

## Relationship of the cellular structure of teak wood (*Tectona grandis* L. f.) with different ages and growth sites

## Relación de la estructura celular de la madera de teca (*Tectona grandis* L. f.) con diferentes edades y sitios de crecimiento

Raúl Rodríguez-Anda\*; Francisco J. Fuentes-Talavera; José A. Silva-Guzmán; Hilda Palacios-Juárez; José Turrado-Saucedo

Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Departamento de Madera, Celulosa y Papel. km 15.5 carretera Guadalajara-Nogales, predio Las Agujas. C. P. 45020. Zapopan, Jalisco, México.

\*Corresponding author: rrodrigu@dmcyp.cucei.udg.mx, tel.: +52 (33) 3682 0110 ext. 221.

### Abstract

**Introduction:** The cellular characteristics of wood determine the conditions of processing and use of forest species

**Objective:** To study the variation of the anatomical characteristics in the internal and external part of the heartwood of *Tectona grandis* L. f. with different ages and origins.

**Materials and methods:** Trees from Campeche (9 and 15 years old), Tabasco (15 years old) and Chiapas (21 years old) were selected. Cuttings (10 and 20  $\mu\text{m}$  thick) of the anatomical faces (transversal, radial and tangential) of the wood were made and were observed using a clear field microscope. The images were captured with Matrox PC-VCR version 02.10.10. The cellular elements were measured using the ArcView GIS 3.2.

**Results and discussion:** Teak wood had 6 to 8 vessels- $\text{mm}^2$ . Wood (9 and 15 years old) from Campeche had the largest vessels diameter on the inside and outside of the heartwood; in its internal part, it had the largest ray width. In both parts of the heartwood, 9-year-old-wood from Campeche had higher ray height; 21-year-old wood from Chiapas had greater length and diameter of fibers; and 15-year-old wood from Tabasco produced the largest wall thickness of fibers.

**Conclusions:** Age and origin affect the cellular structure of teak wood.

**Keywords:** Vessels, medullary rays, fibers, cell wall, wood anatomy, heartwood.

### Resumen

**Introducción:** Las características celulares de la madera determinan las condiciones de procesamiento y uso de las especies forestales.

**Objetivo:** Estudiar la variación de las características anatómicas en la parte interna y externa del duramen de *Tectona grandis* L. f. de diferentes edades y procedencias.

**Materiales y métodos:** Se seleccionaron árboles de Campeche (9 y 15 años), Tabasco (15 años) y Chiapas (21 años). Se hicieron cortes (10 y 20  $\mu\text{m}$  de espesor) de las caras anatómicas (transversal, radial y tangencial) de la madera y se observaron en microscopio de campo claro. Las imágenes se capturaron con el software Matrox PC-VCR versión 02.10.10. Los elementos celulares se midieron con el software ArcView GIS 3.2.

**Resultados y discusión:** La madera de teca tuvo de 6 a 8 vasos- $\text{mm}^2$ . La madera de Campeche (9 y 15 años) presentó el mayor diámetro de vasos en la parte interna y externa del duramen; en su parte interna, tuvo el mayor ancho de radios. En ambas partes del duramen, la madera de 9 años de Campeche tuvo mayor altura de radios; la madera de Chiapas de 21 años presentó mayor longitud y diámetro de fibras; y la madera de 15 años de Tabasco produjo el mayor espesor de pared de fibras.

**Conclusiones:** La edad y procedencia inciden sobre la estructura celular de la madera de teca.

**Palabras clave:** Vasos, radios medulares, fibras, pared celular, anatomía de la madera, duramen.

## Introduction

Teak wood (*Tectona grandis* L. f.) is known in the international market due to its natural durability (Class 1), dimensional stability, physical-mechanical properties and aestheticity (Silva et al., 2010; Upadhyay, Eid, & Sankhayan, 2005). Although Mexico does not have official statistical information on teak plantations, production and quality of its wood, interest in this species is growing. This has motivated the establishment of commercial plantations, of which, the majority is between 9 to 20 years old. The states reported with teak plantations are: Campeche, Colima, Chiapas, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luís Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz and Yucatán (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016).

In general terms, wood is made up of different cellular structures that, depending on the configuration, perform specific functions in the plant. The study of the structure of wood is a starting point for several studies with which it is intended to know the functioning, associative behavior and relationship with the environment (Bhat & Priya, 2004; Kang, Zhang, & Mansfield, 2004; Verheyden, De Ridder, Schmitz, Beeckman, & Koedam, 2005). Wood has variations, especially when considering the origin, age and quality of the site (Richter et al., 2003; Thulasidas & Bhat, 2012). Some studies indicate that the quality of wood from plantations has differences in heartwood coloring and mechanical properties, compared to that from natural forests (Richter, Leithoff, & Sonntag, 2003; Zobel, 1984).

The precise knowledge of the characteristics of the wood cell types allows to determine the conditions of processing and more pertinent use of forest species. In this context, the objectives of the present study were to describe the organoleptic properties of teak wood and determine the main anatomical characteristics of the inner and outer part of the heartwood, according to age and growth site.

## Materials and methods

### Selection and collection of samples

A total of ten trees were randomly selected and felled according to the group of origin and age: Campeche (9 and 15 years), Tabasco (15 years) and Chiapas (21 years), obtaining a total of 40 samples. Table 1 describes the climatic conditions of the sampling sites and the characteristics of the plantation.

The organoleptic and anatomical characteristics of teak wood heartwood were determined in slices obtained

## Introducción

La madera de teca (*Tectona grandis* L. f.) es conocida en el mercado internacional por su durabilidad natural (Clase 1), estabilidad dimensional, propiedades físico-mecánicas y esteticidad (Silva et al., 2010; Upadhyay, Eid, & Sankhayan, 2005). Aunque en México no se cuenta con información estadística oficial sobre las plantaciones de teca, producción y calidad de su madera, el interés en esta especie es creciente. Esto ha motivado el establecimiento de plantaciones comerciales, de las cuales, la mayoría se encuentra entre los 9 a 20 años de vida. Los estados reportados con plantaciones de teca son: Campeche, Colima, Chiapas, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luís Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016).

En términos generales, la madera está constituida por diferentes estructuras celulares que, dependiendo de su configuración, realizan funciones específicas en la planta. El estudio de la estructura de la madera constituye un punto de partida para diversas investigaciones con las que se pretende conocer el funcionamiento, comportamiento asociativo y relación con el medio ambiente (Bhat & Priya, 2004; Kang, Zhang, & Mansfield, 2004; Verheyden, De Ridder, Schmitz, Beeckman, & Koedam, 2005). La madera posee variaciones, especialmente cuando se considera la procedencia, edad y calidad de sitio (Richter et al., 2003; Thulasidas & Bhat, 2012). Algunos estudios indican que la calidad de madera proveniente de plantaciones tiene diferencias en la coloración del duramen y sus propiedades mecánicas, comparada con la procedente de bosques naturales (Richter, Leithoff, & Sonntag, 2003; Zobel, 1984).

El conocimiento preciso de las características de los tipos celulares de la madera permite determinar las condiciones de procesamiento y uso más pertinente de las especies forestales. Ante este contexto, los objetivos del presente estudio fueron describir las propiedades organolépticas de la madera de teca y determinar las principales características anatómicas de la parte interna y externa del duramen, en función de la edad y sitio de crecimiento.

## Materiales y métodos

### Selección y colecta de especímenes

Se seleccionaron y derribaron 10 árboles de forma aleatoria por procedencia y grupo de edad: Campeche (9 y 15 años), Tabasco (15 años) y Chiapas (21 años), obteniendo un total de 40 ejemplares. El Cuadro 1 describe las condiciones climáticas de los sitios de muestreo y las características de la plantación.

