

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS EN LA
SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TRONCO DE LA PALMA REAL *ROYSTONEA*
REGIA (KUNTH) O. F. COOK**

SILVIA PAOLA LÓPEZ GALET

NICOLÁS LÓPEZ GUERRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2017

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS EN LA
SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TRONCO DE LA PALMA REAL *ROYSTONEA*
REGIA (KUNTH) O. F. COOK**

**SILVIA PAOLA LÓPEZ GALET
NICOLÁS LÓPEZ GUERRA**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

**DIEGO FERNANDO VILLEGAS BERMÚDEZ
PH. D. En Ingeniería Mecánica**

Codirector

**ANDRÉS FELIPE CASTAÑO GONZÁLEZ
PH. D. En Biología, diversidad y adaptación de las plantas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2017

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. MATERIALES Y MÉTODOS	16
2.1 PREPARACIÓN DEL ESPÉCIMEN	16
2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA	17
2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA	20
2.4 ENSAYOS DE COMPRESIÓN PARALELO A LAS FIBRAS	23
2.5 ENSAYOS DE TENSIÓN PARALELO A LAS FIBRAS	25
3. RESULTADOS	26
3.1 CONTENIDO DE HUMEDAD	26
3.2 DENSIDAD	27
3.3 COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS	28
3.4 TENSIÓN PARALELA A LAS FIBRAS	32
4. DISCUSIÓN	36
4.1 LIMITACIONES DEL ESTUDIO	39
4.2 SIGNIFICANCIA DE LOS RESULTADOS	39
5. CONCLUSIONES	45
REFERENCIAS	46

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Palma real cultivada en la Universidad Industrial de Santander.	13
Figura 2. Tallo de la palma recién cortada indicando las regiones y secciones en que se dividió.	16
Figura 3. Distribución del contenido de humedad a lo largo y ancho del tronco	18
Figura 4. Representación esquemática de la distribución de densidad en el tallo de la palma	20
Figura 5. Sección transversal del tronco de R. regia.	22
Figura 6. MTS Bionix Servohydraulic test system	22
Figura 7. Esquema de corte para las probetas de compresión	24
Figura 8. Distribución y dirección de las fibras	24
Figura 9. Ensayo de tensión paralelo a las fibras	25

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Contenido de humedad en dirección longitudinal y radial.	26
Tabla 2. Propiedades a compresión en la sección medial, en el cilindro 3 sentido radial	30
Tabla 3. Propiedades a compresión paralela al grano comparando las diferentes secciones en la periferia (Cilindros 1 a 6).	31
Tabla 4. Propiedades a tensión en cada una de las secciones (apical, basal y medial) en sentido radial tomando como referencia el primer cilindro de cada una (1, 3 y 5).	33
Tabla 5. Propiedades a tracción paralela al grano comparando las diferentes secciones en la periferia (Cilindros 1 y 3)	34
Tabla 6. Propiedades mecánicas de diferentes especies maderables	38

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Densidad en cada sección (apical, medial y basal) de R. regia.	27
Gráfica 2. Densidad promedio \pm desviación estándar en la palma R. regia	28
Gráfica 3. Diagrama tipo de esfuerzo vs deformación con las propiedades a compresión calculadas a partir del mismo.	29
Gráfica 4. Gráfica de esfuerzo vs deformación característica en el ensayo de compresión paralelo al grano. (Sección medial, cilindro 3 de corteza a interior)	30
Gráfica 5. Diagrama esfuerzo vs deformación en la sección longitudinal del tronco, comparando los cilindros 1 y 3 en su periferia.	35
Gráfica 6. ANOVA sección radial del cilindro 1 (Propiedades a compresión).	40
Gráfica 7. ANOVA sección radial del cilindro 2 (Propiedades a compresión).	41
Gráfica 8. ANOVA sección radial del cilindro 3 (Propiedades a compresión).	41
Gráfica 9. ANOVA Fuerza máxima en la sección longitudinal de R. regia. (Propiedades a compresión).	43
Gráfica 10. ANOVA Esfuerzo máximo en la sección longitudinal de R. regia	43
Gráfica 11. ANOVA Esfuerzo de fractura en la sección longitudinal de la R. regia (Propiedades a compresión).	44
Gráfica 12. ANOVA Módulo de Young en la sección longitudinal de la R. regia	44

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos en el CD)

Anexo A. Ensayos a compresión paralelo a las fibras.

Anexo B. Ensayos a tensión paralelo a las fibras.

Anexo C. Dimensiones.

Anexo D. Densidad.

Anexo E. Contenido de humedad.

Anexo F. Resultados.

Anexo G. Comportamientos.

Anexo H. ANOVA para ensayos de compresión paralelo a las fibras.

Anexo I. ANOVA para ensayos de tensión paralelo a las fibras.

Anexo J. Normas Técnicas Colombianas (NTC).

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TRONCO DE LA PALMA REAL *ROYSTONEA REGIA* (KUNTH) O. F. COOK*

AUTORES: SILVIA PAOLA LÓPEZ GALET
NICOLÁS LÓPEZ GUERRA**

PALABRAS CLAVE: ANATOMÍA, ARECACEAE, MORFOLOGÍA, MADERA DE LA PALMA, *ROYSTONEA REGIA*, PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.

DESCRIPCIÓN:

Este estudio contiene importantes propiedades físicas y mecánicas del tronco de una palma real (*Roystonea regia*) de 15 años de edad (Com. Pers.), obtenida en Bucaramanga, Colombia. Los ensayos fueron realizados a diferentes alturas en el tallo de la palma (es decir, sección apical, medial y basal) y posiciones laterales (tales como centro, intermedio y periferia). Todas las propiedades (físicas y mecánicas) analizadas, se incrementan con la distancia transversal desde el centro del tronco, debido a la distribución de las fibras de esclerénquima hacia la periferia. Del mismo modo, hay una variación observable con respecto a la altura del tallo, los valores de las propiedades mecánicas disminuyeron hacia el ápice del tronco debido principalmente al alto contenido de humedad, en comparación con la región basal del mismo. Los resultados de la densidad obtenidos fueron los siguientes: en estado saturado de $0,669 \pm 0,024 \text{ g/cm}^3$; secado en aire de $0,628 \pm 0,096 \text{ g/cm}^3$ y secado por horno de convección de $0,516 \pm 0,017 \text{ g/cm}^3$. En cuanto a las propiedades mecánicas, se obtuvo que la resistencia a la compresión y a la tensión paralela al grano promedio son de $44,77 \pm 3,57 \text{ MPa}$ y $38,96 \pm 4,46 \text{ MPa}$, respectivamente, con un módulo de elasticidad de $2878,469 \pm 701,502 \text{ MPa}$ a tensión y $4156,58 \pm 318,133 \text{ MPa}$ a compresión.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Diego Fernando Villegas Bermúdez, Ph.D. en Ingeniería Mecánica. Codirector: Andrés Castaño G., Ph.D en Biología, diversidad y adaptación de las plantas.

ABSTRACT

TITLE: PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES IN THE TRANSVERSAL SECTION OF THE TRUNK OF THE ROYAL PALM TREE – ROYSTONEA REGIA (KUNTH) O. F. COOK*

AUTHORS: SILVIA PAOLA LÓPEZ GALET
NICOLÁS LÓPEZ GUERRA**

KEYWORDS: ANATOMY, ARECACEAE, MORPHOLOGY, PALM WOOD, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES.

DESCRIPTION:

This study describes some physical and mechanical properties of a 15-year-old (Com. Pers.) royal palm tree (*Roystonea regia*) stem growing in the Bucaramanga region, Colombia. The tests were done at different height positions on the palm stem (i.e., top, apical, middle and bottom) and lateral positions (i.e., core, intermediate and periphery). Both, physical and mechanical properties analyzed increase with the transverse distance from the center of the trunk, due to the distribution of the sclerenchyma fibers towards the periphery. Likewise, there is an observable variation among the length of the palm tree trunk; the values of the mechanical properties were lower at the top of the trunk, principally by the high humidity content, in comparison to the basal region. The density results obtained were the following: a saturated density of $0,669 \pm 0,024 \text{ g/cm}^3$; an air-dry condition of $0,628 \pm 0,096 \text{ g/cm}^3$ and an oven dry condition of $0,516 \pm 0,017 \text{ g/cm}^3$. As to mechanical properties, the average compression and tensile strength parallel to the grain were $44,77 \pm 3,57 \text{ MPa}$ and $38,96 \pm 4,46 \text{ MPa}$, respectively. The modulus of elasticity (MOE) values were $2878,469 \pm 701,502 \text{ MPa}$ for tension and $4156,58 \pm 318,133 \text{ MPa}$ for compression tests.

