo, siempre que caemos y estamos a prueba, permites que aprendamos de nuestros errores y que hace parte de nuestra forma de aprender a ser mejores seres humanos.

A nuestras familias y seres queridos por ser el pilar de apoyo en todos nuestros proyectos, no podríamos sentirnos más agradecidos con ellos por la confianza que han depositado en nuestras manos desde el momento que llegamos a este mundo.

También a nuestros mentores, maestros, y personas que colaboraron con esta noble causa, queremos que sepan que este logro es en gran parte gracias a ustedes, por haber surcado esta labor titánica e interminable como lo es nuestra educación.

TABLA DE CONTENIDO

1. LISTA DE FIGURAS.....	8
2. LISTA DE TABLAS.....	9
3. RESUMEN	10
4. INTRODUCCIÓN.....	11
5. OBJETIVO GENERAL.....	13
6. TECTONA GRANDIS	14
7. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS	18
7.1 Densidad.....	18
7.2 Contenido de humedad.....	21
7.3 Contracción e hinchamiento de la madera.....	24
7.4 Dureza	27
7.5 Flexión estática	30
7.6 Compresión	35
7.7 Cizalladura o cortante	39
7.8 Tensión.....	42
8. REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10 Y TECTONA GRANDIS (TECA).....	43

9. CONCLUSIONES.....	48
10. BIBLIOGRAFÍA	49

1. LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la distribución natural de la <i>Tectona grandis</i>	14
Figura 2. Árbol de Teca (<i>Tectona Grandis</i>)	15
Figura 3. Albura y duramen de la madera <i>Tectona Grandis</i> tomado de (Rivero Moreno & Moya Roque, 2006).....	16
Figura 4. Método Dureza Janka. (Fuente propia).....	28
Figura 5. Flexión estática (Fuente propia).....	30
Figura 6. Ensayo de flexión estática. Tomado de (Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008)	31
Figura 7. MOE en función de la edad de la madera. (Fuente propia).....	33
Figura 8. MOR en función de la edad de la madera (Fuente propia).....	34
Figura 9. Ilustración del ensayo a compresión en función de la orientación de las fibras A). Ensayo de Compresión paralela a las fibras, B). Ensayo de compresión perpendicular a la fibra. Tomado de (Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008).....	36
Figura 10. Probeta para ensayo de cizallamiento según la norma ASTM D-143. Tomado de (Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008).	40
Figura 11. Gráfico EMV en función de la edad del árbol (Fuente propia).....	41
Figura 12. temario de la norma sismo resistente Reglamento NSR-10.....	44

2. LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de densidad encontrados en la literatura.	19
Tabla 2. Contenidos de humedad encontrados en la literatura.	23
Tabla 3. Valores de contracción de la madera Teca de diferentes regiones del mundo. ...	25
Tabla 4. Valores de referencia para contracciones volumétricas.....	26
Tabla 5. Valores de dureza reportados para la madera Teca de diferentes regiones del mundo.	29
Tabla 6. Valores MOE y MOR reportados en la literatura.	32
Tabla 7. Valores de ELP y ECM medidos de forma paralela a la fibra.....	36
Tabla 8. Valores de ELP medidos de forma perpendicular a la fibra.	37
Tabla 9. Valores de EMV reportados en la literatura sobre la madera Teca.....	40
Tabla 10. Esfuerzos permisibles o mínimos aceptados para la TECTONA GRANDIS (TECA) De acuerdo con la norma NSR – 10 para el tipo de madera “ES6” con un contenido de humedad CH:12% junto con los datos encontrados en la literatura.....	45

3. RESUMEN

En la presente monografía se comparan y analizan las propiedades físicas y mecánicas de la madera Teca (*Tectona Grandis*), reportados en diferentes lugares del mundo, con el objetivo de visualizar como el lugar de procedencia en función de la edad, el contenido de humedad, la orientación de la fibra entre otros factores, pueden afectar estas propiedades. Igualmente, se verificó si los valores reportados para esta madera cumplen con los requerimientos mínimos de calidad exigidos en la (Asociación colombiana de ingeniería sísmica, 1997).

4. INTRODUCCIÓN

La madera fue uno de los primeros materiales utilizados por el ser humano para la creación de herramientas, armas y lugares de vivienda debido a su facilidad de procesamiento, resistencia mecánica, apariencia entre otros factores. Aunque la madera como recurso tiene una posición significativa en el mercado frente a otros materiales utilizados en ingeniería, es evidente el bajo conocimiento a nivel local sobre las propiedades mecánicas de este material. Puesto que la madera es un material natural y anisotrópico, sus propiedades físicas y mecánicas dependen mucho de las características que tiene el suelo donde está siendo sembrada, de la dirección de las fibras, la edad de cosecha entre otros factores. Existen muchos tipos de madera en el mundo utilizados en el mercado de la construcción civil, dentro de la gran variedad de especies que existen de este producto se puede destacar la teca (*Tectona Grandis*), la cual está siendo altamente plantada en nuestro territorio debido a su facilidad de adaptación a los diferentes climas del país y a su rápida maduración. Colombia tiene un gran potencial agrícola, pecuario y forestal, constituido por 4.618.644 hectáreas utilizadas para la siembra de los cuales solo 827.582 hectáreas se utilizan para las plantaciones forestales, esto significa que el 17 % se utiliza para siembra y cosecha de la madera. Es por esta razón, que este estudio evaluará la información disponible respecto a la madera *Tectona Grandis* conocida como Teca centrándose en sus propiedades físicas y mecánicas. Esta especie es conocida a lo largo de todo el mundo por su desempeño en construcción y en otras áreas de interés. En este análisis, se recopiló y analizó información sobre propiedades físicas y mecánicas de la madera Teca proveniente de varias partes del mundo. Adicionalmente, con los valores de propiedades mecánicas reportados se evaluó si esta madera cumple con los requerimientos establecidos en la (Asociación colombiana de ingeniería sísmica, 1997).

Con este trabajo referente a la madera, se pretende dar inicio a una base de datos que sirva de guía para el conocimiento de este material que no solo ayude a la futura generación que quieran ahondar en el campo de madera sino también a aquellos que la quieran utilizar en el sector de la construcción.

También se quiere verificar si estas maderas encontradas en la literatura pueden ser utilizadas en el sector de la construcción, como materiales estructurales, al igual que si pueden ser aprovechadas por otros oficios como carpintería, artesanía e incluso para la comunidad académica.

5. OBJETIVO GENERAL

Analizar las propiedades físicas y mecánicas de la madera Teca (*Tectona Grandis*) cultivada en diferentes lugares del mundo usando los resultados publicados en la literatura para aumentar el conocimiento sobre esta madera y verificar si los valores reportados en la literatura cumplen con los requerimientos establecidos en la (Asociación colombiana de ingeniería sísmica, 1997).

6. TECTONA GRANDIS

La Teca – “*Tectona Grandis*”, es un árbol frondoso de la familia de las Verbenáceas¹ originario del sur de Asia, específicamente de la península de la India y Birmania, de ahí que también es conocido como Teca de Birmania. (Chaves & Fonseca, 1991). En América Latina también se encuentran abundantes cultivos de Teca, así como en África y otras regiones de Asia que juntos alcanzan una extensión aproximada de 5 millones de hectáreas (Morales, 2013). La **Figura 1** muestra la procedencia originaria de este árbol.

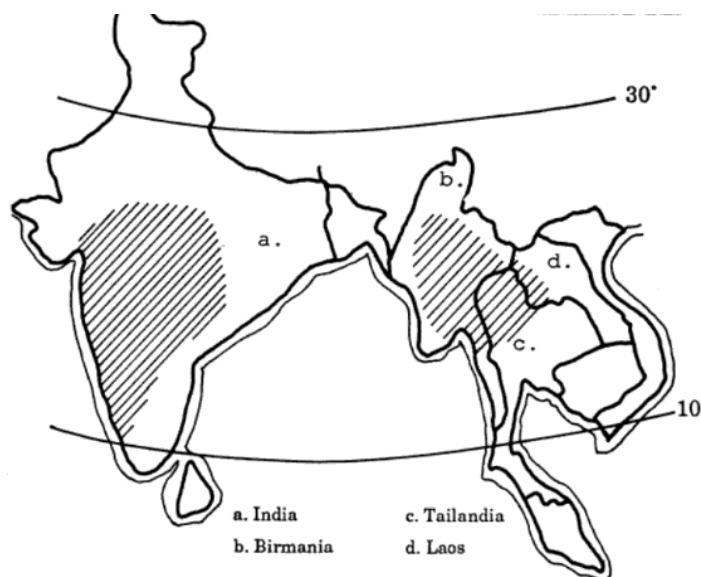


Figura 1. Esquema de la distribución natural de la *Tectona grandis*.

Fuente: (Chaves & Fonseca, 1991).

Esta especie mostrada en la **Figura 2**, es un árbol caducifolio² que puede alcanzar hasta 60 m de altura, con copa globosa de hojas grandes, ovales y con envés cubierto de pelos que pueden medir entre 110 y 850 mm de largo y de 60 a 500 mm de ancho. La teca logra

¹ Verbenaceae o verbenáceas es una amplia familia de plantas, principalmente tropicales, de árboles, arbustos y hierbas.

² Que pierde sus hojas cada año.

su máximo desarrollo y tamaño en los climas tropicales cálidos y húmedos, donde las precipitaciones oscilan entre 1270 y 3800 mm/año (Lexis/22 vox, 1980). Sin embargo, esta especie necesita una estación seca y bien definida de 3 a 7 meses, con precipitaciones promedio anuales de 800 a 5000 mm y temperaturas que oscilen entre 21 - 28 °C (Castro & Raigosa, 2000).



Figura 2. *Árbol de Teca (Tectona Grandis)*

Tomado de: (MADERERO, 2018).