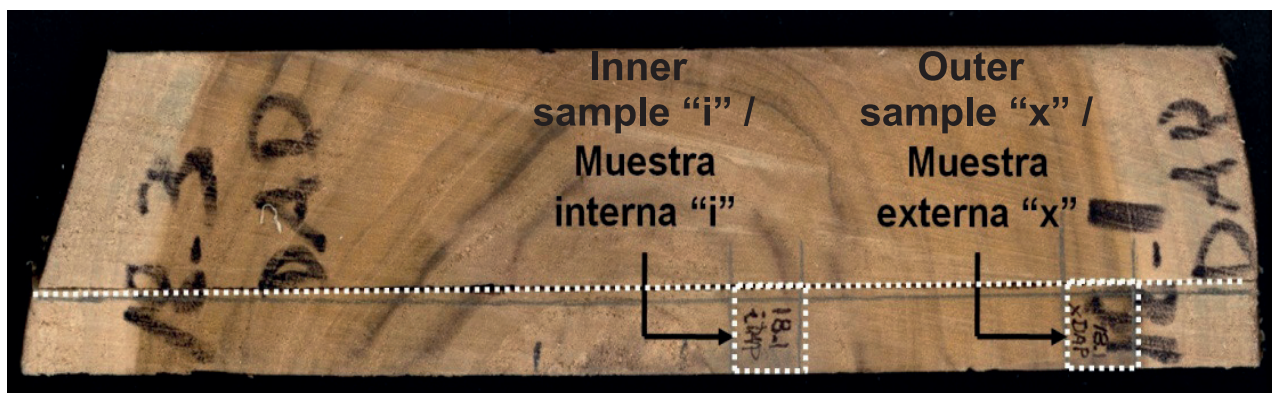
at diameter at breast height. A strip of 1.5 cm wide was cut radially in the center of the slice, along the transverse side. A sample (1.5 x 1.5 cm) was taken in the inner part of the heartwood located just to the first growth ring posterior to the medulla, which was called "i". The second sample was extracted from the outer part of the heartwood, in the limit with the sapwood, which was called "x", as shown in Figure 1.

Las características organolépticas y anatómicas del duramen de la madera de teca se determinaron en rodajas obtenidas a la altura de diámetro normal. Una franja de 1.5 cm de ancho se cortó radialmente en el centro de la rodaja, a lo largo de la cara transversal. Se tomó una muestra (1.5 x 1.5 cm) en la parte interna del duramen ubicada justo al primer anillo de crecimiento posterior a la médula, la cual se denominó "i". La

**Table 1. Characteristics of teak (*Tectona grandis*) sampling sites, to analyze the relationship of the cellular structure of wood with different ages and origins.**

**Cuadro 1. Características de los sitios de muestreo de teca (*Tectona grandis*), para analizar la relación de la estructura celular de la madera con edades y procedencias diferentes.**

Sampling site / Sitio de muestreo	Climate / Clima	Annual average precipitation (mm) / Precipitación media anual (mm)	Annual average temperature (°C) / Temperatura media anual (°C)	Type of soil / Tipo de suelo	Tree age (years) / Edad del arbolado (años)	Diameter at breast height (cm) / Diámetro normal (cm)	Tree height (m) / Altura del arbolado (m)
Campeche 19° 44' 55.85" N 90° 10' 44.85" O	Warm subhumid / Cálido subhúmedo	1 300 - 1 500	24 - 28	Orthic Solonchak / Solonchak órtico	9	20	15
					15	32	17
Chiapas 17° 38' 50.58" N 91° 40' 27.67" O	Warm wet / Cálido húmedo	2 000 - 2 500	26	Pelvic Vertisol / Vertisol pélico	21	33	25
Tabasco 17° 52' 29.55" N 91° 18' 28.89" O	Warm subhumid / Cálido subhúmedo	1 500 - 2 000	26 - 28	Cambisol eutric / Cambisol eútrico	15	27	14



**Figure 1. Sampling for the anatomical determination of *Tectona grandis* wood.**

**Figura 1. Toma de muestras para la determinación anatómica de la madera de *Tectona grandis*.**

The organoleptic description of wood was made according to that described by Burger and Richter (1991). The cell elements were described as stipulated by the International Association of Wood Anatomists (IAWA, 1989).

For the study of the cell structure, the samples were softened for 6 h using boiling water. Cuts between 10 and 20  $\mu\text{m}$  of thickness of each of the anatomical faces (transversal, radial and tangential) were made with a sliding microtome (Microtomo American Optical model 860, USA) (Burger & Richter, 1991). The slices were observed in a light field microscope (Wild Heerbrugg model M-12 83632, Switzerland) with a video camera attached (Hitachi KP-D51 color, Japan), making 30 measurements per character. The images of the histological sections were captured with Matrox PC-VCR version 02.10.10 (Matrox Graphics Inc. 2002). The cell elements were measured with ArcView GIS 3.2 (Environmental System Research Institute, Inc., 1999).

For the individual measurement of the length and thickness of the fiber cell wall, of the internal "i" and external "x" of the heartwood, splinters were dissociated in a test tube with Franklin's solution (1:2 glacial acetic acid and 30 % hydrogen peroxide) in a water bath at  $60 \pm 5$  °C, until they were soft and whitish. Subsequently, water was added to the tubes, then shaken and decanted, until the reagents used were eliminated. Finally, a double stain with safranin "O" and astral blue was made (Burger & Richter, 1991).

The statistical analysis was performed with STATGRAPHICS® Centurion XV version 15.2.06 (StatPoint Inc., 2007). A unifactorial analysis of variance was carried out, both for age and origin, and multiple range tests of Fischer LSD to establish the statistically significant differences ( $P < 0.05$ ).

## Results and discussion

### Qualitative characteristics of wood

*Tectona grandis* wood has growth rings with well-defined limits; brown to yellow (golden brown) heartwood with pronounced veins; yellowish cream sapwood, different from the heartwood color; greasy surface to the touch and rubber odor. The growth ring is demarcated by the presence of larger vessels (Figure 2A1) and marginal parenchyma (Figure 2A2). The wood has annular or semi-annular porosity with solitary vessels (Figure 2A3) and in groups of two to three (Figure 2A4), arranged in a radial pattern. The perforation plates are simple.

The tyloses in the vessels are thin-walled (Figure 2A5). The intervessel pits are alternate, with a diameter (vertical) of 5 to 6  $\mu\text{m}$  and ornamented; vessel-ray pits

segunda muestra se extrajo de la parte externa del duramen, en el límite con la albura, la cual se denominó "x", tal como se muestra en la Figura 1.

La descripción organoléptica de la madera se realizó de acuerdo con lo descrito por Burger y Richter (1991). Los elementos celulares se describieron conforme a lo estipulado por la International Association of Wood Anatomists (IAWA, 1989).

Para el estudio de la estructura celular, los especímenes se ablandaron durante 6 h en agua a ebullición. Se realizaron cortes entre 10 y 20  $\mu\text{m}$  de espesor de cada una de las caras anatómicas (transversal, radial y tangencial) con un microtomo de deslizamiento (Microtomo American Optical modelo 860, USA) (Burger & Richter, 1991). Los cortes se observaron en microscopio de campo claro (Wild Heerbrugg modelo M-12 83632, Suiza) con cámara de video acoplada (Hitachi KP-D51 color, Japón), realizando 30 mediciones por carácter. Las imágenes de los cortes histológicos se capturaron con el software Matrox PC-VCR versión 02.10.10 (Matrox Graphics Inc., 2002). Los elementos celulares se midieron con el software ArcView GIS 3.2 (Environmental System Research Institute, Inc., 1999).