* Bachelor Thesis.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Diego Fernando Villegas Bermúdez, Ph.D. en Ingeniería Mecánica. Codirector: Andrés Castaño G., Ph.D en Biología, diversidad y adaptación de las plantas.

INTRODUCCIÓN

La palma real (*Roystonea regia* (Kunth) O. F. Cook) es un miembro de la familia *Arecaceae*, originaria de las islas del Caribe y países adyacentes, aunque plantada como ornamental en muchos países tropicales (Henderson, 1995). El cuerpo de una palma podría dividirse en tres regiones principales a saber: la raíz, el tronco y la corona. En comparación con las otras plantas, las palmas no poseen *cambium vascular* (o corteza). En cambio, la epidermis se endurece para formar una capa protectora. Debido a la ausencia de un *cambium*, las palmeras no tienen crecimiento secundario. El aumento en su diámetro es limitado, el cual es causado por la división celular, el desarrollo del tejido parenquimatoso y de sus haces vasculares ^{1 2 3}

R. regia es reconocible al analizar sus órganos vegetativos y reproductivos, ya que, al tratarse de una *Arecaceae* grande, alcanza fácilmente entre 20 y 30 m de altura, de tronco liso color grisáceo claro, con una apariencia de columna elegante ⁴ (Figura 1). Su diámetro oscila entre los 30-60 cm, con un engrosamiento notorio a mediana altura. Sus hojas de hasta 4 m de longitud están inclinadas y divididas en numerosos foliolos, ubicados a cada lado del raquis, de color verde oscuro. El fruto (también conocido como palmiche) es una baya ligeramente alargada, con 10 mm de largo y 9 mm de diámetro, color violáceo que contiene solo una semilla⁵.

¹ KILLMANN, W. Struktur, Eigenschaften und Nutzung von Stämmen wirtschaftlich wichtiger Palmen. Hamburg: Universität Hamburg. 1993. p. 48.

² JONES, D. L. Palms of the World. Washington: Smithsonian Institution Press. 1995. p. 50.

³ FATHI, Leila. Structural and mechanical properties of the wood from coconut palms, oil palms and date palms. Hamburg: Universität Hamburg. 2014. p. 6-16.

⁴ ZONA, Scott. *Roystonea* (Arecaceae: Arecoideae). New York: The New York Botanical Garden. 1996. p. 25-27.

⁵ HENDERSON, Andrew; GALEANO, Gloria and BERNAL, Rodrigo. Field guide to the palms of the Americas. New Jersey: Princeton University Press. 1995. p. 134-135.

Colombia es uno de los países con mayor diversidad de palmas en todo el mundo y, junto con Brasil, el más diverso en el hemisferio occidental, con 45 géneros y 252 especies conocidas hasta ahora en su territorio⁶. Las palmas tienen alta importancia económica, sobre todo en los trópicos, ya que además de proveer alimento y refugio a las comunidades locales en estas regiones, proporcionan varios productos, tales como aceite, azúcar, vino, cera, madera y fibra ⁷ ⁸. Sin embargo, al compararse con otras plantas comercialmente importantes, las palmas reciben relativamente poca investigación⁹.

Figura 1. Palma real cultivada en la Universidad Industrial de Santander.



Entre los usos más difundidos de la palma real en Cuba se encuentra la tabla, labrada a mano desprovista de su tripa suave, dejando la parte dura, la cual proviene principalmente de la parte basal o tercio inferior, y se emplea para forrar las paredes de los bohíos y casas rústicas, entablados de cercas, entre otros¹⁰.

⁶ GALEANO, Gloria *et. al.* Plan de conservación, manejo y uso sostenible de las palmas de Colombia. . Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Universidad Nacional de Colombia. 2015. p. 23-25.

⁷ BALICK, M. J. Useful palms of the world: a synoptic bibliography. New York: Columbia University Press. 1990. p. 20

⁸ JOHNSON, Dennis V. Non wood forest products. Tropical Palms. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2011. p. 10-18.

⁹ PARTHASARATHY, M. and KLOTZ, L. H. Palm "wood". Springer-Verlag. 1976. p. 215-229.

¹⁰ HENRY-TORRIENTE, P. P., GARCÍA-DELGADO, J. M., GARCÍA-MANTILLA, M. V., y MORENO-CARO, I. Propiedades y usos de la madera de Roystonea Regia (H.B.K.) O. F. Cook. (Palma Real). Forestal Baracoa. 2015. p. 63-71.

Investigar las propiedades mecánicas de la madera permite conocer su capacidad para resistir diferentes tipos de esfuerzos. Las propiedades mecánicas son importantes en el caso de la construcción y fines estructurales, las cuales no solo varían entre las especies (con referencia a la naturaleza de su estructura de fibra), sino también con respecto al contenido de humedad, temperatura y defectos de la madera¹¹.

La naturaleza ofrece una amplia gama de macromoléculas y compuestos de bajo peso molecular. Muchos de estos materiales pueden ser valiosos recursos para la industria¹². Frente a la fibra de vidrio y carbono, proporcionan beneficios, tales como el bajo costo y densidad, junto con la facilidad de su manufactura y biodegradación. Este proyecto busca establecer un marco de referencia para identificar las posibles aplicaciones en el campo de la ingeniería, no solo buscando lo que se pueda extraer de la naturaleza, sino lo que podemos aprender de ella¹³.

Los objetivos de esta investigación se encuentran en el primer capítulo. En el segundo capítulo se describe el diseño experimental y se ofrece una visión general de los estudios sobre las propiedades físicas y mecánicas de la palma real. Adicionalmente, comprende la preparación de materiales y los procedimientos metodológicos para los experimentos. Más adelante, en el tercer capítulo, se presentan los resultados del contenido de humedad y densidad, así como de los ensayos realizados de compresión y tensión paralelos al grano. El cuarto capítulo pretende hacer un análisis de los resultados obtenidos, comparando con investigaciones similares, con el fin de resaltar los aportes de este trabajo. Las conclusiones se muestran en el quinto capítulo.

¹¹ RANA, M.; DAS, A. K. and ASHADUZZAMAN, M. Physical and mechanical properties of coconut palm (*Cocos nucifera*) stem. Bangladesh journal of scientific and industrial research. 2015. p. 39-45.

¹² WILBON, P. A. Progress in renewable polymers from natural terpenes, terpenoids, and rosin. Macromolecular Rapid Communications. 2012. p. 8-37.

¹³ BENYUS, Janine M. Biomimicry: Innovation inspired by nature. New York: Harper Perennial. 2002. p. 15-38.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las propiedades físicas y mecánicas del tronco de la Palma Real *Roystonea regia*, de tal manera que se pueda caracterizar como biomaterial, contribuyendo de esta manera a la misión de la Universidad Industrial de Santander con investigación, desarrollo social, científico y tecnológico para dar respuesta a las necesidades de la sociedad.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

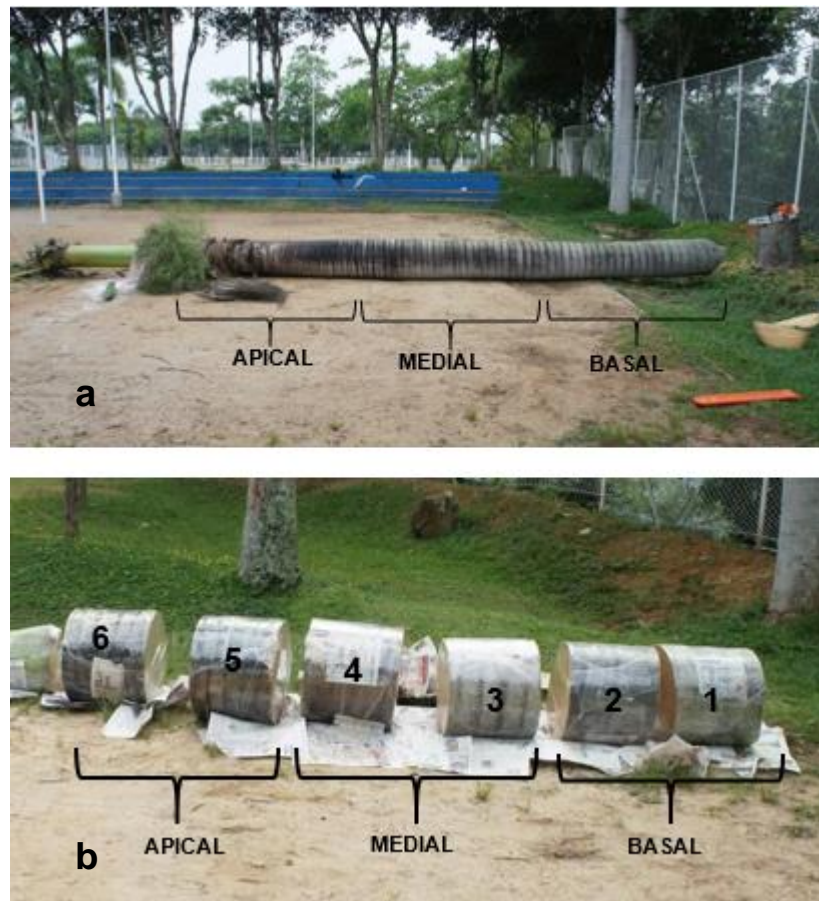
- Determinar los esfuerzos y deformaciones unitarias en muestras secas, obtenidas de la sección transversal desde el centro hasta la corteza de la palma real, utilizando las normas para madera NTC 944, NTC 784, NTC 206 y la norma para máquinas de ensayo NTC 4227.
- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas a tensión y compresión mediante los ensayos de las muestras del tronco de la palma, por medio de la obtención del esfuerzo máximo, deformación máxima y el módulo de elasticidad.
- Comparar las propiedades de los cortes transversales obtenidos en la sección apical, media y basal del tronco de la palma.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 PREPARACIÓN DEL ESPÉCIMEN