La teca (*Tectona Grandis*) tiene una gran adaptabilidad de suelos, bien sea fértiles, drenados y profundos. Para un crecimiento óptimo, esta especie prefiere los suelos de textura arcillosos con pH neutro o ácido y/o franco-arenosos (Chaves & Fonseca, 1991), sin embargo, otros autores afirman que en suelos arcillosos las plantaciones no se desarrollan de manera adecuada (Chaves & Fonseca, 1991), como también, que en

suelos pesados o arcillosos sin drenaje no presenta un buen desarrollo (Castro & Raigosa, 2000) La **Figura 3** muestra la albura y el duramen del árbol Teca.



Figura 3. Albura y duramen de la madera *Tectona Grandis* tomado de (Rivero Moreno & Moya Roque, 2006).

En la **Figura 3** puede observar que la albura es amarillenta blancuzca y el duramen verde oliva que al cortarse se torna café oscuro. La madera cosechada de este árbol es moderadamente dura, pesada y presenta anillos de crecimiento con brillo natural de moderado a bajo y sus superficies pueden dar un aspecto aceitoso por los mismos componentes naturales que la conforman (Chaves & Fonseca, 1991). El grano suele ser recto, aunque por cuestiones morfológicas puede tornarse ondulado o entrelazado. (teak, the wood Database - Lumber Identification (hardwood), 2017).

La madera Teca es apreciada para diversos usos por ser dura, fina, de buen acabado, fácil de trabajar y por su alta resistencia a la descomposición gracias a un aceite antiséptico que la protege del ataque de diversos organismos, por esta razón, es considerada por los expertos como el estándar de oro para la resistencia a la

descomposición (teak, the wood Database - Lumber Identification (hardwood), 2017). Adicionalmente, es la única madera que no causa herrumbre o corrosión cuando está en contacto con metales; por lo cual, es muy usada en la industria de construcción naval y civil, en la fabricación de tanques y toneles, y en otros elementos que requieran alta resistencia a los ácidos. (Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008). Estas características hacen de la Teca una de las maderas más valiosas del mundo.

Por otro lado, la adecuada selección de un material para una aplicación en específico involucra entre otras cosas el conocimiento de sus propiedades ya que estas pueden verse influidas según el sitio de desarrollo del árbol por los factores edafoclimático³ (de Almeida, de Almeida, Christoforo, Lima, & Lahr, 2018). En todo el mundo, existen diversas normas que regulan los ensayos destinados a medir dichas propiedades. La madera no es un material ajeno a estas regulaciones, por tanto, existe un gran número de normas nacionales e internacionales que establecen los requisitos y parámetros de calidad que debe cumplir la madera para poder ser utilizada en estructuras y construcciones. A continuación, se presenta un análisis sobre algunas propiedades físicas y mecánicas de la madera Teca. Posteriormente, con esos datos tomados de la literatura se verifica si la madera Teca cumple los requisitos mínimos de diseño para edificaciones con elementos contruidos en madera establecidos en la “Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NRS-10; Título G- Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua”, (Asociacion colombiana de ingeniería sismica, 1997).

³ Relativo al suelo y al clima.

7. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

7.1 Densidad

La densidad es una magnitud escalar que define para un material la cantidad de masa que existe en un determinado volumen. Para el caso de la madera, la densidad se puede medir en tres estados o momentos diferentes de la madera los cuales son: densidad verde, densidad seca o básica y densidad anhidra. La densidad verde se mide en especímenes recién cortados o en aquellos con un contenido de humedad (CH) alto ($CH > 30\%$). La densidad seca o básica es la más utilizada por los expertos y se mide en muestras con un contenido de humedad del 12% ($CH \approx 12\%$). Este valor de humedad se consigue secando las muestras en un horno o al aire libre. La densidad anhidra se mide en muestras con contenidos de humedad menor al 8 % ($CH < 8\%$). Estas mediciones se realizan después de procesos de secamiento en hornos y en ambientes controlados debido a que por la higroscopía que presenta la madera las muestras tienden a ganar humedad con el paso del tiempo. La densidad depende de la composición celular y de la forma como se distribuyen los elementos anatómicos constitutivos de la madera (Santos Souza, 2019), incluso se puede evidenciar variaciones en densidad en maderas de la misma especie. La densidad es una propiedad muy relevante al momento de escoger el tipo de madera a utilizar debido a que ella determinará la dureza de la madera, siendo esta propiedad un factor importante en la resistencia (R, 2017). La **Tabla 1** relaciona valores de densidad verde, básica y anhidra para la madera Teca en función de la edad y la región de procedencia.

Tabla 1. Valores de densidad encontrados en la literatura.

Región de Procedencia	Edad Años	Densidad Verde (g/cm³)	Densidad Anhidra (g/cm³)	Densidad Seca o Básica (g/cm³)	Autor
Cochabamba, Bolivia	8	---	0,54	0,58	(Rivero Moreno & Moya Roque, 2006)
Campeche, México	9	---	---	0,55	(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzmán, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Michoacán, México	11	0,87	0,62	0,69	(Telles Antonio, y otros, 2017)
Brasil	13	---	---	0,53	(Blanco-Flórez, Fernando-Trugilho, Tarcisio-Lima, Gherardi-Hein, & Moreira da Silva, 2014)
Tanzania	14	---	---	0,5	(Zahabu, Raphael, Omari Chamshama, Iddi, & Malimbwi, 2015)
Alta Floresta, Brasil	14	---	---	0,49	(Santos Souza, 2019)
Livramento, Brasil	14	---	---	0,51	
Cáceres, Brasil	14	---	---	0,54	
Campeche, México	15	---	---	0,62	(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzman, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Tabasco, México	15	---	---	0,66	
Balzar, Ecuador	18	0,99	0,55	---	(Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008)
Barinas, Venezuela	20	---	---	0,63	(Valero, Reyes C., & Garay J., 2005)
Chiapas, México	21	---	---	0,6	(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzman, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Nilambur, India	21	---	---	0,68	(Bhat & Priya, 2004)
North Kanara, India	21	---	---	0,66	
Quevedo, Ecuador	22	0,98	0,52	---	(Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008)
Konni, India	65	---	---	0,62	(Bhat & Priya, 2004)
East Timor	50 a 70	---	---	0,6	(Miranda, Sousa, & Pereira, 2011)

Se puede observar en **Tabla 1** que esta propiedad está ligada estrictamente a la edad de corte del árbol. Los valores de densidad son cercanos entre sí para edades comprendidas entre 11 y 20 años. Para rangos menores a estos años, los valores tienden a variar sustancialmente entre ellos, lo cual puede ser atribuido a las diferentes tasas de crecimiento de los árboles como resultado de las condiciones climáticas propias de cada región, a los tratamientos silvicultores, las características del suelo entre otros aspectos. Véase también que la densidad básica tiende a aumentar con la edad como quedó evidenciado en los trabajos de (Miranda, Sousa, & Pereira, 2011) y (Bhat & Priya, 2004), los cuales escogieron especímenes de edades mayores a 50 años para sus estudios. Adicionalmente, (Miranda, Sousa, & Pereira, 2011) y (Zahabu, Raphael, Omari Chamshama, Iddi, & Malimbwi, 2015) también evidenciaron que el espaciado y la posición radial del muestreo de tallos de madera de teca tuvo efectos en esta propiedad, estos factores influyeron significativamente la densidad básica de la madera.

La densidad básica también puede ser afectada por tratamientos térmicos. (Méndez Mejía, 2016) realizaron tratamientos térmicos a 4 temperaturas diferentes (205°C, 210°C, 215°C, 220°C) y al comparar sus resultados con una muestra no tratada se evidenció que la densidad tiene a disminuir a medida que la temperatura aumenta. Asimismo, demostraron que la densidad puede llegar a disminuir aún más si las muestras se toman en la albura del árbol y no en el duramen.

Con respecto a la densidad verde, según los datos de (Telles Antonio, y otros, 2017) y (Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008), su valor tiende a aumentar con respecto a los valores de las otras

densidades. Esto es debido a que los espacios vacíos entre las fibras que componen la madera son ocupados por partículas de agua, haciéndola por ende más densa.

En cuanto a la densidad anhidra pasa lo contrario del caso anterior, el agua que se encuentra en estos espacios se evapora como consecuencia del proceso de secado que se realiza, lo que sustrae masa al material, conforme a los resultados de (Telles Antonio, y otros, 2017), (Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008) y (Rivero Moreno & Moya Roque, 2006). (Machuca-Velasco, de la Rosa, Corona-Ambriz, Zaragoza-Hernández, & Arreola-Avila, 2017) obtiene valores de densidad básica de 0.88 g/cm^3 para la madera *Acacia schaffneri*; También cabe mencionar que maderas como *Mimosa caesalpiniaefolia Benth* plasmada en el trabajo de (do Nascimento, de Almeida, de Almeida, Christoforo, & Rocco Lahr, 2018) tienen valores de $1,04 \text{ g/cm}^3$, superando sustancialmente los valores de densidad mostrados por la madera estudiada.

Por otro lado (Dong, y otros, 2016), registro que la densidad de la madera de alamo fue de $0,34 \text{ g/cm}^3$, al igual que los valores registrados por (Sonderegger, Kránitz, Bues, & Niemz, 2015) para el abeto, mostrando datos de $0,40 \text{ g/cm}^3$, siendo estos valores mucho menores que los de la madera *Tectona Grandis*

7.2 Contenido de humedad

La madera es un material poroso, debido a esto puede contener grandes cantidades de aire y de agua, sumado a esto es un elemento higroscópico, es decir, tiene la capacidad de absorber agua del ambiente. Debido a estos factores, su peso no es constante y tiende a variar por el ambiente en donde se encuentre. Asimismo, el volumen tampoco es fijo

debido a que sufre procesos de contracción e hinchamiento al ganar o perder humedad, por lo que es importante conocer cuánto contiene de agua antes de determinar cualquier otra propiedad (Walker, 2006). Por lo general esta propiedad se determina a partir del peso inicial de la pieza de madera y el peso final después del secado al horno hasta un peso constante a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. La diferencia entre los dos valores se supone que se debe a la pérdida de agua por evaporación durante el secado.