Para la medición individual de longitud y espesor de la pared celular de las fibras, de la parte interna "i" y externa "x" del duramen, se disociaron astillas en un tubo de ensayo con solución de Franklin (1:2 ácido acético glacial y peróxido de hidrógeno al 30 %) en baño María a  $60 \pm 5$  °C, hasta que estuvieran suaves y blanquecinas. Posteriormente se añadió agua a los tubos, se agitaron y decantaron, hasta eliminar los reactivos empleados. Finalmente, se hizo una tinción doble con safranina "O" y azul astral (Burger & Richter, 1991).

El análisis estadístico se realizó con el paquete STATGRAPHICS® Centurion XV versión 15.2.06 (StatPoint Inc., 2007). Se hizo un análisis de varianza unifactorial, tanto para edad como para procedencia, y pruebas de rangos múltiples media de Fischer LSD para establecer las diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.05$ ).

## Resultados y discusión

### Características cualitativas de la madera

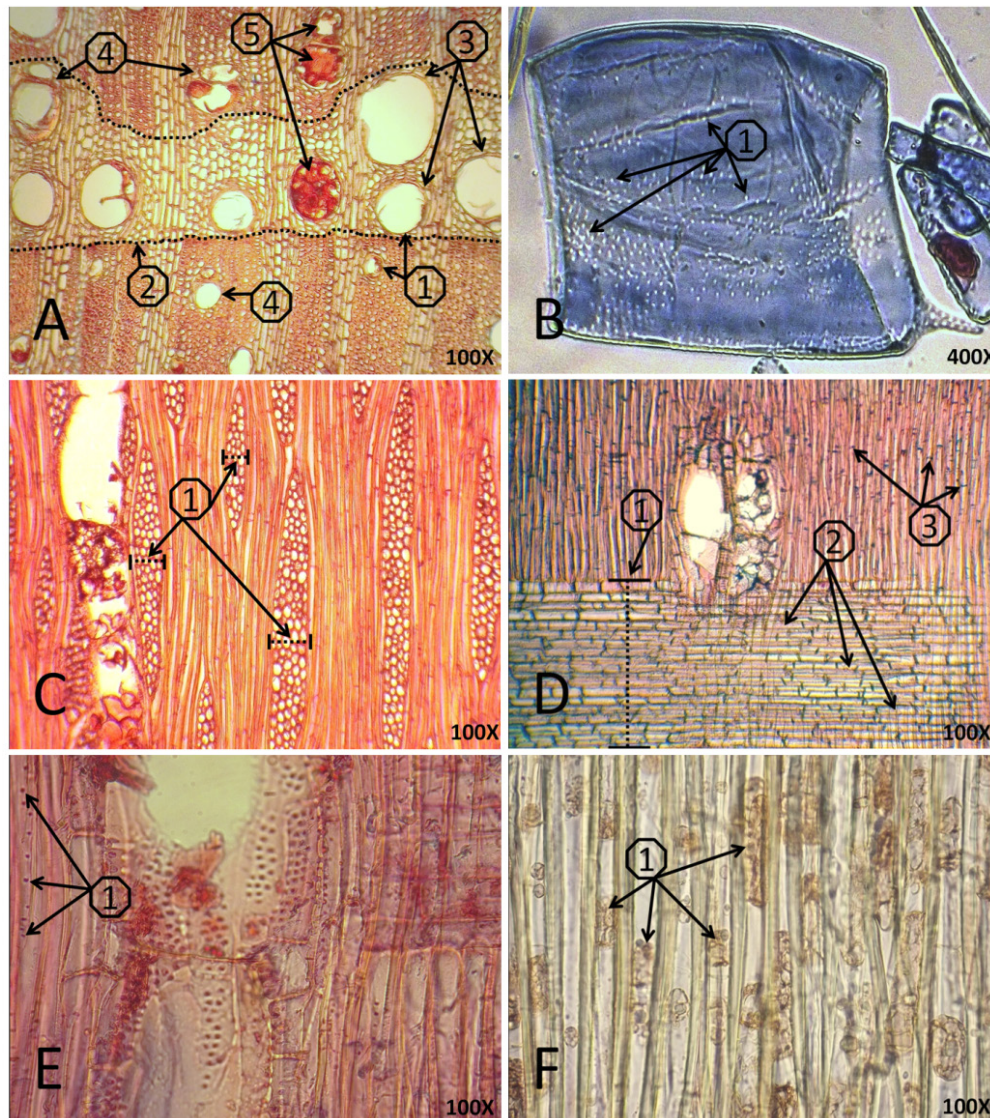
La madera de *T. grandis* tiene anillos de crecimiento con límites bien definidos; duramen de color café al amarillo (marrón dorado) con vetas pronunciadas; albura de color crema amarillenta, distinto del color del duramen; superficie grasienta al tacto y olor característico de hule. El anillo de crecimiento está demarcado por la presencia de vasos de mayor tamaño (Figura 2A1) y parénquima marginal (Figura 2A2).



have distinct borders, similar to intervessel pits (Figure 2B1). Early wood has scanty vasicentric paratracheal axial parenchyma. The multiseriate rays have (2-)3-4(-5) wide cells (Figure 2C1); the homocellular rays (Figure 2D1) are composed of a single cell type (procumbent, Figure 2D2). There are vascular or vasicentric tracheid commonly present, only in latewood. The fibers have uniformly distributed septa (Figure 2D3). The fiber pits, for the most part, are restricted to radial walls, simple or with tiny borders (Figure 2E1). The lumen contains clear, almost transparent, organic substances in the form of small droplets (Figure 2F1).

La madera tiene porosidad anular o semianular con vasos solitarios (Figura 2A3) y en grupos de dos a tres (Figura 2A4), dispuestos en patrón radial. Las placas de perforación son simples.

Las tílides en los vasos son de paredes finas (Figura 2A5). Las punteaduras intervaseculares son alternas, con diámetro (vertical) de 5 a 6  $\mu\text{m}$  y ornamentadas; las punteaduras radiovasculares tienen aréolas distintas, similares a las punteaduras intervaseculares (Figura 2B1). La madera temprana tiene parénquima axial paratraqueal vasicéntrico escaso. Los radios



**Figure 2.** A) 1. Difference in size of growth ring vessels, 2. Marginal parenchyma (between dotted lines), 3. Early wood with uniseriate vessel ring, 4. Vessels in groups of two to three, 5. Tyloses; B) 1. Intervessel pits; C) 1. Multiseriate rays and number of cells in width; D) 1. Homocellular rays, 2. Procumbent cells, 3. Septate fibers; E) 1. Fiber pits; F) 1. Organic content.

**Figura 2.** A) 1. Diferencia del tamaño de vasos en anillo de crecimiento, 2. Parénquima marginal (entre las líneas punteadas), 3. Madera temprana con anillo de vasos uniseriados, 4. Vasos en grupos de dos a tres, 5. Tílides; B) 1. Punteaduras intervaseculares; C) 1. Radios multiseriados y número de células de ancho; D) 1. Radios homocelulares, 2. Células procumbentes, 3. Fibras septadas; E) 1. Punteaduras de las fibras; F) 1. Contenido orgánico.

## Quantitative characteristics of wood

### Number of vessels per square millimeter

The results of the number of vessels per square millimeter are shown in Table 2. Although the difference is minimal between the internal and external part, the sum of vessels across the width of the heartwood is important. The wood of 9 year-old-trees had the lowest number of vessels in the external part of the heartwood; after 15 years, the quantity tends to be uniform, so it can be deduced that age has an important influence on this variable. The inner part of the heartwood, regardless of age, tends to generate more vessels than the external part. Apparently, in the internal part, the diameter of the trunk plays an important role in the generation of vessels, since the number decreased as the diameter at breast height increased. Rahman, Fujiwara, and Kanagawa (2007) mention that the number of vessels, together with the proportion of medullary rays, have an important relationship with the density of the wood.