La palma real (*R. regia*) utilizada para el estudio tenía una longitud del tallo aproximada de 10 m. Se realizó el primer corte a un metro de la base (parte más baja de la palma), con una motosierra en dirección diagonal hacia el interior del tronco, seguidamente de un corte horizontal para lograr una cuña que permitiera que la palma se cayera (Figura 2.a).

Figura 2. Tallo de la palma recién cortada indicando las regiones y secciones en que se dividió.



De cada sección, se cortaron dos muestras de 50 cm de largo, obteniendo finalmente, seis pedazos, a los cuales se les aplicó un producto fungicida y fueron forrados en plástico para protegerlas de factores externos (Figura 2.b). A cada cilindro se le realizó un corte, del cual se obtuvieron dos secciones (A y B), similares a un prisma de aproximadamente 20x20x50 cm³, posicionados en extremos contrarios y que, posteriormente, se utilizaron para fabricar probetas de compresión paralela a las fibras. La sección C es el bloque del medio de las dos secciones anteriores con un ancho de 20 cm, un largo igual al diámetro del cilindro y 50 cm de alto, del cual se realizaron probetas de tracción paralela a las fibras. Este corte en cruz obedece a la NTC 301, el cual permite un análisis radialmente al centro de la sección transversal. Adicionalmente, un cilindro de cada sección se escogió para ser secado al aire (1, 3 y 5), y el segundo de cada una (2, 4, 6) se secó por medio de horno. Con esto se obtuvieron las densidades promedio para el secado de la madera en aire y secado en horno de cada sección.

2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA

Las propiedades físicas son aquellas que están determinadas por los factores que se relacionan con la organización estructural¹⁴. Para esta investigación se analizarán las siguientes propiedades de la madera: contenido de humedad, cambios dimensionales, densidad y peso específico.

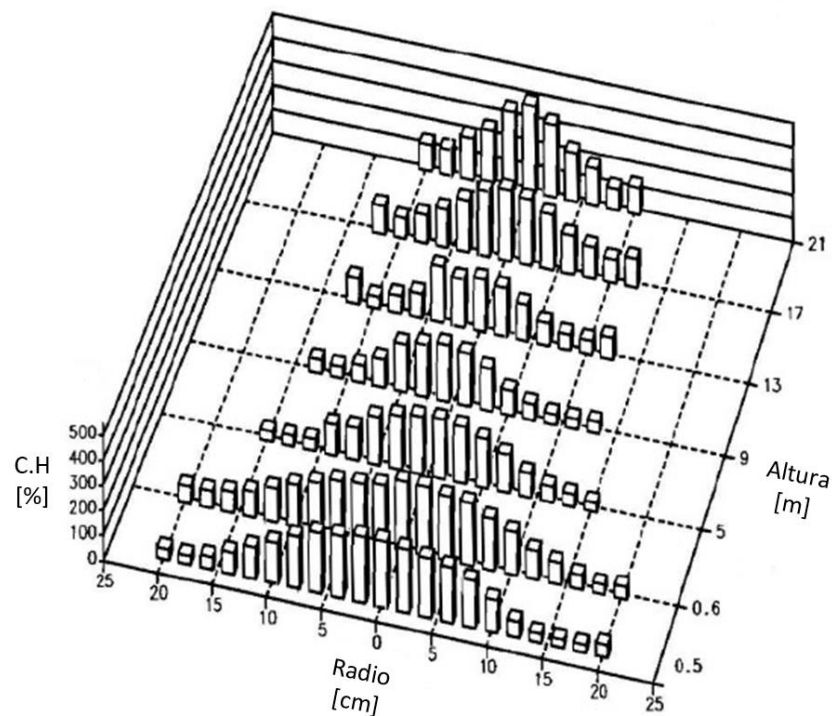
El contenido de humedad (C.H.) influye sobre todas las demás propiedades, tanto físicas como mecánicas, dado que la humedad no es constante en todo el espesor ni longitud de la pieza; por ejemplo, en las palmas el contenido de humedad se eleva rápidamente con el aumento de la altura del tallo y notablemente desde la zona periférica hasta el centro del cilindro central ¹⁵ (Figura 3).

¹⁴ GIL, Ivonne y PRADA, Ronny. Análisis y caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de la palma de lata. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. 2008. p. 44.

¹⁵ FATHI, Leila. Op. cit., p 20-21.

El C.H. se expresa como porcentaje del peso seco al horno de la madera. El método para determinar la cantidad de agua estuvo basado en la norma NTC 206-1. En el proceso de secado el primer tipo de agua que elimina la madera es el agua libre (en las cavidades celulares), esta pérdida se hace prácticamente sin variación de las características fisicomecánicas.

Figura 3. Distribución del contenido de humedad a lo largo y ancho del tronco.



Fuente: Frühwald, Peek, & Schulte, 1992¹⁶

Después de evaporada el agua libre, queda el agua de impregnación de la pared celular (es la que satura las fibras de la madera) y que al disminuir por medio del

¹⁶ FRÜHWALD, A., PEEK, R., & SCHULTE, M. Utilization of coconut timber from North Sulawesi, Indonesia. GTZ. 1992. p. 78.

secado modifica las propiedades; por lo general, la dureza y la resistencia aumentan y se presenta disminución de volumen en las paredes¹⁷.

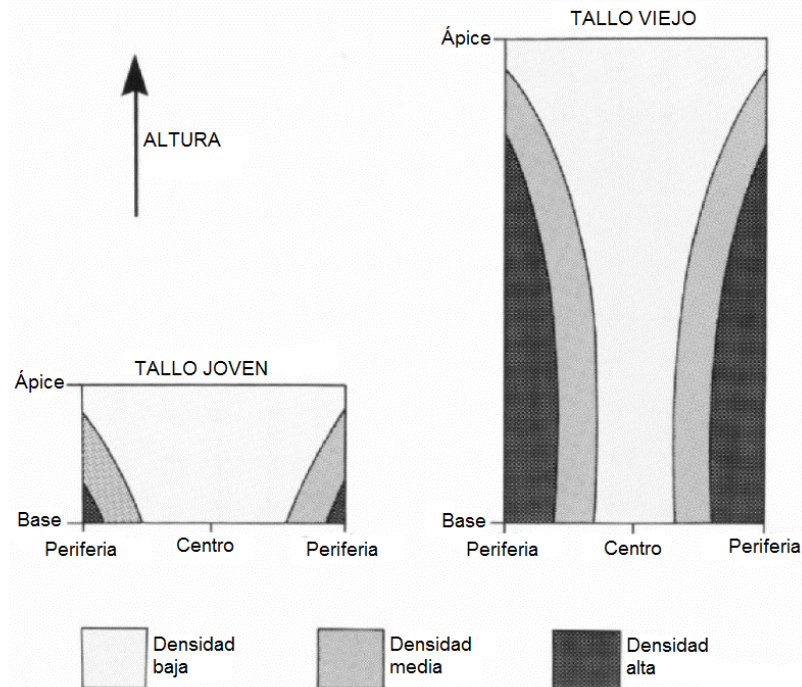
Los cambios dimensionales en la madera se deben a que la adición de agua u otros líquidos polares a la sustancia de la pared celular causa que la estructura microfibrilar se expanda en proporción a la cantidad de líquido que se le añade, esto continúa hasta que alcanza el punto de saturación de la fibra (PSF). O en caso contrario, la remoción del agua la cual ocasiona la contracción de la madera¹⁸.