El contenido de humedad se mide en porcentaje de peso secado al horno en lugar del peso original ya que a la industria le interesa la cantidad real de madera que existe en el tronco, sumado a esto, el peso seco suele ser estable por lo que es usado como valor de referencia.

Existen 2 formas de encontrar esta propiedad, el contenido de humedad en verde (Ecuación 1), el contenido de humedad anhidro (Ecuación 2) y pueden dar valores superiores al 100 % y dependerá de cómo sea calculada dicha propiedad (Walker, 2006).

$$\text{Contenido de humedad anhidro (\%)} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Contenido de humedad verde (\%)} = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso húmedo}} \times 100\% \quad (2)$$

Para maderas verdes recién taladas, el contenido de humedad suele variar sustancialmente. También dependerá de su dureza, ya que para maderas consideradas blandas el contenido de humedad en la albura suele ser mucho mayor que en el duramen, en cambio para especies consideradas duras el contenido de humedad entre estas 2 partes (duramen y albura), suelen ser comparables (Walker, 2006).

Otro dato que hay que tener en cuenta al momento de hablar de esta característica es que tiende a variar entre primavera y otoño, cabe resaltar que esto también dependerá de la localización y el sitio de muestreo (Walker, 2006).

Se encontraron en la literatura los datos relacionados en la **Tabla 2** y aunque en la mayoría de estos trabajos nos explican detalladamente como son las características geográficas de donde se realizó el muestreo, no se tiene certeza de cómo fueron las condiciones climatológicas el día en que se hizo el muestro dando un espacio bastante amplio para la suposición.

Tabla 2. *Contenidos de humedad encontrados en la literatura.*

Localidad	contenido de humedad anhidra (%)	contenido de humedad verde (%)	autor
Quevedo, Ecuador	107,09	51,53	(Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008)
Balzar, Ecuador	93,46	47,99	
Michoacán, México	---	48	(Telles Antonio, y otros, 2017)
Puerto Libertador, Colombia	92,67	10,78	(Betancur Salgado, Herrera B., & Mejía Mesa, 2000)
Cochabamba, Bolivia	106,68	---	(Rivero Moreno & Moya Roque, 2006)

Por otro lado, Podemos ver que, aunque los contenidos de humedad tienen variaciones bastantes considerables, buscan cierta tendencia para el caso de los contenidos de humedad verde alrededor de 90 %, para el caso de los contenidos de humedad anhidra buscan valores del 50 %, exceptuando el trabajo de (Betancur Salgado, Herrera B., & Mejía Mesa, 2000) que tuvo resultados menores los cuales pudo haber sido afectado por las condiciones climatológicas y geográficas de donde se realizó el sitio de muestreo.

7.3 Contracción e hinchamiento de la madera

La madera es un material capaz de absorber humedad del medio. Esta característica llamada hidroscofia afecta en varias ocasiones el uso de algunos materiales en ciertos ambientes. La cantidad de agua presente en la madera es el resultado de un proceso dinámico de transferencia con el medio ambiente. La madera en un ambiente húmedo absorbe agua y en consecuencia sufre un hinchamiento. Por el contrario, madera con alto contenido de humedad colocada en un ambiente seco, libera agua y se contrae. El proceso de hinchamiento y contracción de la madera se da por la transferencia de agua con el medio ambiente que busca una condición de equilibrio higroscópico (Calvo, y otros, 2007). La humedad se encuentra en la madera en tres formas diferentes: i) como agua libre, ocupando los espacios intercelulares y celulares o lúmenes, ii) como agua de impregnación adsorbida, que se encuentra impregnando los espacios submicroscópicos de la pared celular, y iii) como agua de constitución, formando parte de las células y tejidos (Coronel, 1994).

El hinchamiento ocurre cuando se pasa de un estado seco ($CH \leq 12\%$), a estado de madera verde ($CH \geq 30\%$). Por lo contrario, las contracciones suceden cuando pasamos de estados con exceso de agua, ($CH \geq 30\%$) a Contenidos de humedad muy bajos, ($CH \leq 12\%$). La contracción de la madera es un hecho a tener en cuenta al momento de elegirla para ciertos trabajos debido a que puede disminuir e incluso eliminar defectos en la madera (Calvo, y otros, 2007) .

Es importante resaltar que, debido a la anisotropía de la madera, estos fenómenos de contracción e hinchamiento se pueden dar en distintas direcciones dando como resultados valores totalmente diferentes. Por lo general, estas mediciones se realizan en

las direcciones radial, tangencial, longitudinal de la madera y en algunos casos, también se habla de contracciones volumétricas totales. Así mismo, la relación T/R o también llamado coeficiente de anisotropía, el cual es la relación entre los movimientos lineales tangenciales y radiales, es un parámetro utilizados para evaluar la estabilidad de la madera, es decir, entre mayor sea la relación expresada, mayor es la magnitud del problema refiriendo a esto a deformaciones y grietas. Por otra parte, la contracción volumétrica también puede considerarse como un parámetro para determinar las deformaciones de la madera en cuanto a estabilidad del material. La **Tabla 3.** muestra valores de contracción reportados para la madera Teca de diferentes regiones del mundo. La **Tabla 4.** muestra los valores de referencia para contracciones volumétricas.

Tabla 3. Valores de contracción de la madera Teca de diferentes regiones del mundo.

Región de Procedencia	contracción radial (%)	Contracción Tangencial (%)	Contracción longitudinal (%)	Contracción volumétrica (%)	Relación T/R	Autor
Cochabamba, Bolivia.	2,57	5,33	0,27	8,01	2,31	(Rivero Moreno & Moya Roque, 2006)
Campeche, México	2,3	5	---	---	---	(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzmán, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Campeche, México	2,3	4,9	---	---	---	
Chiapas, México	2	4,3	---	---	---	
Tabasco, México	2,8	5,1	---	---	---	
Quevedo, Ecuador	2,04	5,06	0,41	8,11	2,96	(Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008)
Balzar, Ecuador	2,06	5,22	0,49	7,77	2,63	
Michoacán.	---	2,99	---	5,15	2,02	(Telles Antonio, y otros, 2017)
Puerto Libertador, Colombia	2,01	3,92	0,54	5,85	2,01	(Betancur Salgado, Herrera B., & Mejía Mesa, 2000)
Abangares, Costa Rica	2,2	3,9	---	6,2	---	(Castro & Raigosa, 2000)
Timor Oriental	3,5	5,17	0,49	---	---	(Miranda, Sousa, & Pereira, 2011)

Brasil	2,4	4,21	---	6,84	---	(Blanco-Flórez, Fernando-Trugilho, Tarcisio-Lima, Gherardi-Hein, & Moreira da Silva, 2014)
Alta Floresta, Brasil	2,33	4,47	---	7,07	2,01	(Santos Souza, 2019)
Livramento, Brasil	2,06	3,94	---	6,19	1,97	
Cáceres, Brasil	3,09	3,92	---	7,14	1,31	
Costa Rica	2,72	4,24	---	13,78	2	(Muñoz-Acosta & Moreno-Pérez, 2013)

Tabla 4. Valores de referencia para contracciones volumétricas

Clasificación	Contracción volumétrica %
Maderas muy estables	< 35
Maderas estables	35-45
Maderas Semimóviles	45-50
Maderas movibles	50-60
Maderas muy movibles	60

Con base en la información relacionada en las tablas anteriores, se puede decir que la Teca es una madera estable, ya que el mayor coeficiente de contracción volumétrica registrado fue de 13,78 % en el trabajo de (Muñoz-Acosta & Moreno-Pérez, 2013), que a pesar de ser alto, está bastante alejado del límite de 35 %. Adicionalmente, se observa en la **Tabla 3** que los valores de contracción no son iguales en todas las direcciones. En este sentido, (Walker, 2006), mostró que el cambio de volumen no es igual en todas las direcciones como consecuencia de la anisotropía de este material. Afirmó que el mayor cambio dimensional ocurre en una dirección tangencial a los anillos de crecimiento. La contracción radial suele ser considerablemente menor que la contracción tangencial mientras que la contracción longitudinal (a lo largo de la fibra) es tan leve que suele pasarse por alto. La contracción longitudinal es de 0,1 a 0,3 %, en contraste con las contracciones transversales, que es de 2 a 10 %. La contracción tangencial es aproximadamente el doble de la dirección radial, aunque en algunas especies es hasta

cinco veces mayor, información que se puede comprobar con los datos que suministraron los autores citados anteriormente.

(Santos Souza, 2019) por su parte, tomó como referencia el coeficiente de anisotropía. El autor expuso que para valores comprendidos entre 1,2 y 1,5 la madera se considera excelente para usos cuya contracción sea casi indetectables, como lo son muebles finos, barcos, electrodomésticos, instrumentos musicales, equipamiento deportivo, entre otros. Para valores comprendidos entre 1,5 y 2,0 se destacan como normales y entre sus usos podemos destacar estantes, mesas y usos que permitan pequeños movimientos. Valores mayores a 2,0 originan dificultades para determinados usos de la madera, aunque son ampliamente usados en construcciones civiles teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas. Para el caso de la Teca y según las propiedades registradas por la bibliografía encontrada, esta madera es considerada en el rango normal a mala, aunque conforme a (Méndez Mejía, 2016) la realización de tratamientos térmicos puede mejorar este coeficiente de anisotropía.