The quantity of the Mexican production of teak vessels is within the ranges reported in other parts of the world. Josue and Imiyabir (2011) indicate average values of 6 in ranges of 2 to 12 vessels·mm<sup>2</sup> for early wood, and 8 in ranges of 4 to 15 vessels·mm<sup>2</sup> for 15 year-old-latewood trees from Sabah, Malaysia. On the other hand, Moya, Berrocal, Serrano, and Tomazello (2009) counted 2 to 10 vessels·mm<sup>2</sup> in 13-year-old teak, from Costa Rica.

Bhat, Priya, and Rugmini (2001) assert that trees subjected to high growth stress (slow growth) tend to produce more vessels compared to low stress trees and also point out that irrigation increases the diameter of these. These authors also conclude that the cambium activity may be greater in the early stages of plant development, generating more vessels, which tend to decrease or become uniform as the age of the tree increases up to a certain period. These authors also conclude that the cambium activity may be greater in the early stages of plant development, generating more vessels, which tend to decrease or become uniform as the age of the tree increases up to a certain period.

### Vessels diameter

Table 2 shows the results of vessel diameter. In this characteristic, origin influenced more than age. The results show that the diameter of the vessels was greater in the outer part than in the inner part of the heartwood, with significant statistical difference ( $P < 0.05$ ) between both areas as shown in Table 3.

multiseriados tienen (2–)3–4(–5) células de ancho (Figura 2C1); los radios homocelulares (Figura 2D1) están compuestos por un solo tipo de células (procumbentes, Figura 2D2). Hay traqueídas vasculares o vasicéntricas comúnmente presentes, solamente en la madera tardía. Las fibras tienen septas distribuidas uniformemente (Figura 2D3). Las punteaduras de las fibras, en su mayoría, están restringidas a las paredes radiales, simples o con aréolas minúsculas (Figura 2E1). El lumen contiene sustancias orgánicas de color claro, casi transparente, en forma de pequeñas gotas (Figura 2F1).

## Características cuantitativas de la madera

### Número de vasos por milímetro cuadrado

Los resultados de la cantidad de vasos por milímetro cuadrado se muestran en el Cuadro 2. Si bien la diferencia es mínima entre la parte interna y externa, la suma de vasos a lo ancho del duramen es importante. La madera de árboles de 9 años presentó el menor número de vasos en la parte externa del duramen; después de los 15 años, la cantidad tiende a uniformizarse, por lo que se deduce que la edad influye de manera importante en esta variable. La parte interna del duramen, sin importar la edad, tiende a generar mayor cantidad de vasos que la externa. Al parecer, en la parte interna, el diámetro de los fustes juega un rol importante en la generación de vasos, ya que el número disminuyó conforme el diámetro normal aumentó. Rahman, Fujiwara, y Kanagawa (2007) mencionan que la cantidad de vasos, junto con la proporción de radios medulares, tienen una relación importante con la densidad de la madera.

La cantidad de vasos de la teca de producción mexicana se encuentra dentro de los intervalos reportados en otras partes del mundo. Josue e Imiyabir (2011) indican valores promedios de 6 en rangos de 2 a 12 vasos·mm<sup>2</sup> para madera temprana, y de 8 en rangos de 4 a 15 vasos·mm<sup>2</sup> para madera tardía de árboles de 15 años procedentes de Sabah, Malasia. Por otro lado, Moya, Berrocal, Serrano, y Tomazello (2009) contabilizaron de 2 a 10 vasos·mm<sup>2</sup> en madera de teca de 13 años, procedente de Costa Rica.

Bhat, Priya, y Rugmini (2001) aseveran que los árboles sometidos a alto estrés de crecimiento (crecimiento lento) tienden a producir mayor cantidad de vasos comparados con los de bajo estrés y señalan, además, que la irrigación incrementa el diámetro de estos. Dichos autores también concluyen que la actividad del cámbium puede ser mayor en las primeras etapas de desarrollo de la planta, generando mayor cantidad de vasos, los cuales tienden a disminuir o a uniformizarse conforme la edad del árbol incrementa hasta cierto periodo.

Table 2. Unifactorial analysis of the anatomical properties of teak wood (*Tectona grandis*) with different ages and origins.  
Cuadro 2. Análisis unifactorial de las propiedades anatómicas de la madera de teca (*Tectona grandis*) con diferentes edades y procedencias.

Origin, age and DAP/ Procedencia, edad y DN	Vessels·mm <sup>-2</sup> / Vasos·mm <sup>-2</sup>		Vessels diameter (µm) / Diámetro de vasos (µm)		Ray width (µm) / Ancho de radios (µm)		Ray Height (µm) / Altura de radios (µm)		Fiber length (µm) / Longitud de fibra (µm)		Wall thickness (µm)/Espesor de pared (µm)		Fiber diameter (µm)/ Diámetro de fibras (µm)	
	Inner/ Int	Outer/ Ext	Inner/ Int	Outer/ Ext	Inner/ Int	Outer/ Ext	Inner/ Int	Outer/ Ext	Inner/ Int	Outer/ Ext	Inner/ Int	Outer/ Ext	Inner/ Int	Outer/ Ext
Campeche: 9 years, DAP = 20 cm/ Campeche: 9 años, DN = 20 cm	8	6	121.1 a	127.8 a	71.3 a	73.1 b	702.9 b	685.8 b	811.4 a	941.3 a	2.0 a	2.8 a	27.0 b	26.7 a
Campeche: 15 years, DAP = 32 cm/ Campeche: 15 años, DN = 32 cm	7	7	117.3 a	127.3 a	69.9 a	64.2 a	561.2 a	600.2 b	924.1 b	1 133.5 c	3.1 b	3.6 b	25.3 a	27.0 a
Chiapas: 21 years, DAP = 33 cm/ Chiapas: 21 años, DN = 33 cm	7	7	104.3 b	122.2 b	64.3 b	67.6 a	551.9 a	570.8 a	1 036.2 c	1 168.2 c	3.2 b	3.7 b	27.6 b	30.4 b
Tabasco: 15 years, DAP = 27 cm/ Tabasco: 15 años, DN = 27 cm	8	7	109.2 b	120.5 b	64.2 b	76.0 b	539.8 a	566.6 a	910.4 b	1 053.1 b	3.6 c	4.3 c	25.9 a	26.8 a
Population /Poblacional	8	7	112.3	124.2	67.5	70.1	583.3	603.3	917.9	1 069.3	3.0	3.6	26.5	27.8
Internal and external population / Poblacional interno y externo		7	118.2		68.8		593.3		993.6		3.3			27.13

DAP = Diameter at breast height. Different letters per column indicate statistically significant differences according to the Fischer LSD average multiple range test ( $P < 0.05$ ).

Int = Interno, Ext = Externo, DN = Diámetro normal. Letras diferentes por columna indican diferencias estadísticamente significativas de acuerdo con la prueba de rangos múltiples media de Fischer LSD ( $P < 0.05$ ).