La densidad de un material es una característica física que se define como la masa o el peso del material por unidad de volumen. Una manera de representar el esquema de la distribución de la densidad del tejido del tallo en las palmas se muestra en la figura siguiente. A la izquierda el tallo de una palma joven mostrando en su mayoría poca densidad, pero dando indicios de una tendencia a aumentar su densidad a medida que se llega a la periferia desde el centro del tallo. A la derecha el tallo de una palma vieja comprobando la tendencia vista en la anterior, con mayor densidad en la periferia del tallo, así como también en la base del mismo.

¹⁷ VARGAS, M., Julio O. La madera: Clasificación y propiedades. Cochabamba: Escuela de Ciencias Forestales. 2014. p. 34.

¹⁸ DELGADO, G. Propiedades de la madera. Ciudad de Mérida: Universidad de los Andes Mérida. 1987. p. 23-25.

Figura 4. Representación esquemática de la distribución de densidad en el tallo de la palma



Fuente: RICH, Paul. Mechanical Architecture. p. 126.¹⁹

2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA

Las propiedades mecánicas de la madera son una expresión de su comportamiento bajo la acción de fuerzas externas, este comportamiento refleja la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material; es decir, su deformación. Algunas de las propiedades mecánicas más importantes son la resistencia, la dureza, la ductilidad y la rigidez. Los factores que deben considerarse son la naturaleza de la carga aplicada, la cual puede ser una tracción, una compresión o una cizalladura con una magnitud constante en el tiempo o bien fluctuar continuamente, la duración y también las condiciones del medio.

¹⁹ RICH, Paul M. Mechanical Architecture of Arborescent Rain Forest Palms. En: Principes. Noviembre, 1986. Massachusetts: Universidad de Harvard. vol 30, no 3, p. 117-131.

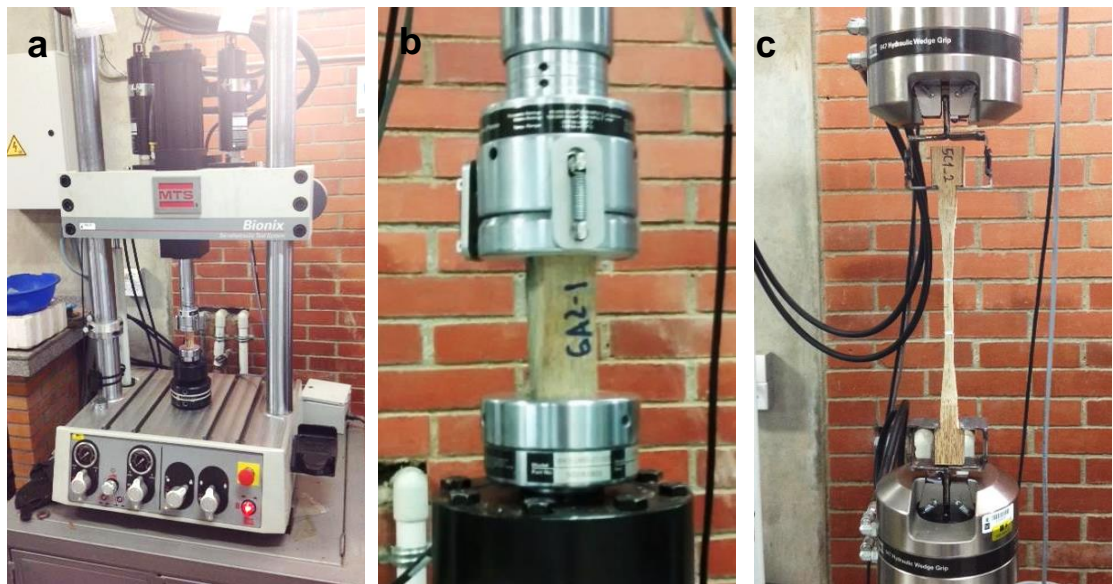
Para este estudio se realizaron únicamente los ensayos de compresión y tracción paralelos a las fibras para conocer el comportamiento de la palma real como recurso maderable. Estudios anteriores realizados por Henry-Torriente et al. En el 2015 descartan la tripa suave o parénquima. Estos ensayos fueron investigados de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana para maderas: resistencia a la compresión axial o paralela al grano (NTC 784) y tracción paralela al grano (NTC 944). Los ensayos fueron conducidos en la máquina MTS Bionix Servohydraulic test system, modelo 370, integrada con una celda de carga de 25kN con la cual se obtuvieron las curvas representativas de ensayos de compresión hasta llegar a la ruptura (Figura 5.a).

Para el análisis de la variación radial en el tallo de la palma, se clasificaron probetas desde la periferia hasta el centro del mismo numerándolos de 1 a 5, tal como se indica en la figura 5.

Figura 5. Sección transversal del tronco de *R. regia*.



Figura 6. MTS Bionix Servohydraulic test system



2.4 ENSAYOS DE COMPRESIÓN PARALELO A LAS FIBRAS

En un ensayo de compresión se deforma la probeta, aplicando una fuerza uniaxial a lo largo del eje, la cual aumenta gradualmente y por convención se considera negativa dado que la probeta se contrae a lo largo de la dirección de la fuerza, ocasionando una deformación también negativa²⁰. Las probetas para compresión fueron tomadas de las 6 secciones, basal, medial y apical (Figura 6a). Los bloques A y B, prismas de 20x20x50 cm³ se dividieron en láminas de 3 cm de ancho, permitiendo cortes de las probetas de 30x30x60 mm³ distribuidas desde la periferia hasta una sección intermedia, donde las probetas 1 son más alejadas del centro (Figura 6.b y 6.c).

En este estudio, se tuvieron en cuenta cinco probetas en la dirección radial para las seis secciones del tronco con el fin de determinar la variación de los esfuerzos desde la periferia hacia el centro de la palma, así como su variación en la dirección longitudinal (Figura 7.a y 7.b).

²⁰ CALLISTER, William. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Universidad de Utah: Departamento de ciencia e ingeniería de materiales. Bogotá: Editorial Reverté. 2002. p.118.

Figura 7. Esquema de corte para las probetas de compresión

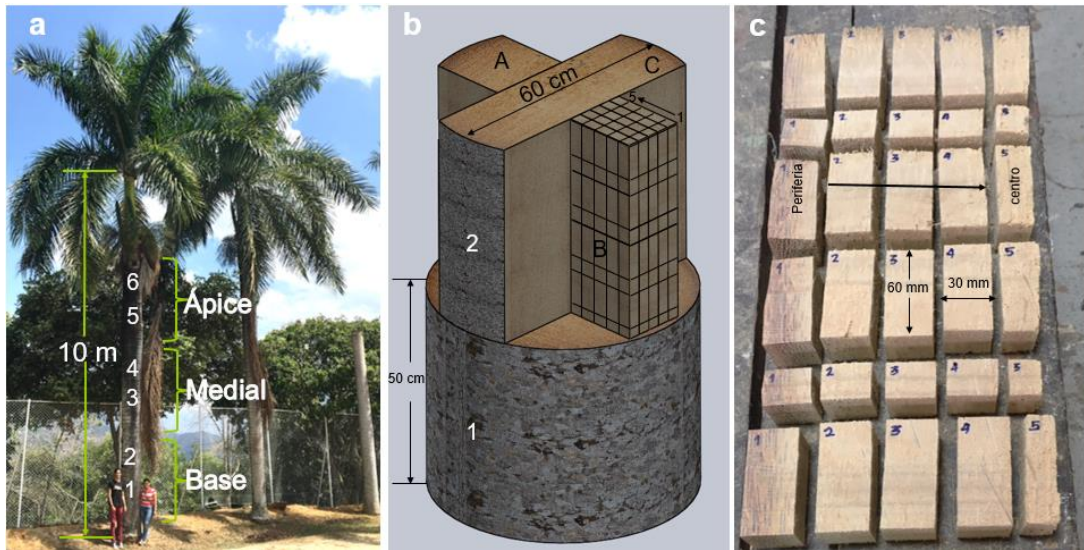
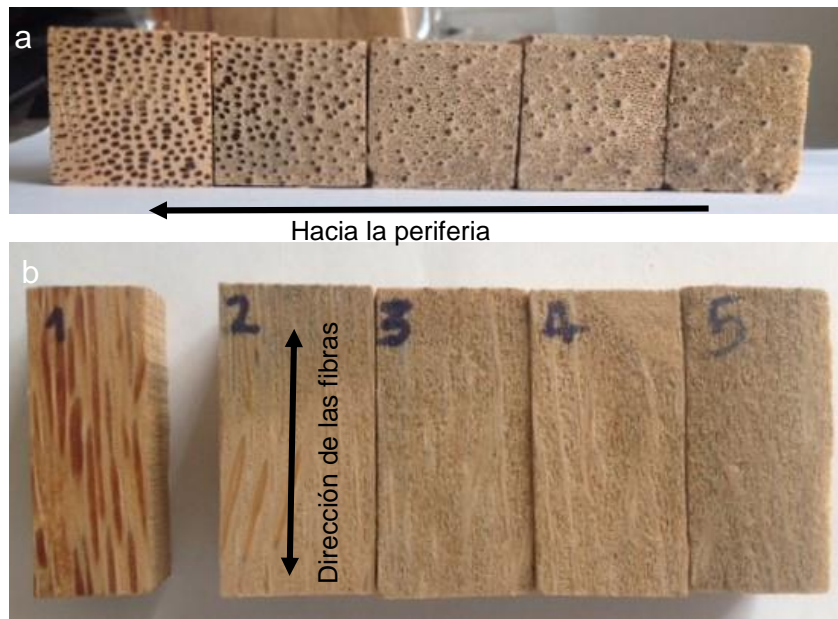