Otras maderas como lo son *Melia azedarach* encontrados en el trabajo de (Van Duong & Matsumura, 2018) mostraron valores de contracción tangencial, contracción radial y relación anisotrópica de 7.05%, 4,38% y 1,64%, semejantes a los registrados por la *Tectona Grandis*.

7.4 Dureza

La dureza es la oposición de un material a ser penetrado o rayado. La dureza de un material se mide presionando un indentador con una fuerza conocida sobre la superficie del material. Relacionando la forma y tamaño de la huella que queda después de remover el

indentador con la fuerza aplicada se puede determinar la oposición del material a ser penetrado. Existen diversas escalas utilizadas para medir la dureza de los materiales de Ingeniería. Específicamente en madera se utiliza la dureza Janka. Esta escala de dureza difiere un poco de las otras escalas puesto que se mide la fuerza necesaria para introducir en la madera la mitad de una esfera de acero de 11,18 mm de diámetro, como se ilustra en la **Figura 4**. Algunos autores se refieren a esta dureza como una derivación del conocido método Brinell. Esta medida de dureza es la de mayor utilización en la industria para cuantificar la dureza de la madera. Aunque la madera no sea tan resistente como el acero y el hormigón, es muy apetecible por su fácil trabajabilidad, no obstante, debe manejarse con cuidado por su facilidad de penetración.

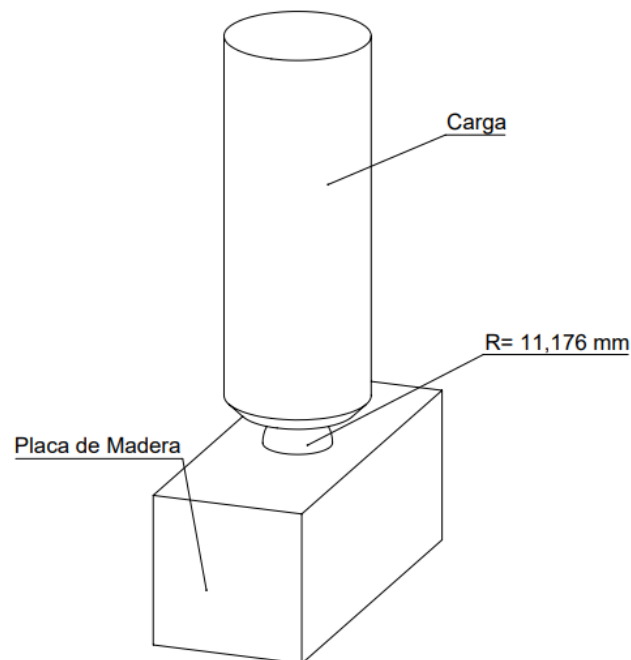


Figura 4. Método Dureza Janka. (Fuente propia).

Generalmente, las maderas duras son de crecimiento lento y de alta densidad, debido a estas características presentan cierta dificultad para ser trabajadas (Escobar, Ricardo Rodríguez, & Correa). Así mismo, se reporta que la dureza depende mucho de la composición anatómica de la madera entre mejor sea la cohesión de las fibras entre sí, será más difícil de penetrar. La **Tabla 5** muestra valores de dureza reportados para la madera Teca de diferentes regiones del mundo.

Tabla 5. Valores de dureza reportados para la madera Teca de diferentes regiones del mundo.

Región de Procedencia	tipo de dureza	Dureza	Contenido de humedad	Autor
Michoacán, México	Janka ⁴	53,46 MPa	14,6 %	(Telles Antonio, y otros, 2017)
Campeche, México	Brinell	41 MPa		(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzman, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Campeche, México	Brinell	43 MPa		
Chiapas, México	Brinell	40 MPa		
Tabasco, México	Brinell	49 MPa		
Quevedo, Ecuador	Brinell ⁵	449, 50 kg	12 %	(Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008)
Balzar, Ecuador	Brinell	425,50 kg	12 %	
Bolivia		415,16 kg	12 %	(Rivero Moreno & Moya Roque, 2006)
Puerto libertador, Colombia		492,72 kg	15%	(Betancur Salgado, Herrera B., & Mejía Mesa, 2000)
Costa Rica	Brinell	587 kg	12 %	(Castro & Raigosa, 2000)
Brasil	Janka	4,66 kN	12 %	(Blanco-Flórez, Fernando-Trugilho, Tarcisio-Lima, Gherardi-Hein, & Moreira da Silva, 2014)
Venezuela	Janka	618,58 kg	12 %	(Valero, Reyes C., & Garay J., 2005)
Ghana	Janka	8 kN	12 %	(Amoah & Inyong, 2019)
	Janka	9 kN	12 %	

⁴ Se intuye que el autor utilizó el área proyectada del indentador para poder calcular la dureza Janka en términos de esfuerzo.

⁵ El autor no fue claro al momento de explicar cómo se realizó este ensayo de dureza y la manera como se obtuvieron esas unidades.

A pesar de que la dureza Janka está delimitada para la madera, se encontró en la literatura que algunos autores reportaron la dureza de la Teca en escala Brinell. (Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzmán, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014), (Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008) y (Castro & Raigosa, 2000).

Al buscar resultados de dureza de otras especies de madera encontramos el trabajo de (Percin, Peker, & Atilgan , 2016), arrojando resultados de esta propiedad aplicando el método Brinell de 34,9 MPa, evidenciando que frente a otras maderas, la *Tectona Grandis* es muy competitiva en cuanto a dureza.

7.5 Flexión estática

Se le denomina flexión a la deformación que presenta un elemento estructural alargado apoyado en sus extremos causada por una fuerza aplicada perpendicularmente a lo largo de su eje longitudinal como se muestra en la **Figura 5**. Este es el esfuerzo común en vigas, láminas o placas. (Escobar, Ricardo Rodriguez, & Correa).

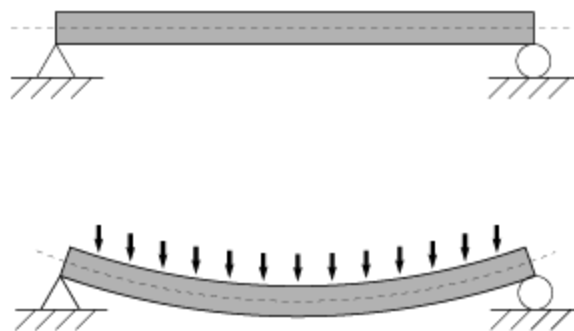


Figura 5. Flexión estática (Fuente propia).

El ensayo de flexión estática permite encontrar dos parámetros importantes, el módulo elástico en flexión - MOE y la resistencia a la flexión o módulo de ruptura – MOR. El MOE está asociado con la rigidez de la madera, cuanto mayor sea más rígida será.

La **Figura 6** ilustra el ensayo de flexión estática se realiza aplicando una fuerza equidistante a 2 puntos de apoyos que aumenta de manera gradual desde cero hasta que se produce la falla del espécimen.

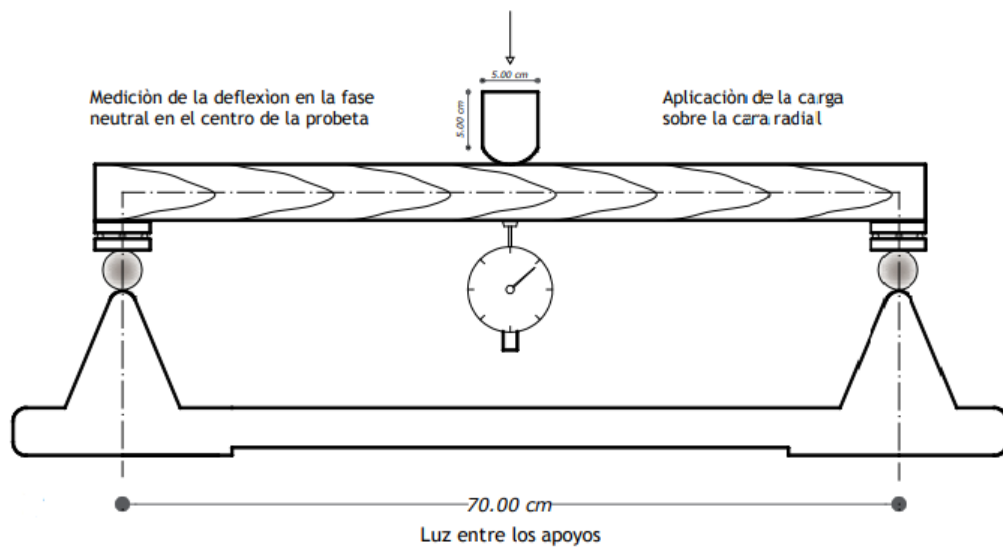


Figura 6. Ensayo de flexión estática. Tomado de (Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008)

Los parámetros MOE y MOR se calculan de la siguiente forma:

Resistencia a la flexión = $\frac{3FL}{2wh^2}$ Tomado de: (Askeland, Fulay, & Wright, 2012)

Módulo en flexión = $\frac{L^3 F}{4wh^3 \delta}$ Tomado de: (Askeland, Fulay, & Wright, 2012)

Donde F es la carga a la fractura en N, L la distancia entre 2 puntos de apoyo en m, w es el ancho de la probeta y h es su altura, ambos expresados en m.

Debido a que la madera generalmente trabaja a flexión por su uso en vigas de construcción es muy común que valores como el MOE y el MOR se encuentren en la literatura existente sobre este material. LA **Tabla 6** muestra valores de MOE y MOR reportados en la literatura.

Tabla 6. Valores MOE y MOR reportados en la literatura.