**Table 3. Comparison of the anatomical elements in the internal and external area of teak (*Tectona grandis*) heartwood with different ages and origins.**

**Cuadro 3. Comparación de los elementos anatómicos en la zona interna y externa del duramen de la madera de teca (*Tectona grandis*) con diferentes edades y procedencias.**

Characteristics/ Característica	Area/ Zona	Campeche (9 year-old)/ Campeche (9 años)	Campeche (15 year-old)/ Campeche (15 años)	Chiapas (21 year-old)/ Chiapas (21 años)	Tabasco (15 year-old)/ Tabasco (15 años)	Population/ Poblacional	Inner and outer population/ Poblacional Int y Ext
Vessels·mm <sup>2</sup> / Vasos·mm <sup>2</sup>	Inner/Int	8	7	7	8	8	7
	Outer/Ext	6	7	7	7	7	
Vessel diameter (µm)/ Diámetro de vasos (µm)	Inner	121.08 a	117.26 a	104.33 a	109.19 a	112.28 a	118.25
	Outer/Ext	127.85 b	127.29 b	122.16 b	120.46 b	124.22 b	
Ray width (µm) / Ancho de radios (µm)	Inner/Int	71.26 a	69.89 a	64.34 a	64.23 a	67.48 a	68.81
	Outer/Ext	73.15 b	64.16 b	67.65 b	76.02 b	70.14 b	
Ray height (µm) / Altura de radios (µm)	Inner/Int	702.97 a	561.25 a	551.92 a	539.83 a	583.29 a	593.28
	Outer/Ext	685.83 a	600.19 b	570.76 a	566.61 a	603.28 b	
Fiber length (µm) / Longitud de fibras (µm)	Inner/Int	811.39 a	924.13 a	1 036.21 a	910.38 a	917.99 a	993.62
	Outer/Ext	941.28 b	1 133.48 b	1 168.21 b	1 053.10 b	1 069.23 b	
Wall thickness (µm) / Espesor de pared (µm)	Inner/Int	2.02 a	3.08 a	3.21 a	3.64 a	3.04 a	3.32
	Outer/Ext	2.80 b	3.58 b	3.70 b	4.29 b	3.60 b	
Fiber diameter (µm) / Diámetro de fibras (µm)	Inner/Int	27.02 a	25.35 a	27.65 a	25.90 a	26.46 a	27.13
	Outer/Ext	26.75 a	27.05 b	30.39 b	26.83 a	27.81 b	

Different letters per column indicate that there is a significant statistical difference between values of the internal and external part of each variable, based on the multiple range test of Fischer LSD ( $P < 0.05$ ).

Int = Interna; Ext = Externa. Letras diferentes por columna indican que existe diferencia estadística significativa entre valores de la parte interna y externa de cada variable, con base en la prueba unifactorial de rangos múltiples media de Fischer LSD ( $P < 0.05$ ).



On the other hand, Table 2 shows certain relationship between the number of vessels per square millimeter and diameter, showing that as the number of vessels increases, the diameter tends to decrease, keeping a balance between both components. Bhat et al. (2001) analyzed teak wood from three localities of Kerala (India) and found that the diameter of vessels increases until the age of 20 years, after that, there is a slight decrease until 25 years and then tends to uniformity. These authors obtained vessel diameters with variations from 177 to 186  $\mu\text{m}$ , for fast-growing wood, and 162 to 177  $\mu\text{m}$ , for slow-growing wood. Moya et al. (2009) reported that the diameter of vessels (100 to 195  $\mu\text{m}$ ) increased with age, in 13-year-old teak trees from two regions in Costa Rica, and detected an inflection in growth rings between 5 and 7 years. On the other hand, Josue et al. (2011) indicated average values of 228  $\mu\text{m}$  in ranges of 150 to 395  $\mu\text{m}$  for early wood, and 112  $\mu\text{m}$  in ranges of 49 to 289  $\mu\text{m}$  for 15 year-old-late teak wood in Sabah (Malaysia).

The diameter of teak wood vessels from the Mexican southeast is lower than those obtained by the aforementioned researchers. This may be due to different causes, among them, Anish, Annop, Vishnu, Sreejith, and Jijeesh (2015) propose that the dimension of the vessels can be attributed to the variation of the proportion of young and mature wood, and to the variation due to the growth stress as a result of silvicultural practices; they also mentioned that the relationship between tree age and vessel diameter is significant ( $P < 0.05$ ).

#### Ray width

The results of rays' width are shown in Table 2. In contrast, in the external part has not a pattern that defines any trend; 9 year-old trees from Campeche and 15 year-old trees from Tabasco had greater rays width, being statistically equal ( $P > 0.05$ ), while 15 year-old trees from Campeche and 21 year-old trees from Chiapas formed another group. Due to this it is inferred that, in the external zone, neither the age nor the origin influences the rays' width. With respect to the heartwood area, the outer zone exhibited higher values ( $P < 0.05$ ) of rays' width compared to the internal part (Table 3).

Medullary rays' width of teak wood from the Mexican southeast is higher than that reported by other researchers. Rahman et al. (2007) indicated that medullary rays in teak wood from the districts of Sylhet and Rangamti (Bangladesh) were 51 and 59  $\mu\text{m}$ , respectively. Moya, Muñoz, and Berrocal (2010) reported a rays' width of 58  $\mu\text{m}$  with a range of 23 to 112  $\mu\text{m}$ , without mentioning age and origin of wood. Ypushima-Pinedo et al. (2014) determined the rays'

#### Diámetro de vasos

El Cuadro 2 presenta los resultados del diámetro de vasos. En esta característica, la procedencia influyó más que la edad. Los resultados reflejan que el diámetro de vasos fue mayor en la parte exterior que en la parte interna del duramen, existiendo diferencia estadística significativa ( $P < 0.05$ ) entre ambas zonas como se muestra en el Cuadro 3.

Por otra parte, en el Cuadro 2 se observa cierta relación entre la cantidad de vasos por milímetro cuadrado y el diámetro de los mismos, quedando de manifiesto que conforme el número de vasos incrementa, el diámetro tiende a disminuir, guardando un equilibrio entre ambos componentes. Bhat et al. (2001) analizaron la madera de teca de tres localidades de Kerala (India) y encontraron que el diámetro de vasos incrementa hasta la edad de 20 años, posterior a ello, hay un ligero decremento hasta los 25 años y después tiende a la uniformidad. Estos autores obtuvieron diámetros de vasos con variaciones de 177 a 186  $\mu\text{m}$ , para la madera de rápido crecimiento, y de 162 a 177  $\mu\text{m}$ , para la de lento crecimiento. Moya et al. (2009) reportaron que el diámetro de vasos (100 a 195  $\mu\text{m}$ ) incrementó con la edad, en árboles de teca de 13 años de dos regiones en Costa Rica, y detectaron una inflexión en los anillos de crecimiento entre los 5 y 7 años. Por su parte, Josue et al. (2011) indicaron valores promedio de 228  $\mu\text{m}$  en rangos de 150 a 395  $\mu\text{m}$  para madera temprana, y de 112  $\mu\text{m}$  en rangos de 49 a 289  $\mu\text{m}$  para madera tardía de teca de 15 años en Sabah (Malasia). El diámetro de vasos de la madera de teca procedente del sureste mexicano es menor que los obtenidos por los investigadores ya mencionados. Esto quizá se deba a diferentes causas, entre ellas, Anish, Annop, Vishnu, Sreejith, y Jijeesh (2015) proponen que la dimensión de los vasos puede ser atribuida a la variación de la proporción de madera juvenil y madura, y a la variación debido al estrés de crecimiento como resultado de las prácticas silvícolas; también afirman que la relación entre la edad del arbolado y el diámetro de vasos es significativa ( $P < 0.05$ ).

#### Ancho de radios

Los resultados del ancho de radios están indicados en el Cuadro 2. En la parte interna del duramen, los árboles de 9 y 15 años, procedentes de Campeche, fueron los más elevados sin presentar diferencia estadística significativa ( $P > 0.05$ ). El siguiente grupo está formado por los árboles de 21 años de Chiapas y 15 años de Tabasco. Por lo anterior se deduce que, en la parte interna, la procedencia fue más determinante que la edad. En contraste, en la parte externa no existe un patrón que defina alguna tendencia; los árboles de 9 años de Campeche y 15 años de Tabasco tuvieron mayor ancho de radios, siendo estadísticamente iguales

width of 9 year-old wood from Veracruz and Nayarit, with values of 66 and 60  $\mu\text{m}$ , respectively.