Figura 8. Distribución y dirección de las fibras

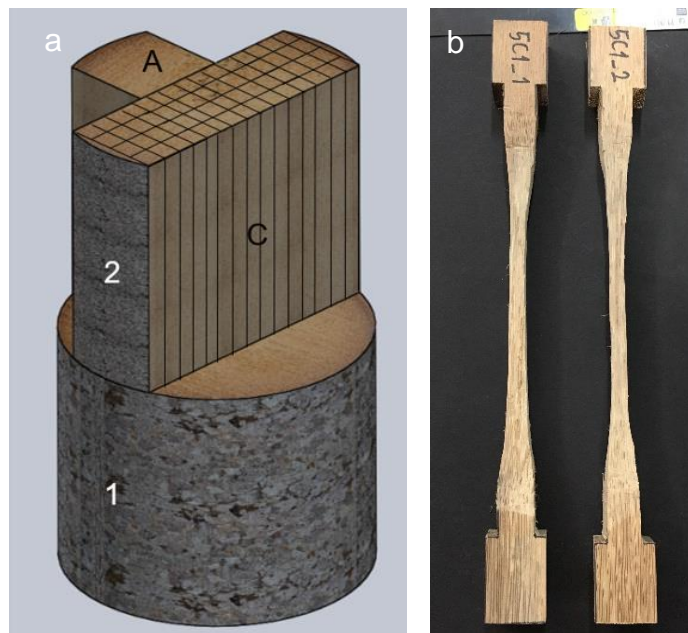


2.5 ENSAYOS DE TENSIÓN PARALELO A LAS FIBRAS

Este ensayo es utilizado para determinar varias propiedades de los materiales que son importantes para el diseño. Normalmente se deforma una probeta hasta la rotura, con una carga de tracción que aumenta gradualmente y que es aplicada uniaxialmente a lo largo del eje de la probeta²¹.

Las probetas para tracción se obtuvieron de las secciones del bloque C (Figura 9.a). La obtención de probetas se realizó de manera similar a los ensayos de compresión. Inicialmente, se cortó el bloque en cuatro prismas con dimensiones de 20x7.5x50 cm³. Posteriormente, se cortaron en prismas de 3.5x3.5x50 cm³, de los cuales se seleccionaron 40 para realizar los ensayos de tensión. Estas muestras fueron cortadas con una sierra sinfín y lijados hasta las medidas indicadas por la norma NTC 944 (Figura 9.b). Adicionalmente, fue necesaria la construcción de un dispositivo de acople que sostuviera la probeta en ambos extremos sin causar esfuerzos

Figura 9. Ensayo de tensión paralelo a las fibras



²¹ Ibíd., p. 132.

3. RESULTADOS

Los resultados mostrados en cada una de las siguientes tablas son el valor promedio \pm el valor de la desviación estándar; así mismo las gráficas de "esfuerzo-deformación" son la representación de las tablas con unidades de medida en [MPa] y [mm/mm] respectivamente.

3.1 CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad en dirección longitudinal fue mayor en la sección apical de la palma *R. regia*, en comparación con la sección más baja, la sección basal, también se presentó que el contenido aumentaba en dirección radial desde la zona periférica hacia la zona central, coincidiendo en ambos casos con lo descrito por Fathi y con la distribución establecida por Frühwald et al (ver figura 3).

La tabla 1 muestra los valores del C.H en las 3 secciones y la variación existente tanto en dirección longitudinal como en dirección radial.

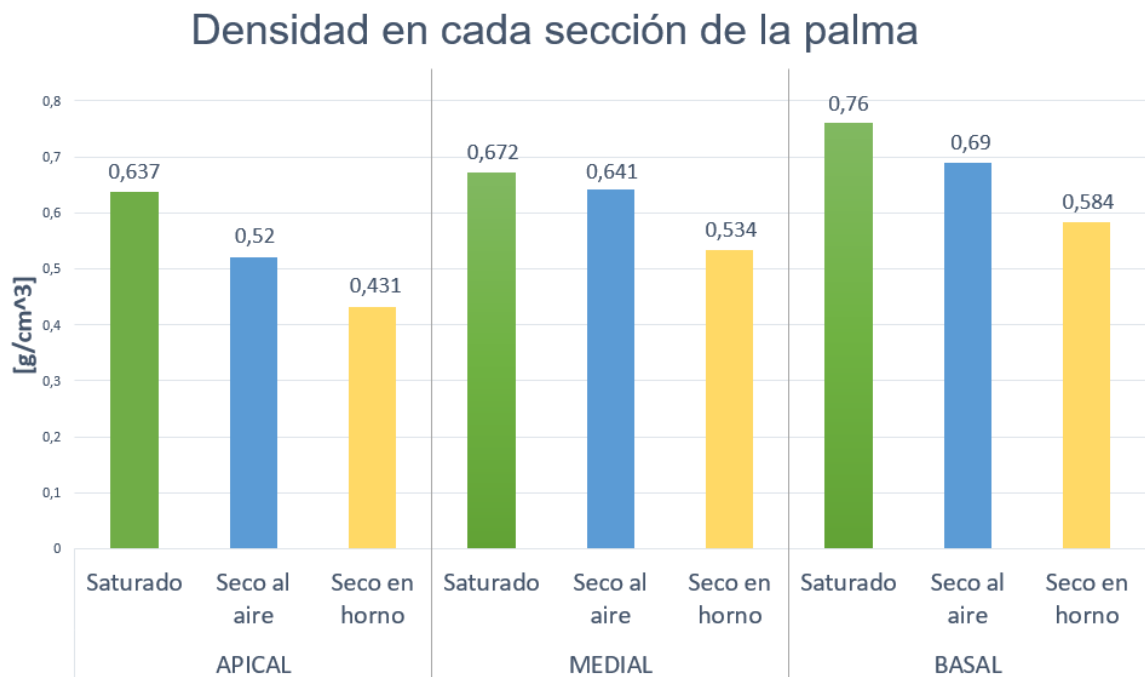
Tabla 1. Contenido de humedad en dirección longitudinal y radial.