Región de Procedencia	Edad (años)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Autor
Cochabamba, Bolivia	8	10327	95	(Rivero Moreno & Moya Roque, 2006)
Campeche, México	9	8425	92	(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzman, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Brasil	13	13046	92	(Blanco-Flórez, Fernando-Trugilho, Tarcisio-Lima, Gherardi-Hein, & Moreira da Silva, 2014)
Alta Floresta, Brasil	14	10755,61	98,86	(Santos Souza, 2019)
Livramento, Brasil	14	10772,97	101,61	
Cáceres, Brasil	14	12091,13	109,69	
Campeche, México	15	9286	108	(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzman, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Tabasco, México	15	9479	107	
Abangares, Costa Rica	17	9767	75	(Castro & Raigosa, 2000)
Balzar, Ecuador	18	9164	74	(Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunze Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008)

Chiapas, México	21	9217	97	(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzman, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Nilambur, India	21	13643	133.2	(Bhat & Priya, 2004)
North Kanara, India	21	8436	91.8	
Quevedo, Ecuador	22	10449	81	(Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008))
Konni, India	65	17580	136.1	(Bhat & Priya, 2004)
Puerto Libertador, Córdoba	---		75	(Betancur Salgado, Herrera B., & Mejía Mesa, 2000)
Timor Oriental	50 a 70	10684	141	(Miranda, Sousa, & Pereira, 2011)

Con estos datos se realizaron gráficos de MOE y MOR en función de la edad de la madera, como se muestra en la **Figura 7** y en la **Figura 8** respectivamente.

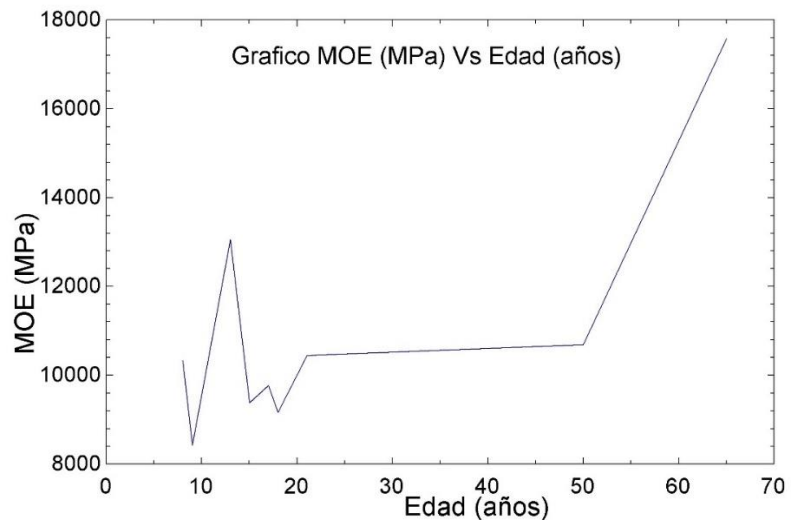


Figura 7. MOE en función de la edad de la madera. (Fuente propia).

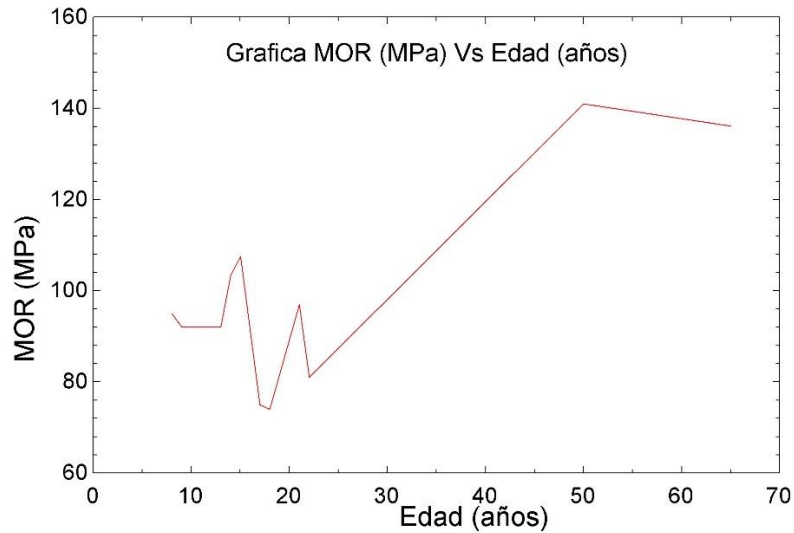


Figura 8. MOR en función de la edad de la madera (Fuente propia).

Conforme a estos resultados, se puede inferir que en el rango de 10 a 15 años se encuentra la edad propicia para realizar la cosecha de la madera, puesto que presentan valores mayores en comparación a los otros años. Para edades mayores se observa un declive en los valores de MOE y MOR, por tanto, se podría afirmar con estos valores que la edad propicia se encuentra en el rango de 10 a 15 años puesto que más tiempo implica mayor cuidado y su valor no sería competitivo para el mercado que se maneja actualmente.

Se encontraron valores de propiedades mecánicas de otras especies para poder compararlas con la madera Teca, un ejemplo de ellos es (Hein & Brancheriau, 2018) que obtuvieron para la madera *Eucalyptus Specimens* valores de MOR registrados de 76,7 MPa en el ensayo a flexión a 3 puntos siendo estos menores a los de la madera *Tectona Grandis*.

Otro valor de MOR encontrado en la literatura es el plasmado en el trabajo (A. Nogueira, y otros, 2018), para la madera *Eucalyptus umbra* registrando valores de 84,1 MPa para especímenes al 12% de humedad, siendo estos mismos menores a los de la *Tectona Grandis*.

En cuanto al MOE, trabajos como el de (Hounlonon, Kouchade, & Kounouhewa, 2017), con valores de 12,9 MPa para especies nativa de Tanzania, muestran que la Teca cuenta con propiedades que pueden llegar a competir con otras maderas del mercado.

7.6 Compresión

La resistencia a compresión es el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento (Beer & Russell Johnston, 2010).

La madera es uno de los materiales que por lo general está sometida a compresión debido a su utilización en columnas o piezas que soportan este tipo de esfuerzo.

Como la madera es un material anisotrópico la resistencia a compresión cambia en función de la dirección en la que se mide, por tanto, en la literatura se presentan valores de resistencia a compresión tanto a favor como en contra de las fibras, como se ilustra en la **Figura 9**. Todo dependerá de la forma en como sea maquinada la madera para su respectiva utilización.

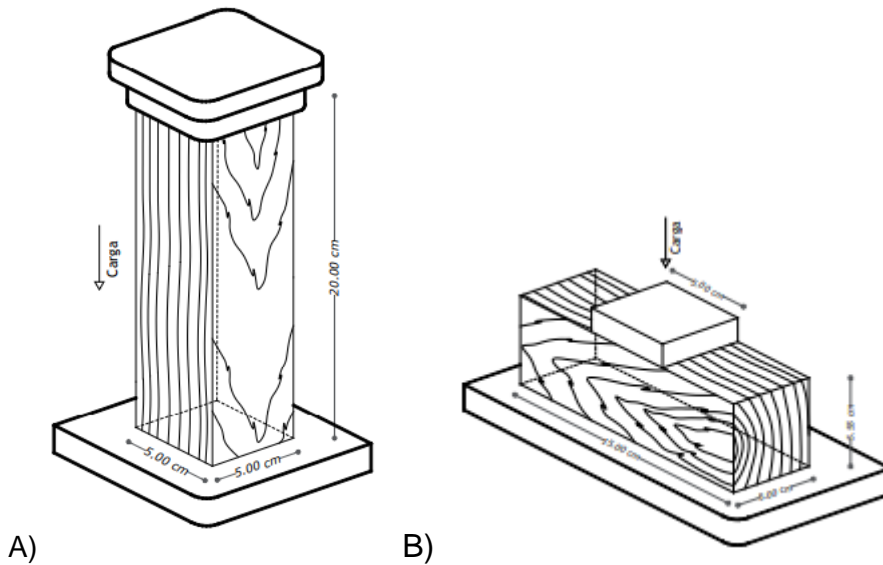


Figura 9. Ilustración del ensayo a compresión en función de la orientación de las fibras A). Ensayo de Compresión paralela a las fibras, B). Ensayo de compresión perpendicular a la fibra. Tomado de (Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008)

Adicional a la resistencia a compresión - ECM, definida como el esfuerzo máximo soportado por el material justo antes de que falle, también es posible determinar el esfuerzo al límite proporcional – ELP, siendo este el punto de cambio entre la zona elástica y la zona plástica de la curva Esfuerzo en función de la deformación. Los valores de ELP, ECM y MOR paralelos a la fibra se presenta en la **Tabla 7**. La **Tabla 8** muestra los valores de ELP perpendiculares a la fibra.

Tabla 7. Valores de ELP y ECM medidos de forma paralela a la fibra.

Localidad	Contenido de humedad	ELP (MPa)	ECM (MPa)	MOE (MPa)	Autores
Michoacán, México	18,9 %	24,78	31,97	17853	(Telles Antonio, y otros, 2017)
Campeche, México	12 %	---	---	7301	(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzman, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Campeche, México	12 %	---	---	10048	
Chiapas, México	12 %	---	---	10648	
Tabasco, México	12 %	---	---	10920	(Rivero Moreno & Moya Roque, 2006)
Cochabamba, Bolivia	---	---	---	---	

Puerto Libertador, Colombia	14,9 %	31,72		12723	(Betancur Salgado, Herrera B., & Mejía Mesa, 2000)
	12 %	36,05	---	---	
Costa Rica	12 %	---	33,93	---	(Castro & Raigosa, 2000)
Timor Oriental	12 %	---	50	---	(Miranda, Sousa, & Pereira, 2011)
Tanzania	12 %	---	40.99	---	(Zahabu, Raphael, Omari Chamshama, Iddi, & Malimbwi, 2015)
Brasil	12 %	---	47	6768	(Blanco-Flórez, Fernando-Trugilho, Tarcisio-Lima, Gherardi-Hein, & Moreira da Silva, 2014)
Venezuela	12 %	43,26	52,25	44,13	(Valero, Reyes C., & Garay J., 2005)
Konni, India	---	---	48	---	(Bhat & Priya, 2004)
Nilambur, India	---	---	53,9	---	
North Kanara, India	---	---	44,6	---	

Tabla 8. Valores de ELP medidos de forma perpendicular a la fibra.