The factors that can affect medullary rays' width are several. Rahman et al. (2007) mention that the anatomical structure of rays is an individual characteristic that is not affected by growth rate, and that rays dimension and proportion seem to be under genetic control. In contrast, Anish et al. (2015) indicate that the environment plays an important role in rays' width and height, since a stress medium reduces the growth rate of the cambium. Aloni and Zimmermann (1983) assert that the concentration of auxins, main component that regulates cell divisions of the cambium, decreases when age increases, producing fewer vessels and rays, but with cells with larger diameter and dimensions.

The presence of abundant polyserial medullary rays can have a negative effect on the mechanical properties and tangential contraction of wood (Rahman et al., 2007).

### Rays height

The results of rays' height are shown in Table 2. The statistical analysis shows that age is determinant in rays' height of the inner part of the heartwood, because 9 year-old wood from Campeche had lower height than the rest of ages and origins. However, the behavior of the outer part of the heartwood is different, since the origin was conclusive in rays' height; 9 and 15 year-old trees from Campeche had the highest values and were statistically equal ( $P > 0.05$ ). The height of the medullary rays between the inner and outer part of the heartwood were statistically similar in the samples ( $P > 0.05$ ), except for the 15-year-old wood from Campeche (Table 3).

The influence of the environment and age on rays' height has been recorded by Bhat et al. (2001). These authors mentioned that medullary rays of fast-growing trees are significantly longer than slow-growing ones, since the stress environment reduces the growth rate of the cambium. On the other hand, Anish et al. (2015) indicated that rays' height shows a significant difference ( $P < 0.05$ ) with respect to the age of the trees.

### Fiber length

Fiber length is reported in Table 2. The results show that, at an older age, the length of the fiber tends to increase. Table 3 shows that there are significant differences in fibers length between the inner and outer part of the heartwood. The relationship of length with age has been recorded in different studies; for example, Kokutse, Adjonou, and Kokou (2009) mention that, in young stands, fiber length increases with age; Bhat and Priya (2004) and Thulasidas and Bhat (2012)

( $P > 0.05$ ), mientras que los árboles de 15 años de Campeche y 21 años de Chiapas formaron otro grupo. Debido a ello se infiere que, en la zona externa, ni la edad ni la procedencia influyen sobre el ancho de los radios. Con respecto a la zona del duramen, la zona externa exhibió valores más altos ( $P < 0.05$ ) de ancho de radios que la parte interna (Cuadro 3).

El ancho de radios medulares de la madera de teca del sureste mexicano es superior a los reportados por otros investigadores. Rahman et al. (2007) indicaron que los radios medulares en madera de teca de los distritos de Sylhet y Rangamti (Bangladesh) fueron 51 y 59  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Moya, Muñoz, y Berrocal (2010) reportaron ancho de radios de 58  $\mu\text{m}$  con intervalo de 23 a 112  $\mu\text{m}$  sin mencionar edad y procedencia de la madera. Ypushima-Pinedo et al. (2014) determinaron el ancho de radios de madera de 9 años procedente de Veracruz y Nayarit, obteniendo valores de 66 y 60  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Los factores que pueden repercutir en el ancho de radios medulares son varios. Rahman et al. (2007) mencionan que la estructura anatómica de los radios es una característica individual que no es afectada por la tasa de crecimiento, y que la dimensión y proporción de radios parecen estar bajo control genético. En contraste, Anish et al. (2015) señalan que el medio ambiente juega un papel importante en el ancho y altura de los radios, ya que un medio de estrés reduce la tasa del crecimiento del cámbium. Aloni y Zimmermann (1983) aseveran que la concentración de auxinas, principal componente que regula las divisiones celulares del cámbium, decrece al aumentar la edad, produciendo menor cantidad de vasos y radios, pero con células de diámetro y dimensiones mayores.

La presencia de abundantes radios medulares poliseriados pueden influir negativamente en las propiedades mecánicas y en la contracción tangencial de la madera (Rahman et al., 2007).

### Altura de radios

Los resultados de la altura de radios son señalados en el Cuadro 2. El análisis estadístico muestra que la edad es determinante en la altura de radios de la parte interna del duramen, debido a que la madera de 9 años de Campeche tuvo menor altura que el resto de las edades y procedencias. Sin embargo, el comportamiento de la parte externa del duramen es distinto, ya que la procedencia fue concluyente en la altura de los radios; los árboles de 9 y 15 años de Campeche tuvieron los valores más elevados y fueron estadísticamente iguales ( $P > 0.05$ ). La altura de los radios medulares entre la parte interna y externa del duramen fueron estadísticamente similares en las muestras ( $P > 0.05$ ), a excepción de la madera de árboles de 15 años de Campeche (Cuadro 3).

make the same statement and point out that maturity is reached between 15 and 25 years depending on the locality; after this age, fiber length does not vary significantly. On the other hand, Moya et al. (2009) conclude that the effect of the type of climate or site quality produces few variations in fibers.

Fiber length affects the properties of paper and strength of wood by improving unification, due to more cell-cell contacts (Via, Stine, Shupe, Chi-Leung, & Groom, 2004).

### Wall thickness

Fiber cell wall thickness results are shown in Table 2. With significant differences ( $P < 0.05$ ), the 15-year-old tree wood from Tabasco had the highest values, followed by the group formed by 21 year-old trees from Chiapas and 15 year-old trees from Campeche and, finally, 9 year-old trees from Campeche. This relationship occurred both in the internal and external part of the heartwood. The cell wall of the inner and outer part of the heartwood showed significant differences ( $P < 0.05$ ) in thickness (Table 3), probably related to the maturation process of the cambium.

Table 2 shows a certain (positive) relationship between fiber length and cell wall thickness of 9 and 15 year-old trees from Campeche and 21 year-old trees from Chiapas, estimating that when fiber length increases, the thickness of the cell wall also tends to increase. However, 15 year-old tree wood from Campeche and Tabasco are statistically different ( $P < 0.05$ ), deducing that origin plays an important role in the maturation process of the cambium up to a certain age, as stated by different researchers (Bhat & Priya, 2004; Moya et al., 2009; Thulasidas & Bhat, 2012; Zobel & Sprague, 1998).

The relationship of anatomical characteristics, such as fiber length and cell wall thickness, is significant with respect to mechanical properties such as resistance to compression and flexion (Chowdhury et al., 2012; Kiaei & Samariha, 2011; Thulasidas & Bhat, 2012).

### Diameter of fibers

Table 2 shows the results of fiber diameter, showing that 21-year-old wood from Chiapas and 9 year-old wood from Campeche had the highest values in the inner part of the heartwood and are statistically similar ( $P > 0.05$ ). The second group consists of 15-year-old wood from Campeche and Tabasco. The results do not show a pattern defined by age or origin, so it can be considered that there is irregularity in the growth during the first stages of plant development, which is reflected in the disparity of the values. In the case of the external part of the heartwood, the values of 21 year-old wood from Chiapas were the highest and

La influencia del ambiente y la edad en la altura de los radios ha sido registrada por Bhat et al. (2001). Estos autores manifestaron que los radios medulares de árboles de rápido crecimiento son significativamente más largos que los de lento crecimiento, ya que el medio ambiente de estrés reduce la tasa del crecimiento del cámbium. Por su parte, Anish et al. (2015) aseveran que la altura de los radios presenta diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) con respecto a la edad del arbolado.