		RADIAL	CONTENIDO DE HUMEDAD [%]	
LONGITUDINAL	APICAL	Periferia	(1)	62,12
		Intermedio	(3)	78,93
		Centro	(5)	85,84
	MEDIAL	Periferia	(1)	60,15
		Intermedio	(3)	74,59
		Centro	(5)	82,41
	BASAL	Periferia	(1)	55,47
		Intermedio	(3)	60,15
		Centro	(5)	71,54

3.2 DENSIDAD

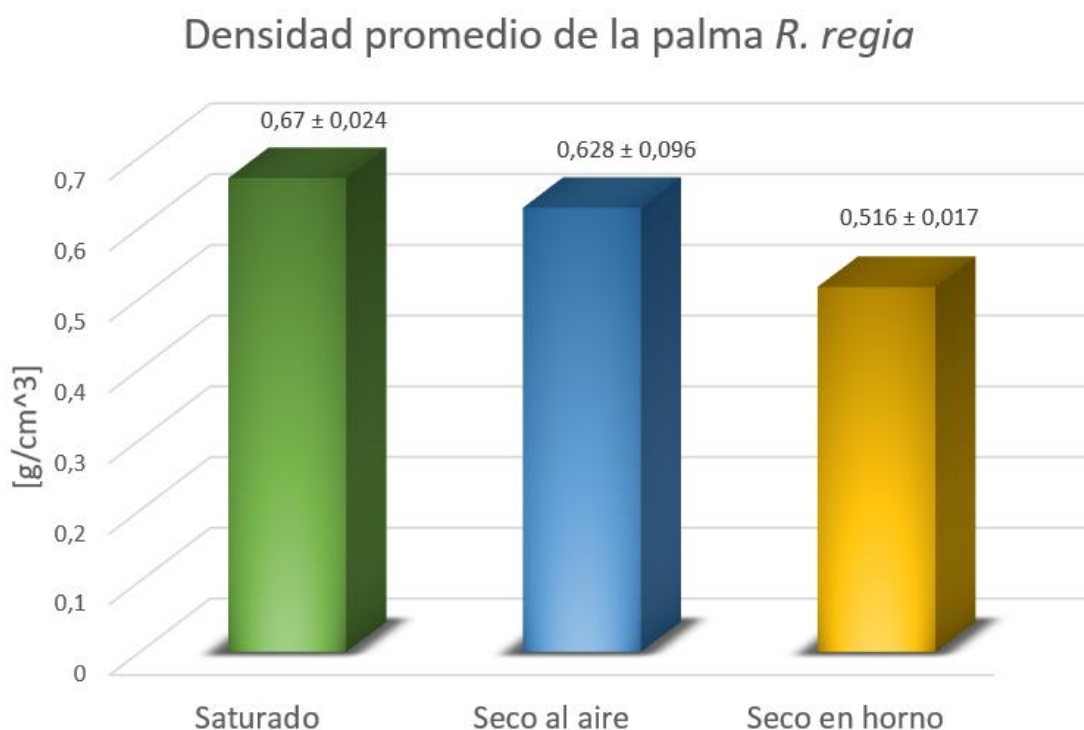
La densidad fue mayor en la región basal del tronco y fue disminuyendo a medida que se acercaba a la región apical, lo cual concuerda con la representación esquemática de la distribución de densidad establecida por Rich (ver figura 4). La densidad promedio medida en la sección basal fue de $0,76 \text{ g/cm}^3$ en estado saturado, es decir, la palma recién cortada. De igual manera, para la apical fue obtenido un valor de $0,637 \text{ g/cm}^3$. Los datos obtenidos para saturado, aire y horno (gráfica 1) continúan con el comportamiento descrito en primera instancia, la densidad de la palma se hace mayor a medida que se llega a la sección más baja de la misma.

Gráfica 1. Densidad en cada sección (apical, medial y basal) de la palma *R. regia*.



La gráfica 2 muestra los datos promedio \pm la desviación estándar de la densidad en la palma *R. regia* para cada uno de los estados, saturado, secado al aire y secado en horno.

Gráfica 2. Densidad promedio \pm desviación estándar en la palma *R. regia*

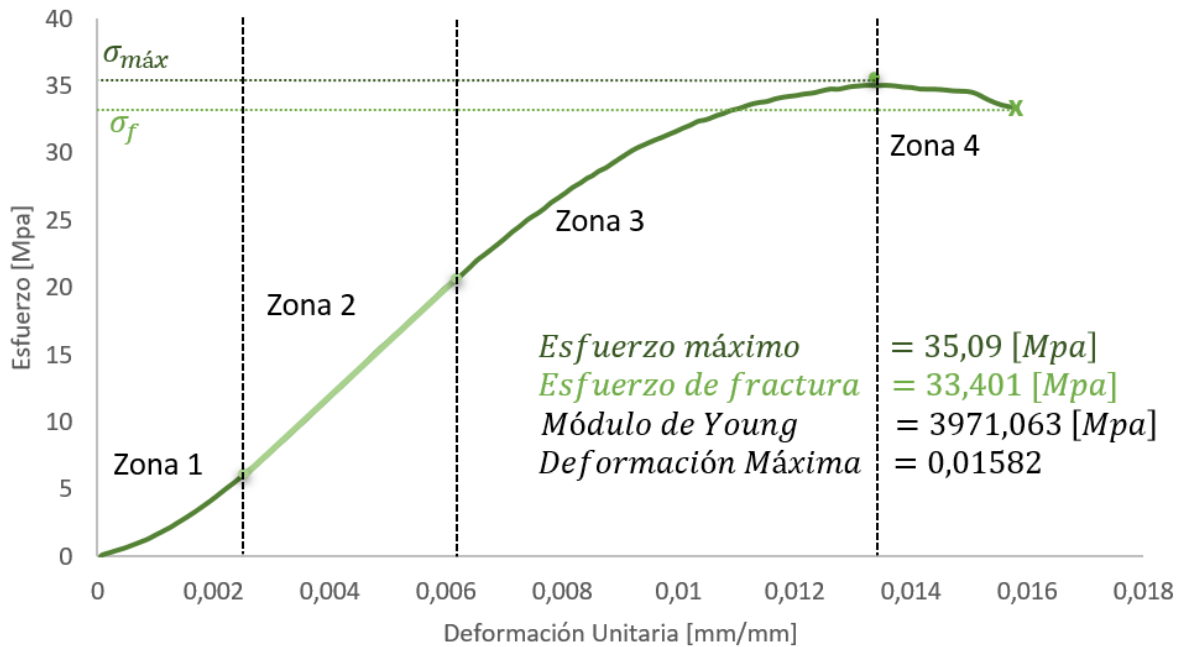


3.3 COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

La gráfica 3 muestra el comportamiento tipo que tuvieron las probetas a compresión. A partir de dicha curva, se identifica que la madera de la palma tiene un comportamiento de material frágil, explicable por el hecho de que puede considerarse un material compuesto, debido a la variación de las fibras en la dirección radial. En la zona 1 la probeta inicia a mostrar la resistencia a la deformación, evidenciado en un comportamiento no lineal. En la zona 2 se presenta un comportamiento elástico y la curva tiende a ser en realidad una línea recta, de modo que el esfuerzo es proporcional a la deformación, obteniendo allí el módulo de elasticidad. En la zona 3 la probeta soporta el aumento en la carga, lo cual resulta en una curva que asciende hasta llegar al esfuerzo máximo. En la zona 4 el

diagrama tiende a curvarse hacia abajo hasta que la probeta no soporta más la carga y rompe, llegando así al esfuerzo de fractura.

Gráfica 3. Diagrama tipo de esfuerzo vs deformación con las propiedades a compresión calculadas a partir del mismo.



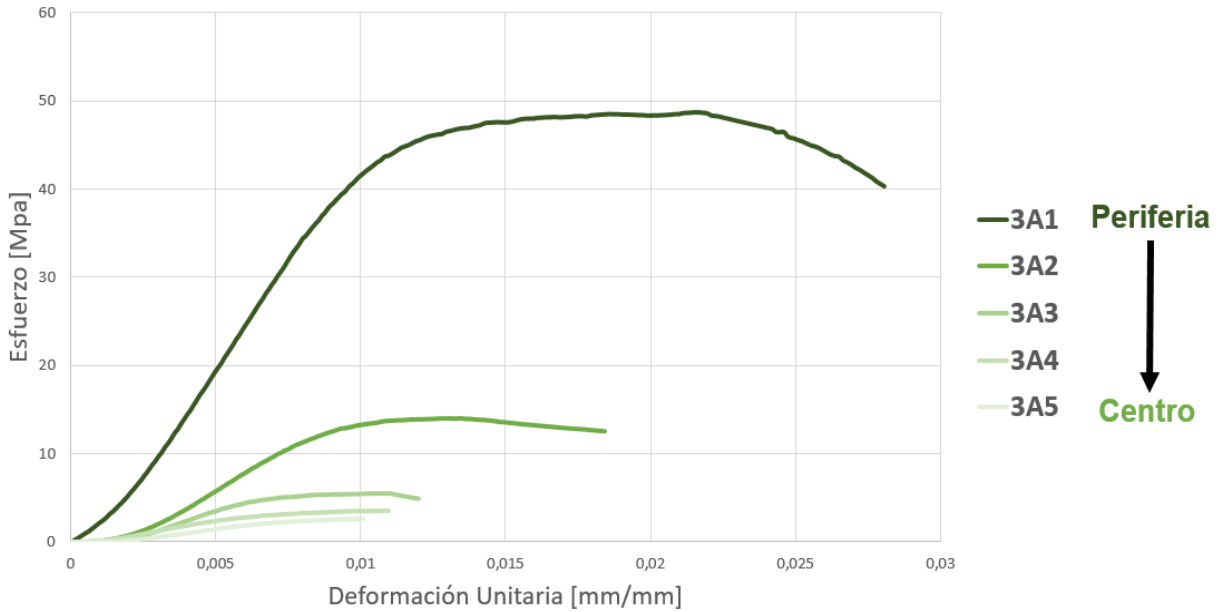
Las propiedades mecánicas del tronco son notablemente mayores en la periferia y disminuyen gradualmente a medida que se llega al interior, esto está relacionado con la distribución de las fibras de esclerénquima hacia la periferia. La tabla 2 muestra un ejemplo de los resultados de las propiedades a compresión del cilindro 3, desde la periferia (3A1) hasta el interior (3A5). En la gráfica 4 se puede observar el comportamiento de cada región y comprobar las diferencias que existen en la sección radial del tronco de la palma *R. regia*.