Localidad	Contenido de humedad	ELP (MPa)	Autores
Michoacán, México	15,8 %	3,29	(Telles Antonio, y otros, 2017)
Quevedo, Ecuador	12 %	5,80	(Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008)
Balzar, Ecuador	12 %	5,73	
Cochabamba, Bolivia	12 %	6,95	(Rivero Moreno & Moya Roque, 2006)
Puerto Libertador, Colombia	14,2 %	7,61	(Betancur Salgado, Herrera B., & Mejía Mesa, 2000)
	12 %	8,46	
Venezuela	12 %	11,10	(Valero, Reyes C., & Garay J., 2005)

La madera esta compuesta de una agrupación de fibras, que, al aplicar un esfuerzo a compresión perpendicular a estas, se aplastan y obtienen una reducción en sus dimensiones, esto si el esfuerzo aplicado supera el ELP de la fibra admisible por la madera. Revisando los datos encontrados en los trabajos de (Betancur Salgado, Herrera B., & Mejía Mesa, 2000) y (Valero, Reyes C., & Garay J., 2005) se puede inferir que el

esfuerzo a compresión perpendicular es aproximadamente una cuarta parte de la resistencia en dirección paralela a la fibra. No se pudo encontrar suficiente información sobre compresión perpendicular al grano en la literatura, esto podría deberse a que la madera en muy pocos casos en la vida cotidiana y en construcción de obras civiles u obras aficionadas es colocada a trabajar en compresión perpendicular a la fibra, esto se debe a que en esta dirección la madera no tiene valores favorables para su utilización.

El esfuerzo a compresión perpendicular es característico en zonas de apoyo de las vigas, ahí se concentra toda la carga en áreas pequeñas que deben ser capaces de transmitir la reacción que allí cae sin sufrir deformaciones importantes.

Otra observación que se puede destacar tanto en compresión paralela como en compresión perpendicular es que cuanto más alto es el contenido de humedad menor es el valor del esfuerzo reportado, acorde a lo plasmado por (Betancur Salgado, Herrera B., & Mejía Mesa, 2000). Otro aspecto importante a resaltar es la gran diferencia de los valores que tiene el MOE en fibras paralelas, el cual oscila entre los 6000 MPa y 11000 MPa para contenidos de humedad del 12 % en compresión paralela a la fibra, teniendo en cuenta que estas propiedades pueden estar afectadas por factores ambientales del muestreo. Por otra parte, en compresión perpendicular a la fibra, estos valores si bien son bastante bajos, tienen variaciones significativas, oscilando entre 5 MPa y los 11 MPa en contenidos del 12% de humedad.

Si se compara esta madera con otras especies como lo es el trabajo de (Igartúa, Moreno, Piter, & Monteoliva, 2016) encontraron valores de compresión perpendicular de 11,7 MPa

para la madera *Acacia melanoxylon* siendo estos valores comparables a los de la *Tectona Grandis*.

Otros autores como (Arroyo, Lopez Silva, Panzera, Lahr, & André L., 2017) encontraron valores de compresión paralela al grano de 55 MPa para la madera *Calycophyllum Multiflorum* valor que supera los valores encontrados referentes a la madera *Tectona Grandis*. También se registraron valores de *klainedoxa gabonensis* en el trabajo de los autores (Boakye Boadu, Antwi-Boasiako, & Frimpong-Mensah , 2017) para compresión paralela al grano de 80,7 MPa siendo estos valores muy superiores a los de la *Tectona Grandis*.

7.7 Cizalladura o cortante

Este esfuerzo consiste en la capacidad que tienen los materiales en resistir fuerzas paralelas y opuestas de manera que se tienda a producir un deslizamiento entre ellas (Escobar, Ricardo Rodriguez, & Correa). Para la realización de este ensayo se aplica una fuerza en la línea punteada y paralela al área de corte especificado en la **Figura 10** hasta que se produzca la falla en el elemento.

La **Figura 10** muestra la probeta utilizada en este ensayo según la norma ASTM D-143 (ASTM, 2017). En este ensayo se determina el esfuerzo cortante máximo- EMV definido como la resistencia máxima que soporta el material antes de la falla.

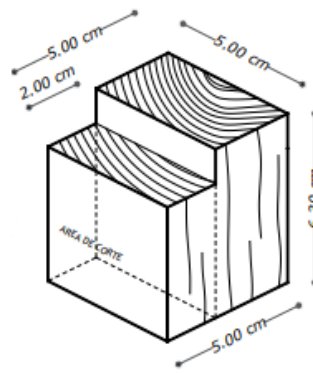


Figura 10. Probeta para ensayo de cizallamiento según la norma ASTM D-143. Tomado de (Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008).

La **Tabla 9** relaciona los valores de EMV reportados en la literatura sobre la madera Teca.

Tabla 9. Valores de EMV reportados en la literatura sobre la madera Teca.

Localidad	Edad	Contenido de humedad	EMV (MPa)	Autores
Cochabamba, Bolivia	8	12%	12,27	(Rivero Moreno & Moya Roque, 2006)(
Campeche, México	9	12%	9,7	(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzman, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Michoacán. México	11	26,30%	6.18	(Telles Antonio, y otros, 2017)
Tanzania	14	12%	8,93	(Zahabu, Raphael, Omari Chamshama, Iddi, & Malimbwi, 2015)
Campeche, México	15	12%	9,6	(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzman, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Tabasco, México	15	12%	8,5	(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzman, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Costa Rica	17	12%	10	(Castro & Raigosa, 2000)
Balzar, Ecuador	18	12%	10,42	(Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008)
Venezuela	20	12%	10,48	(Valero, Reyes C., & Garay J., 2005)
Chiapas, México	21	12%	11,3	(Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzman, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014)
Quevedo, Ecuador	22	12%	8,77	(Crespo Gutiérrez, Jiménez Romero, Suatunce Cunuhay, Law Blanco, & Sanchez Fonseca, 2008)
Puerto Libertador, Colombia	---	14,80%	10,39	(Betancur Salgado, Herrera B., & Mejía Mesa, 2000)
	---	12%	11.22	

Se puede observar que, aunque se tienen valores similares en el contenido de humedad, los valores de EMV oscilan en un amplio rango comprendido entre 8 y 12 MPa. Igualmente, se puede observar que esta propiedad también depende del contenido de humedad de la madera, a mayor contenido de humedad menor es el valor de este esfuerzo. (Betancur Salgado, Herrera B., & Mejía Mesa, 2000) y (Telles Antonio, y otros, 2017). La **Figura 11** muestra el EMV en función de la edad del árbol.

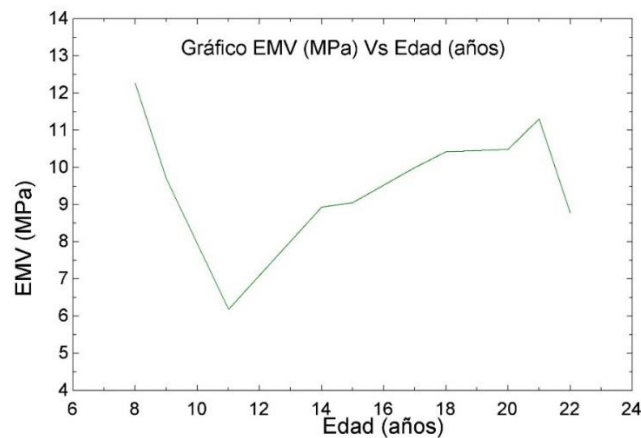


Figura 11. Gráfico EMV en función de la edad del árbol (Fuente propia).

Se puede observar que la cosecha de la madera debería realizarse en el rango de 8 a 10 años acorde a los valores de EMV reportados y al tiempo de recolección puesto que su valor al momento de llevarlo al mercado lo dejara competir con otros materiales. También se evidencia que después de los 10 años los valores de EMV tienden a subir, no obstante, hay un punto de declive de este esfuerzo a los 22 años y habría que revisar este caso en particular para determinar que variables diferentes a la edad afectan los valores de EMV. Autores como (Kotlarewski, Belleville, Gusamo, & Ozarska , 2016) obtuvieron valores muy

bajos de 1,9 MPa para *Papua* sembrados en Nueva Guinea lo que reafirma que la Teca sigue siendo una excelente opción para este tipo de esfuerzo.

7.8 Tensión

La resistencia a tensión se define como la capacidad de un material a soportar una carga de estiramiento sin romperse. Esta resistencia se mide a partir de un ensayo de tensión. Es importante resaltar que los ensayos de tensión no son comunes en la madera debido a que generalmente este material es utilizado en aplicaciones a flexión y compresión.

No obstante, hay autores que evalúan la resistencia a tensión de la madera Teca (Telles Antonio, y otros, 2017). Estos investigadores reportaron un valor de resistencia a tensión de 3,9 MPa paralelo a la fibra, lo cual se considera un valor bastante bajo.

También, (Méndez Mejía, 2016) hablaron sobre la tensión en su escrito, y como los termo tratamientos tienen influencia sobre la resistencia a la tracción. Los autores concluyeron que la resistencia disminuye conforme aumenta la temperatura de termo tratamiento independiente de la posición y el corte utilizado.

Aunque no se encontró mucha información sobre la *Tectona Grandis*, se pudo hallar literatura sobre otras especies para comparar con la madera de estudio, como es el caso de (Nájera-Luna, Vargas-Antonio, Méndez-González, & Graciaro-Luna, 2005), los cuales encontraron valores de la madera *Quercus laeta* Liemb, cultivada en el salto, México. En este trabajo se reportaron valores de esfuerzo de 119,05 MPa para tensión paralela a la fibra y 6,42 MPa para tensión perpendicular a la fibra siendo esta mayor a los datos encontrados de la madera *Tectona Grandis*.