### Longitud de fibra

La longitud de fibra es reportada en el Cuadro 2. Los resultados muestran que, a mayor edad, la longitud de la fibra tiende a incrementar. En el Cuadro 3 se observa que existen diferencias significativas en la longitud de las fibras entre la parte interna y externa del duramen. La relación de la longitud con la edad ha sido registrada en diversos trabajos; por ejemplo, Kokutse, Adjonou, y Kokou (2009) mencionan que, en rodales jóvenes, el largo de la fibra incrementa con la edad; Bhat y Priya (2004) y Thulasidas y Bhat (2012) hacen la misma afirmación y señalan que la madurez se alcanza entre los 15 a 25 años dependiendo de la localidad; después de esta edad, la longitud de la fibra no varía significativamente. Por otra parte, Moya et al. (2009) concluyen que el efecto del tipo de clima o la calidad de sitio producen pocas variaciones en las fibras.

La longitud de la fibra tiene influencia en las propiedades del papel y resistencia de la madera mediante la mejora de la unión, debido a más contactos célula-célula (Via, Stine, Shupe, Chi-Leung, & Groom, 2004).

### Espesor de pared

Los resultados de espesor de la pared celular de las fibras son presentados en el Cuadro 2. Con diferencias significativas ( $P < 0.05$ ), la madera de árboles de 15 años de Tabasco exhibió los valores más elevados, seguidos por el grupo formado por árboles de 21 años de Chiapas y 15 años de Campeche y, por último, la madera de árboles de 9 años de Campeche. Esta relación se dio tanto en la parte interna como externa del duramen. La pared celular de la parte interna y externa del duramen mostró diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en el espesor (Cuadro 3), probablemente relacionadas con el proceso de maduración del cámbium.

En el Cuadro 2 se puede observar cierta relación (positiva) entre la longitud de fibra y el espesor de pared celular de la madera de los árboles de 9 y 15 años de Campeche y 21 años de Chiapas, apreciándose que conforme la longitud de la fibra incrementa, el grosor de la pared celular también tiende a elevarse. Sin embargo, la madera de árboles de 15 años de Campeche y Tabasco son estadísticamente diferentes

statistically different ( $P < 0.05$ ) compared to the rest. On the other hand, 9 year-old wood from Campeche and 15 year-old wood from Campeche and Tabasco are statistically similar, which shows that, in the outer part of the heartwood, age plays an important role in the diameter of fibers; as age increases, the diameter of the fibers also increases. Regarding the results of the internal and external part of the heartwood, there is a statistically significant difference ( $P < 0.05$ ) between both sections of the 15-year-old wood from Campeche and 21 year-old wood from Chiapas, but not for the 9-year-old wood from Campeche and 15 year-old wood from Tabasco.

The diameters of teak fibers, coming from the Mexican southeast, are below those exposed by other researchers. Josue and Imiyabir (2011) reported values of 34.6  $\mu\text{m}$  fiber diameter in 15-year-old wood in Malaysia. Thulasidas and Bhat (2012) evaluated 35-year-old teak from three agroforestry locations in Kerala, India. One of the sites was considered wet, the other dry, and a third of forest plantation; the dry site had smaller fiber diameters (28.98  $\mu\text{m}$ ) and statistically different ( $P < 0.05$ ) from those obtained in humid sites (31.06  $\mu\text{m}$ ) and with commercial plantation (30.18  $\mu\text{m}$ ).

## Conclusions

There is an inverse relationship between the number of vessels per square millimeter and vessels diameter in the heartwood of *Tectona grandis* wood. It follows that the diameter at breast height of the trunk and age play an important role in generating vessels. Origin acts significantly in the increases of vessels diameter, width of medullary rays of the internal part and height of medullary rays of the external part of the heartwood. As age increases, the length and diameter of fibers increase, being greater in the outer part of the heartwood. Regardless of age and origin, the inner part of the heartwood tends to generate more vessels than the outer part, while this has higher values in diameter of vessels, width of medullary rays and thickness of the cell wall of fibers that the inner part. This is attributed to the maturation of the cambium and proportion of young wood, since wood coming from plantation trees is characterized by its rapid growth.

( $P < 0.05$ ), infiriendo que la procedencia juega un papel importante en el proceso de maduración del cámbium hasta determinada edad, tal y como lo afirman diferentes investigadores (Bhat & Priya, 2004; Moya et al., 2009; Thulasidas & Bhat, 2012; Zobel & Sprague, 1998).

La relación de las características anatómicas, como la longitud de fibra y el espesor de la pared celular, es significativa con respecto a las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y flexión (Chowdhury et al., 2012; Kiaei & Samariha, 2011; Thulasidas & Bhat, 2012).

## Diámetro de fibras

El Cuadro 2 presenta los resultados del diámetro de fibras, apreciándose que la madera de 21 años de Chiapas y 9 años de Campeche obtuvieron los valores más altos en la parte interna del duramen y son estadísticamente similares ( $P > 0.05$ ). El segundo grupo lo forman las maderas de 15 años de Campeche y Tabasco. Los resultados no muestran un patrón definido por edad ni procedencia, por lo que puede considerarse que hay irregularidad en el crecimiento durante las primeras etapas de desarrollo de la planta, lo que se refleja en la disparidad de los valores. En cuanto a la parte externa del duramen, los valores de la madera de árboles de 21 años de Chiapas fueron los más elevados y estadísticamente diferentes ( $P < 0.05$ ) al resto. Por su parte, la madera de árboles de 9 años de Campeche y 15 años de Campeche y Tabasco son estadísticamente similares, lo que demuestra que, en la porción externa del duramen, la edad juega un papel importante en el diámetro de las fibras; conforme la edad incrementa, el diámetro de las fibras también aumenta. Referente a los resultados de la parte interna y externa del duramen, existe diferencia estadísticamente significativa ( $P < 0.05$ ) entre ambas secciones de las maderas de árboles de 15 años de Campeche y 21 años de Chiapas, no así para las de 9 años de Campeche y 15 años de Tabasco.

Los diámetros de fibras de teca, procedente del sureste mexicano, se encuentran por debajo de los expuestos por otros investigadores. Josue e Imiyabir (2011) reportaron valores de 34.6  $\mu\text{m}$  de diámetro de fibra en madera de 15 años en Malasia. Thulasidas y Bhat (2012) evaluaron teca de 35 años de tres localidades agroforestales de Kerala, India. Una de las localidades fue considerada húmeda, la otra seca, y una tercera de plantación forestal; la localidad seca exhibió diámetros de fibra más pequeños (28.98  $\mu\text{m}$ ) y estadísticamente diferentes ( $P < 0.05$ ) de los obtenidos en lugares húmedos (31.06  $\mu\text{m}$ ) y con plantación comercial (30.18  $\mu\text{m}$ ).