Tabla 2. Propiedades a compresión en la sección medial, cilindro 3 en sentido radial.

Propiedades a compresión en la sección transversal (sección 3) de la palma *R. regia*

	Fuerza máxima [kN]	Esfuerzo máximo [MPa]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Módulo de Young [MPa]
	F_máx ± σ	σ_máx ± σ	σ_f ± σ	E_m ± σ
3A1	24,48 ± 1,20	48,34 ± 1,54	43,85 ± 1,93	4477,83 ± 729,15
3A2	14,60 ± 1,68	16,32 ± 1,80	14,22 ± 1,48	2444,76 ± 428,14
3A3	5,29 ± 0,83	5,97 ± 1,04	5,17 ± 0,88	975,60 ± 206,88
3A4	3,04 ± 0,34	3,49 ± 0,30	3,05 ± 0,30	411,63 ± 103,49
3A5	2,38 ± 0,09	2,65 ± 0,11	2,40 ± 0,08	270,79 ± 183,74

Gráfica 4. Gráfica de esfuerzo vs deformación característica en el ensayo de compresión paralelo al grano. (Sección medial, cilindro 3 de corteza a interior)



La tabla 3 es una comparación de las propiedades a lo largo del tallo de la palma en la periferia, mostrando que estas disminuyen hacia el ápice del tronco (5A1 y 6A1) debido principalmente al alto contenido de humedad en comparación con la base del mismo (1A1 y 2A1).

Como se mencionó antes, la sección apical (5A1 y 6A1 de la tabla 3) es la de mayor contenido de humedad y de sus dos muestras, 5 fue secado al aire y 6 en horno. Al observar los valores de las propiedades en la tabla, es notorio que, aunque 6 se encuentra a una altura mayor en el tallo de la palma que 5, tiene mejores propiedades, comprobando así que el hecho de que se le haya removido mayor cantidad de agua garantiza mejores resultados en las propiedades mecánicas.

Tabla 3. Propiedades a compresión paralela al grano comparando las diferentes secciones en la periferia (Cilindros 1 a 6).

Propiedades a compresión en la sección longitudinal de la palma *R. regia*

	Fuerza máxima [kN]	Esfuerzo máximo [MPa]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Módulo de Young [MPa]
	F_máx ± σ	σ_máx ± σ	σ_f ± σ	E_m ± σ
1A1	21,69 ± 2,19	42,23 ± 4,59	38,24 ± 2,67	4158,47 ± 665,93
2A1	24,94 ± 0,11	47,32 ± 4,08	45,03 ± 3,12	4327,63 ± 538,36
3A1	24,48 ± 1,20	48,34 ± 1,54	43,85 ± 1,93	4477,83 ± 729,15
4A1	19,30 ± 1,11	41,21 ± 2,71	39,63 ± 2,18	4425,25 ± 978,37
5A1	14,53 ± 3,34	31,43 ± 7,16	29,16 ± 6,31	3703,02 ± 982,67
6A1	17,09 ± 1,71	36,52 ± 3,10	34,26 ± 2,46	3847,25 ± 719,42

3.4 TENSIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

Como se mencionó en un principio, debido a la distribución de las fibras de esclerénquima hacia la periferia, las propiedades mecánicas se hacen mayores a medida que se avanza del interior a la corteza (sección radial). En los ensayos a tensión descritos en la tabla 4, se comprueba esto una vez más, mostrando que las propiedades son mayores en la periferia.

Las probetas de la periferia de cada sección, tienen un área menor a las demás, esto ocasiona que, aunque la fuerza máxima no sea tan elevada, los esfuerzos máximos y de ruptura si resulten serlo, debido a la relación existente en la ecuación $\text{Esfuerzo} = \text{Fuerza}/\text{Área}$. Esta reducción de área fue necesaria porque en dichos ensayos se estaba presentando una falla por desplazamiento de las fibras, y no en la sección mínima de las probetas, donde debería ser.

Tabla 4. Propiedades a tensión en cada una de las secciones (apical, basal y medial) en sentido radial tomando como referencia el primer cilindro de cada una (1, 3 y 5).

Propiedades a tensión en la sección transversal (**Cilindro 1**) de la palma *R. regia*

	Fuerza máxima [N]	Esfuerzo máximo [MPa]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Deformación máx. [mm]	Módulo de Young [MPa]	Coefficiente de Poisson
	F_máx ± σ	σ_máx ± σ	σ_f ± σ	Def ± σ	E_m ± σ	v ± σ
1C1	1413 ± 0,012	47,682 ± 0,15	45,463 ± 0,18	0,005 ± 0,002	2865,498 ± 1,852	0,225 ± 0,015
1C2	664 ± 0,033	7,217 ± 0,38	6,829 ± 0,448	0,001	300,635 ± 44	0,225 ± 0,015
1C3	424 ± 0,052	3,925 ± 0,297	3,663 ± 0,288	0,001	182,027 ± 36,639	0,126 ± 0,005
1C5	166 ± 0,041	1,452 ± 0,38	1,281 ± 0,373	0,001 ± 0,001	137,479 ± 46,777	0,170 ± 0,026

Propiedades a tensión en la sección transversal (**Cilindro 3**) de la palma *R. regia*

	Fuerza máxima [N]	Esfuerzo máximo [MPa]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Deformación máx. [mm]	Módulo de Young [MPa]	Coefficiente de Poisson
	F_máx ± σ	σ_máx ± σ	σ_f ± σ	Def ± σ	E_m ± σ	v ± σ
3C1	1092 ± 0,211	31,264 ± 3,28	24,107 ± 2,656	0,002 ± 0,001	2183,543 ± 1181,736	0,205 ± 0,023
3C2	542 ± 0,091	5,207 ± 0,368	3,963 ± 0,439	0,001 ± 0,002	215,915 ± 66,765	0,153 ± 0,031
3C3	98 ± 0,005	1,184 ± 0,117	1,049 ± 0,114	0,001	129,616 ± 32,409	0,062 ± 0,003
3C4	65 ± 0,003	0,77 ± 0,089	0,547 ± 0,08	0,001	126,853 ± 14,774	0,047 ± 0,003

Propiedades a tensión en la sección transversal (**Cilindro 5**) de la palma *R. regia*

	Fuerza máxima [N]	Esfuerzo máximo [MPa]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Deformación máx. [mm]	Módulo de Young [MPa]	Coefficiente de Poisson
	F_máx ± σ	σ_máx ± σ	σ_f ± σ	Def ± σ	E_m ± σ	v ± σ
5C1	956 ± 0,481	28,966 ± 4,465	23,418 ± 3,352	0,002 ± 0,001	3586,368 ± 170,536	0,221 ± 0,028

Al igual que en los resultados a compresión, las propiedades a tensión son mayores en la sección basal y se reducen gradualmente a medida que llegan a lo más alto de la palma, la sección apical. La tabla 5 muestra los valores de las propiedades en la periferia de los cilindros 1 y 3, y la gráfica 5 evidencia el comportamiento de las muestras a tensión y comprueba lo descrito anteriormente.