Otro valor de esfuerzo que se puede comparar es el valor de tensión paralela a las fibras de *la Anadenanthera colubrina* siendo este valor de 53,24 MPa encontrado por (André L., Aftimus, Machado, Panzera, & R. Lahr, 2017) el cual sobrepasa por mucho los valores de esfuerzo en esa orientación de la madera *Tectona Grandis*.

8. REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10 Y TECTONA GRANDIS (TECA)

El Código de Edificación Sísmica de Colombia (NSR-10) es un código colombiano que regula las condiciones que deben tener los edificios para que su estructura responda bien a los terremotos. Este documento fue promulgado mediante Decreto No. 926 del 19 de marzo de 2010, el cual fue aprobado por el entonces presidente Álvaro Uribe Vélez. (tomado de: (NSR-10 | Camacol, s.f.).

La norma fue sometida a evaluación durante tres años, hasta que fue aprobada por los Ministerios de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, de Transporte y del Interior. Por lo tanto, cabe señalar y aclarar que esta norma es elaborada por entidades colombianas y no se especifica el uso de la misma para otras regiones. (tomado de: (Tiempo, 2010).

El temario está dividido en Títulos, cada uno de los cuales agrupa una temática particular. En el Reglamento NSR-10 los once Títulos de Reglamento NSR-98 se actualizaron y además dentro de algunos de los Títulos se introdujeron Capítulos nuevos. El temario del NSR-10 es el siguiente:

TITULO	CONTENIDO
A	Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente
B	Cargas
C	Concreto estructural
D	Mampostería estructural
E	Casas de uno y dos pisos
F	Estructuras metálicas
G	Estructuras de madera y estructuras de guadua
H	Estudios geotécnicos
I	Supervisión técnica
J	Requisitos de protección contra el fuego en edificaciones
K	Otros requisitos complementarios

Figura 12. temario de la norma sismo resistente Reglamento NSR-10.

El Título G de este Reglamento establece los requisitos de diseño estructural para edificaciones de madera para que alcancen un nivel de seguridad comparable a los de edificaciones de otros materiales que cumplan los requerimientos del Reglamento (Asociación colombiana de ingeniería sísmica, 1997).

Este reglamento cubre elementos, miembros o estructuras hechas totalmente de madera. También incluye edificaciones que sean una combinación de madera con otros materiales cubiertos o no en el alcance de ese reglamento. (Asociación colombiana de ingeniería sísmica, 1997).

Esta norma se puede complementar con la Norma Técnica Colombiana “NTC 2500 Uso de la Madera en la Construcción”, publicada por el ICONTEC, la cual se ocupa de la madera como material de construcción y de los procesos industriales y tratamientos, así como de los requisitos de fabricación, montaje, transporte y mantenimiento de elementos de madera. Se recomienda utilizar estas dos normas al mismo tiempo, pero en todos los aspectos prevalecerán las normas de este reglamento. (Asociación colombiana de ingeniería sísmica, 1997).

La **Tabla 10** relaciona los esfuerzos permisibles o mínimos aceptados para la *Tectona Grandis* (TECA) de acuerdo con la norma NSR – 10 para el tipo de madera “ES6” con un contenido de humedad CH:12% junto con los datos encontrados en la literatura. Es importante mencionar que se utilizaron los valores promedio de los datos reportados.

Tabla 10. Esfuerzos permisibles o mínimos aceptados para la TECTONA GRANDIS (TECA) De acuerdo con la norma NSR – 10 para el tipo de madera “ES6” con un contenido de humedad CH:12% junto con los datos encontrados en la literatura.

Nombre Científico	Fuente de información	DB (g/cm ³)	E _{0,5} (GPa)	F _b (MPa)	F _c (MPa)	F _p (MPa)	F _v (MPa)	F _T (MPa)
<i>Tectona Grandis</i>	Norma NRS-10	0,53	10,8	16,7	12,5	2,5	1,8	12,5
<i>Tectona Grandis</i>	Literatura	0,59 ± 0,056	-	96,22 ± 17,84	41,58 ± 4,35	6,99 ± 2,45	10,03 ± 1,12	-

donde:

DB: Densidad básica, *E*_{0,5}: Módulo de elasticidad promedio longitudinal, *F*_{*b*}: Esfuerzo admisible a flexión, *F*_{*c*}: Esfuerzo admisible a compresión paralela, *F*_{*p*}: Esfuerzo admisible a compresión perpendicular a la fibra, *F*_{*v*}: Esfuerzo admisible cortante paralelo a la fibra, *F*_{*T*}: Esfuerzo admisible a tensión paralela a la fibra. Estos valores están representados en mega pascales (MPa).

En la **Tabla 10** se reportan los valores de la (Asociación colombiana de ingeniería sísmica, 1997) y un promedio de los valores encontrados en la literatura. Se puede afirmar que para todos los esfuerzos permisibles aprobados por la norma colombiana de construcción sísmo resistente, los estudios encontrados sobre la teca al 12% de humedad son válidos, si la madera de estudio proviene de otros países u otros continentes. Todos los autores que estudiaron la teca sin importar la edad de esta cumplen los valores mínimos de calidad para realizar construcciones civiles en Colombia.

Como se puede evidenciar en **Tabla 10**. F_b (Esfuerzo admisible a flexión), registra un valor de 16,7 MPa, si se compara con el módulo de ruptura (MOR) ubicado en la **Tabla 6** siendo este la resistencia máxima que puede soportar este material a flexión, se encuentran muy por debajo, ya que estos valores van desde 75 hasta 141 MPa, no obstante, estos valores se encuentran entre un rango de edades de 17 a 70 años, lo cual puede afectar considerablemente los resultados.

También si se comparan los valores encontrados de esfuerzo a compresión paralelo a la fibras ubicados en la **Tabla 7**, y los datos estipulados de esfuerzo permisible según la norma, F_c (esfuerzo admisible a compresión paralela) se puede evidenciar que estos se superan fácilmente, como lo son el caso del registrados por (Rodríguez Anda R. , Zamora Natera, Silva Guzmán, Salcedo Pérez, & Fuentes Tavalera, 2014) encontrándose un valor de 35 MPa, siendo este a su vez el valor mínimo encontrado en la literatura, los demás valores para el esfuerzo a compresión paralela a la fibra oscilan entre 35 y 45 MPa.

Para el esfuerzo de compresión perpendicular a las fibras, se evidencia en la Tabla 8 que los valores oscilan entre 5,73 MPa y 11,10 MPa, y la norma plasma que para F_p (esfuerzo admisible a compresión perpendicular a la fibra), el valor mínimo permisible aceptado es de 2,5 MPa, con lo cual se puede afirmar que la madera *Tectona Grandis* (Teca) estudiada por los diferentes autores en el presente escrito, es apta para diseños estructurales para edificación a compresión perpendicular.

F_v (esfuerzo admisible cortante paralelo a la fibra), para la teca *Tectona Grandis*, según la información anteriormente mostrada, obtenida de la (Asociación colombiana de ingeniería sísmica, 1997), se registra un valor de 1,8 MPa, este valor del esfuerzo es comparable

con los esfuerzos hallados en la literatura, el cual es llamado esfuerzo máximo cortante (EMV) los cuales se encuentran resumidos en la **Tabla 9**. Se puede observar que los valores recolectados de los diferentes escritos que van desde 8,77 – 12,27 MPa para un contenido de humedad del 12%, notando que, estos valores superan por mucho el esfuerzo admisible cortante paralelo a la fibra impuesto por la norma.

En la literatura encontrada fue poca información la que se recolecto acerca del esfuerzo a tensión paralela a la fibra ya que la madera en obras de construcción u obras civiles es muy poco el uso que se le da a tensión, sin embargo autores como (Telles Antonio, y otros, 2017) y (Méndez Mejia, 2016) realizaron estudios y ensayos con la madera *Tectona Grandis* encontrado un esfuerzo permisible a tensión de 3,9 MPa, cabe aclarar que este valor encontrado es para el esfuerzo a tensión perpendicular a la fibra, este valor no puede ser comparado con la información recolectada en la **Tabla 10** obtenida del reglamento colombiano de construcción sismo resistente para la teca de 12,5 MPa, ya que este valor del esfuerzo admisible a tensión paralela a la fibra.

9. CONCLUSIONES

Se pudo notar a lo largo de toda la información recolectada que la madera como material no tiene siempre los mismos valores en cuanto a sus características físicas y mecánicas; esto sucede debido principalmente a la anisotropía, la cual hace que todas sus propiedades varíen en todas sus direcciones y en variación del tiempo (edad).

También afectan factores como el clima de donde se colecto la muestra, el terreno donde fue sembrada la madera a la cual se le hicieron los diferentes estudios, el tratamiento que recibió durante la maduración, de que parte de la madera fueron sacadas las probetas ya que, al ser un ser vivo, sus propiedades aumentan o disminuyen debido a los elementos que intervinieron en su crecimiento.

También se puede afirmar que los datos registrados en la literatura encontrada, con un contenido de humedad de 12%, cumplen con los valores mínimos permisibles dados por la norma colombiana de construcción sismo resistente con esta misma humedad, incluso si no provienen de países que tengan la misma afinidad geográfica y climática que Colombia. Asimismo, se notó que a pesar de que hubo un amplio rango de edades en la literatura, este no influyó en la comparación, debido a que los valores encontrados fueron muy superiores a los expuestos en la norma NRS-10.