## Conclusiones

Existe relación inversa entre la cantidad de vasos por milímetro cuadrado y el diámetro de los mismos en el

End of English version



## References / Referencias

- Aloni, R., & Zimmermann, M. H. (1983). The control of vessel size and density along the plant axis: a new hypothesis. *Differentiation*, 24(1-3), 203–208. doi: 10.1111/j.1432-0436.1983.tb01320.x
- Anish, M. C., Anoop, E. V., Vishnu, R., Sreejith, B., & Jijeesh, C. M. (2015). Effect of growth rate on wood quality of teak (*Tectona grandis* L. f.): a comparative study of teak grown under differing site quality conditions. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 12(1), 81–88. doi: 10.1007/s13196-015-0147-1
- Bhat, K. M., Priya, P. B., & Rugmini, P. (2001). Characterisation of juvenile wood in teak. *Wood Science and Technology*, 34(6), 517–532. doi: 10.1007/s002260000067
- Bhat, K. M., & Priya, P. B. (2004). Influence of provenance variation on wood properties of teak from the Western Ghat region in India. *Iawa Journal*, 25(3), 273–282. doi: 10.1163/22941932-90000365
- Burger, L. M., & Richter, H. G. (1991). *Anatomia da madeira*. São Paulo: Nobel.
- International Association of Wood Anatomists (IAWA). (1989). List of microscopic features for hardwood identification. Retrieved from [http://www.iawa-website.org/downloads/IAWA-Hardwood\\_List.pdf](http://www.iawa-website.org/downloads/IAWA-Hardwood_List.pdf)
- Chowdhury, Md. Q., Ishiguri, F., Hiraiwa, T., Matsumoto, K., Takashima, Y., Iizuka, K., ...Yoshizawa, N. (2012). Variation in anatomical properties and correlations with wood density and compressive strength in *Casuarina equisetifolia* growing in Bangladesh. *Australian Forestry*, 75(2): 95-99. doi: 10.1080/00049158.2012.10676390
- Environmental System Research Institute, Inc. (1999). ArcView GIS 3.2. USA: Author.
- Josue, J., & Imiyabir, Z. (2011). *Anatomical features, quality and mechanical properties of 15-year-old Tectona grandis (teak) planted in Sabah. ITTO project on improving utilization and value adding of plantation timber from sustainable sources in Malaysia*. Malaysia: Forest Research Institute Malaysia. Retrieved from [http://www.itto.int/files/itto\\_project\\_db\\_input/2547/Technical/Anatomical%20Features,%20Quality%20&%20Mechanical%20Properties.pdf](http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2547/Technical/Anatomical%20Features,%20Quality%20&%20Mechanical%20Properties.pdf)
- Kang, K. Y., Zhang, S. Y., & Mansfield, S. D. (2004). The effects of initial spacing on wood density, fibre and pulp properties in jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.). *Holzforschung*, 58(5), 455–463. doi: 10.1515/HF.2004.069
- Kiaei, M., & Samariha, A. (2011). Fiber dimensions, physical and mechanical properties of five important hardwood plants. *Indian Journal of Science and Technology*, 4(11), 1460–1463. Retrieved from <http://52.172.159.94/index.php/indjst/article/view/30270/26202>
- Kokutse, A. D., Adjonou, K., & Kokou, K. (2009). Relationship between ecological indicators and teak wood characteristics in Tchorage plantation (Togo). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 3(3), 483–491. doi: 10.4314/ijbcs.v3i3.45352
- duramen de la madera de *Tectona grandis*. Se deduce que el diámetro normal del fuste y la edad juegan un papel importante en la generación de vasos. La procedencia actúa significativamente en los incrementos de diámetro de vasos, ancho de radios medulares de la parte interna y altura de radios medulares de la parte externa del duramen. Conforme la edad aumenta, la longitud y el diámetro de las fibras incrementan, siendo mayores en la parte externa del duramen. Independientemente de la edad y procedencia, la parte interna del duramen tiende a generar mayor cantidad de vasos que la parte externa, mientras que esta presenta valores más altos en diámetro de vasos, ancho de radios medulares y espesor de pared celular de las fibras que la parte interna. Esto se atribuye a la maduración del cámbium y proporción de madera juvenil, ya que la madera proveniente de árboles de plantaciones se caracteriza por su rápido crecimiento.

## Fin de la versión en español

- Moya, R., Berrocal, A., Serrano, J. R., & Tomazello, F. M. (2009). Variación radial de la anatomía, densidad y durabilidad de la madera de teca (*Tectona grandis*) procedente de dos calidades de sitio y dos regiones climáticas de Costa Rica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 18(2), 119–131. Retrieved from [http://www.inia.es/GCONTREC/PUB/119-131\\_VariacionRadial\\_1260950709656.pdf](http://www.inia.es/GCONTREC/PUB/119-131_VariacionRadial_1260950709656.pdf)
- Matrox Graphics Inc. (2002). Matrox PC-VCR versión 02.10.10. Marvel G450 eTV. Canada: Author.
- Moya, R. R., Muñoz, A. F., & Berrocal, J. A. (2010). Teca: *Tectona grandis* L. f. Verbenaceae. Ficha técnica 7. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 7(18-19), 121–135. Retrieved from <http://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/download/383/2355>
- Rahman, M. M., Fujiwara, S., & Kanagawa, Y. (2007). Variations in volume and dimensions of rays and their effect on wood properties of teak. *Wood and Fiber Science*, 37(3), 497–504. Retrieved from <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1598/1598>
- Richter, H. G., Leithoff, H., & Sonntag, U. (2003) Characterization and extension of juvenile wood in plantation grown teak (*Tectona grandis* L. f.) from Ghana. In K. M. Bhat, K. K. N. Nair, K. V. Bhat, E. M. Muralidharan, & J. K. Sharma (Eds.), *Quality timber products of teak from sustainable forest management* (pp. 266–272). Peechi, India: Kerala Forest Research Institute. Retrieved from [http://www.itto.int/files/user/pdf/publications/PD%20151%2002/pd151-02%20\(I\)%20e.pdf](http://www.itto.int/files/user/pdf/publications/PD%20151%2002/pd151-02%20(I)%20e.pdf)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). Principales tipos de árboles utilizados en las plantaciones forestales comerciales

- (hectáreas). Retrieved January 10, 2016 from [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_RFORESTA09\\_03&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce&NOMBREENTIDAD=\\* &NOMBREANIO=\\*](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RFORESTA09_03&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREANIO=*)
- Silva, G. J. A., Fuentes, T. F. J., Rodríguez, A. R., Torres, A. P., Lomelí R. M. G., Ramos, Q. J., ...Richter, H. G. (2010). *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. Guadalajara, Jalisco, México: Amaya Ediciones.
- StatPoint Inc. (2007). STATGRAPHICS® Centurion XV, version 15.2.06. Warrenton, Virginia, USA: Author.
- Thulasidas, P. K., & Bhat, K. M. (2012). Mechanical properties and wood structure characteristics of 35-year old home-garden teak from wet and dry localities of Kerala, India in comparison with plantation teak. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 9(1), 23–32. doi: 10.1007/s13196-012-0062-7
- Upadhyay, A., Eid, T., & Sankhayan, P. L. (2005). Construction of site index equations for even aged stands fo *Tectona grandis* (teak) from permanent plot data in India. *Forest Ecology and Management* 212, 14–22. doi: 10.1016/j.foreco.2005.02.058
- Verheyden, A., De Ridder, F., Schmitz, N., Beeckman, H., & Koedam, N. (2005). High-resolution time series of vessel density in Kenyan mangrove trees reveal a link with climate. *New Phytologist*, 167(2), 425–435. doi: 10.1111/j.1469-8137.2005.01415.x
- Via, B. K., Stine, M., Shupe, T. F., Chi-Leung, S., & Groom, L. (2004). Genetic improvement of fiber length and coarseness based on paper product performance and material variability – a review. *IAWA Journal*, 25(4), 401–414. doi: 10.1163/22941932-90000373
- Ypushima-Pinedo, A. L., Salcedo, P. E., Manríquez, G. R., Silva, G. J. A., Zamora, N. J. F., & Hernández, Á. E. (2014). Propiedades de la madera y relación del estado nutricional con el crecimiento en teca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 26–39. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v5n24/v5n24a4.pdf>
- Zobel, B. (1984). The changing quality of the world wood supply. *Wood Science and Technology*, 18(1), 1–17. doi: 10.1007/bf00632127
- Zobel, B., & Sprague, J. R. (1998). *Juvenile wood in forest trees*. New York, USA: Springer Verlag.