Otra conclusión que se llegó con esta investigación es que las maderas encontradas a lo largo de todo el mundo, se puede utilizar en el sector de la construcción, como también se le brindo información adicional a los futuros estudiantes, artesanos, carpinteros y cualquiera que esté interesado en aprovechar este importante material.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Boakye Boadu, K., Antwi-Boasiako, C., & Frimpong-Mensah, K. (2017). Propiedades físicas y mecánicas de Klainedoxa gabonensis con potencial de ingeniería. *Revista de investigación forestal*, 629-636.
- A. Nogueira, M., Almeida, D., Vasconcelos, J., Almeida, T., Araújo, V., Christoforo, A., & Rocco Lahr, F. (2018). Properties of Eucalyptus umbra Wood for Timber Structures. *International Journal of Materials Engineering*.
- Amoah, M., & Inyong, S. (2019). Comparison of some physical, mechanical and anatomical properties of smallholder plantation teak (*Tectona grandis* Linn. f.) from dry and wet localities of Ghana. *J Indian Acad Wood Sci*, 125-138.
- André L., C., Aftimus, B., Machado, G., Panzera, T., & R. Lahr, F. (2017). Physico-mechanical characterization of the *Anadenanthera colubrina* wood specie. *engenharia agricola*.
- Arroyo, F., Lopez Silva, D., Panzera, T., Lahr, F., & André L., C. (2017). Full characterization of *calycophyllum multiflorum* wood specie. *Engenharia Agricola*, 637-643.
- Askeland, D., Fulay, P., & Wright, W. (2012). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Mexico DF: Cengage Learning, INC.

- Asociación colombiana de ingeniería sísmica. (1997). Reglamento colombiano de construcción sismoresistente NRS-10; título G- estructuras de madera y estructuras de guadua. Bogotá, Colombia.
- ASTM, I. (2017). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. *Designation: D143 – 14*. United States: ASTM.
- Beer, F., & Russell Johnston, E. (2010). *Mecánica vectorial para ingenieros estática*. Mexico: McGraw Hill.
- Betancur Salgado, C., Herrera B., J., & Mejía Mesa, C. (2000). Estudio de las propiedades físicas y mecánicas, trabajabilidad y secado de la Teca (*Tectona grandis* L.f) de Puerto Libertador (Córdoba). 913-939.
- Bhat, K., & Priya, P. (2004). Influence of provenance variation on wood properties of Teak from the western ghat region in India. *IAWA Journal*, 273-282.
- Blanco-Flórez, J., Fernando-Trugilho, P., Tarcisio-Lima, J., Gherardi-Hein, P. R., & Moreira da Silva, J. R. (2014). Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil. *Madera y bosques*, 11-20.
- Calvo, C., Cotrina, A. D., Cuffre, A. G., Ott, M., Piter, J. C., Stefani, C. M., . . . Vivian, A. (2007). Propiedades de hinchamiento y contracción en la madera de *Eucalyptus grandis* de Argentina. *Revista Madeira Arquitetura & Engenharia*.

- Castro, F., & Raigosa, J. (2000). Crecimiento y propiedades Físico-mecánicas de la madera Teca (*Tectona Grandis*) de 17 años de edad en San Joaquín de Abangares, Costa Rica.
- Chaves, E., & Fonseca, W. (1991). *Tectona Grandis L.f especie de arbol de uso multiple en America Central*. Turrialba, Costa Rica: CATIE/ROCAP.
- Coronel, E. (1994). *Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas*. Santiago del Estero.
- Crespo Gutiérrez, R., Jiménez Romero, E., Suatunze Cunuhay, P., Law Blanco, G., & Sanchez Fonseca, C. (2008). Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera Teca (*Tectona grandis L.F.*) de Quevedo y Balzar. *Ciencia y tecnología* 1, 55-63.
- de Almeida, D., de Almeida, T., Christoforo, A., Lima, T., & Lahr, F. (2018). Physical and mechanical properties of tatajuba wood specie (*Bagassa guianensis*) from two different Brazilian regions. *Revista Materia*.
- do Nascimento, M., de Almeida, D., de Almeida, T., Christoforo, A., & Rocco Lahr, F. (2018). Propiedades físicas y mecánicas de la madera de Sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.). *Revista de ciencia y tecnología*, 1-5.
- Dong, Y., Yan, Y., Wang, K., Li, J., Zhang, S., Xia, C., . . . Cai, L. (2016). Improvement of water resistance, dimensional stability, and mechanical properties of poplar wood by rosin impregnation. *European Journal of Wood and Wood Products*, 177-184.

- Escobar, O., Ricardo Rodriguez, J., & Correa, J. (n.d.). Conceptos básicos sobre la resistencia de las maderas. Antioquia-Choco, Colombia: Centro Colombo Canadiense de la madera.
- Hein, P., & Brancheriau, L. (2018). Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of Eucalyptus specimens. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 333-342.
- Hounlonon, M., Kouchade, C., & Kounouhewa, B. (2017). Propriétés physiques et mécaniques du bois de teck de provenances tanzanienne et locale au Bénin. *Bois et Forêts des Tropiques*.
- Igartúa, D., Moreno, K., Piter, J., & Monteoliva, S. (2016). Density and mechanical properties of Argentinean Acacia melanoxyton. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 809-820.
- Kotlarewski, N., Belleville, B., Gusamo, B., & Ozarska, B. (2016). Mechanical properties of Papua New Guinea balsa wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 83-89.
- Lexis/22 vox*. (1980). Valencia: Biblograf S.A.
- Machuca-Velasco, R., de la Rosa, A., Corona-Ambriz, A., Zaragoza-Hernández, I., & Arreola-Avila, J. (2017). Xilotecnia of the wood of Acacia schaffneri from the state of Hidalgo, Mexico. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 293-308.

MADERERO, D. (2018, septiembre 23). *Teca*. Retrieved from Forestal maderero:
<https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/teca.html>

Méndez Mejía, L. D. (2016). "Efectos del termotratamiento sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas en la madera de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* proveniente de plantaciones forestales". Cartago, Costa Rica.

Miranda, I., Sousa, V., & Pereira, H. (2011). Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. *J wood sci*, 171-178.

Morales, R. d. (2013). *Las plantaciones de teca en Latino America: Mitos y realidades*. Tutrialba, Costa Rica.

Muñoz-Acosta, F., & Moreno-Pérez, P. (2013). Contracciones y propiedades físicas *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L. f. y *Terminalia amazonia* A. Chev, maderas de plantacion en Costa Rica. *RCHSCFA*.

Nájera-Luna, J. A., Vargas-Antonio, Z., Méndez-González, J., & Graciaro-Luna, J. D. (2005). PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA EN *Quercus laeta* Liemb. DE EL SALTO, DURANGO. *Ra Ximhai*, 559-576.

NSR-10 | *Camacol*. (n.d.). Retrieved from
<https://web.archive.org/web/20131203020233/http://camacol.co/informacion-tecnica/nsr-10>

Percin, O., Peker, H., & Atilgan, A. (2016). The effect of heat treatment on the some physical and mechanical properties of beech (*Fagus orientalis lipsky*) wood. *wood Research*.

R. (2017, junio 28). *Clasificación de la madera por su densidad*. Retrieved from <https://instalaciondetarimas.com/blog/2017/04/21/la-clasificacion-de-la-madera-por-su-densidad/>

Revista digital para profesionales de la enseñanza. (2011, julio). Andalucía.

Rivero Moreno, J., & Moya Roque, R. (2006). Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (Teca) proveniente de una plantación de ocho años de edad de Cochabamba, Bolivia. *Revista Forestal*.

Rodríguez Anda, R., Zamora Natera, J. F., Silva Guzman, J. A., Salcedo Pérez, E., & Fuentes Tavalera, F. J. (2014, junio 17). Propiedades físico-mecánicas de la madera Teca de plantaciones comerciales. Guadalajara.

Rodríguez Anda, R., Zamora Natera, J., Silva Guzmán, J., Salcedo Pérez, E., & Fuentes Tavalera, F. (2014). propiedades físico-mecánicas de madera Teca de plantaciones comerciales. *Revista mexicana de ciencias forestales*.

Santos Souza, R. (2019). Propiedades tecnológicas de la *Tectona grandis* proveniente de sitios distintos. Brasília, Brasil.

Sonderegger, W., Kránitz, K., Bues, C.-T., & Niemz, P. (2015). Aging effects on physical and mechanical properties of spruce, fir and oak wood.

- teak, the wood Database - Lumber Identification (hardwood)*. (2017, septiembre 14). Retrieved from <https://www.wood-database.com/teak/>
- Telles Antonio, R., Najera Luna, J., Alanís Rodríguez, E., Aguirre Calderon , O., Jimenez Pérez, J., Gómez cárdenas, M., & Muños Flores, H. (2017). Propiedades físico-mecánicas de la madera *Tectona grandis* L. f. de una plantación comercial en el estado de Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 37-56.
- Tiempo, R. (2010, marzo 27). *Lista nueva norma sismorresistente*. Retrieved from <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-3899202>
- Valero, S. W., Reyes C., E. C., & Garay J., D. A. (2005). Estudio de las propiedades físico-mecánicas de la especie *Tectona grandis*, de 20 años de edad, proveniente de las plantaciones de la unidad experimental de la reserva . *REVISTA FORESTAL VENEZOLANA*, 61-73.
- Van Duong, D., & Matsumura, J. (2018). Transverse shrinkage variations within tree stems of *Melia azedarach* planted in northern Vietnam. *Journal of Wood Science*, 720-729.
- Walker, J. (2006). *Primary Wood Processing Principles and Practice, 2nd edition*. Springer.
- Zahabu, E., Raphael, T., Omari Chamshama, S. A., Iddi, S., & Malimbwi, R. E. (2015). Effect of Spacing Regimes on Growth, Yield, and Wood Properties of *Tectona grandis* at Longuza Forest Plantation, Tanzania. *International Journal of Forestry Research*.