Tabla 5. Propiedades a tracción paralela al grano comparando las diferentes secciones en la periferia (Cilindros 1 y 3)

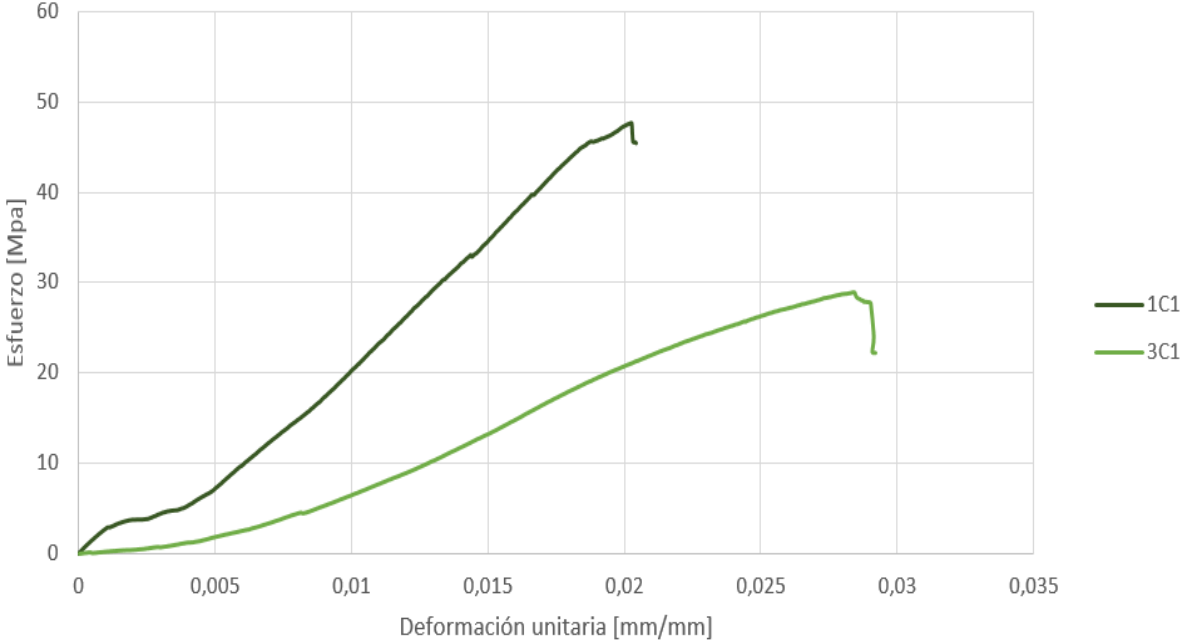
Propiedades a tracción en la sección longitudinal de la palma *R. regia*

	Fuerza máxima [N]	Esfuerzo máximo [MPa]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Deformación máx. [mm]	Módulo de Young [MPa]	Coefficiente de Poisson
	F_máx ± σ	σ_máx ± σ	σ_f ± σ	Def ± σ	E_m ± σ	v ± σ
1C1	1413 ± 0,012	47,682 ± 0,15	45,463 ± 0,18	0,005 ± 0,002	2865,49 ± 1,852	0,225 ± 0,015
3C1	1092 ± 0,211	31,264 ± 3,28	24,107 ± 2,656	0,002 ± 0,001	2183,54 ± 1181,7	0,205 ± 0,023

El coeficiente de Poisson para la periferia (última columna de la tabla 5) varía longitudinalmente entre [0,225 y 0,205] según los ensayos de tracción. Lo cual, al ser comparado con la tabla de propiedades de maderas de la Asociación Brasileira de Normas Técnicas es coincidente con los valores para maderas de baja densidad²². Pero, también resulta muy cercano al valor promedio de la mayoría de los metales los cuales se encuentran entre [0,25 y 0,35].

²² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de madeira, NBR 7190. Rio de Janeiro: ABNT–Associação Brasileira. 1997. 9 p.

Gráfica 5. Diagrama esfuerzo vs deformación en la sección longitudinal del tronco, comparando los cilindros 1 y 3 en su periferia.



4. DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio indicaron una correlación entre la morfología del tronco de la palma real (*R. regia*) y sus propiedades mecánicas. La madera de la palma presenta muchas ventajas, tales como su amplia disponibilidad en los trópicos, crecimiento recto del tronco y diferentes densidades para distintos usos. Por otro lado, algunas de sus desventajas observables durante la preparación de las probetas para ensayos mecánicos, son su alta resistencia al corte en la periferia y alto contenido de humedad en el centro del tronco, factores que afectan las herramientas de corte, dificultando su procesamiento.

El objetivo general de esta investigación se concentró en el desarrollo experimental de las propiedades físicas y mecánicas de la madera del tronco de la palma real. Se pretendía evaluar la relación entre la estructura, la densidad y sus propiedades mecánicas para responder al creciente interés en materiales biodegradables en la ingeniería. Dichos esfuerzos permitieron identificar algunas propiedades a lo largo y ancho del tronco a partir de ensayos destructivos, seguidos por análisis matemáticos y estadísticos.

Los resultados a compresión paralelo al grano de la palma real obtenidos en esta investigación comparados con los estudios realizados con palma de coco (*Cocos nucífera* L.) obtenida en México en la investigación de Fathi, muestran una similitud importante, ya que el módulo de ruptura promedio en la periferia alcanza 52,2 MPa, y se va disminuyendo en dirección radial, con valores en la región media de 28,1 MPa y por último cerca al centro de 15,7 MPa. Igualmente, en la dirección longitudinal, la palma de aceite (*Elaeis guineensis*) de este estudio, analizada a alturas de 2, 5 y 7 m, disminuyó sus propiedades a la compresión paralela al grano hacia el ápice, con valores de 27,6 MPa, 25,6 MPa y 13,8 MPa, respectivamente. Sin embargo, dichas similitudes no fueron visibles en el dátil (*Phoenix dactylifera*),

ya que, las propiedades mecánicas no disminuyeron en la dirección radial hacia el centro, sino que se incrementaron en la sección entre la periferia y el centro.

En el estudio conducido por González ²³ se muestra que no hay una disminución en las propiedades mecánicas con la variación de la altura en la palma de coco, y que, los valores máximos de compresión se encuentran en la periferia con valores entre 39.7 y 40.7 MPa, La variación entre los estudios realizados por Fathi (2014) y González (2015) indican la diferencias que puede ocasionar el entorno en el desarrollo de su morfología, afectando sus propiedades físicas y mecánicas.

La siguiente tabla recopila especies maderables con sus respectivas propiedades mecánicas. En comparación con este estudio, se observa que el máximo valor en el ensayo de compresión paralelo a las fibras de la palma real, es similar en magnitud a las maderas duras y supera a las blandas. (Tabla 6)²⁴

²³ GONZÁLEZ-MOSQUERA, O. M. An engineering approach to understand senile coconut palms as foundation for biomimetic applications. Doctor of Philosophy. Griffith: Griffith School of Engineering. 2015. p. 60-95.

²⁴ *Ibíd.*, p. 100.

Tabla 6. Propiedades mecánicas de diferentes especies maderables

Especies de maderas	densidad básica	MOE	MOR (Compresión)
	[kg/m ³]	[Mpa]	[Mpa]
Madera de palma real (Este estudio)			
Periferia	690	4156,68	41,17
Centro	641	1490,67	10,16
Interior	520	413,43	3,57
Madera de palma real (Henry-Torriente et al., 2015)	556	-	50,393
Madera de palma de coco (González, 2015)	800	7521	35,1
Madera de palma de coco, México (Fathi, 2014)			
Periferia	800	16927	52,2
Centro	490	6834	28,1
Interior	340	4007	15,7
Madera de palma de aceite (Fathi, 2014)			
Periferia	563,3	8084,0	22,3
Centro	420,0	4085,0	11,1
Interior	363,3	2393,3	6,7
Maderas duras (Bergman et al., 2010)			
Roble	800	10900	37,4
Abedul	550	10300	23,3
Arce	560	10700	27,7
Nuez	510	9800	29,6
Maderas blandas (Bergman et al., 2010)			
Cedro	400	9000	21,6
Pino, rojo	410	8800	18,8
Pino, hoja larga	540	11000	29,8

Fuente: FATHI, 2014. BERGMAN et al., 2010; GONZÁLEZ, 2015

Respecto a las propiedades obtenidas en los ensayos a tensión paralelo a las fibras de esta investigación, Henry-Torriente et al., que desarrollaron las propiedades mecánicas en la palma real, no reportaron resultados para dicho ensayo. Hasta ahora, ningún otro investigador ha presentado resultados sobre las propiedades a tensión en la palma *R. regia*.

4.1 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

En un estudio previo realizado para medir las propiedades físicas y mecánicas usando palma real de cuatro diferentes regiones de Cuba se encontró que la compresión paralela a las fibras tuvo un valor promedio de $50,393 \pm 6,125$ MPa, sin embargo, no es apreciable el módulo de elasticidad²⁵. En nuestro estudio se pudo observar que la resistencia a la compresión paralela al grano promedio para la periferia fue de $44,77 \pm 3,57$ MPa, con un módulo de elasticidad de $4156,58 \pm 318,133$ MPa. Sin embargo, este estudio solo fue realizado en la ciudad de Bucaramanga, debido al alto costo del corte y traslado de especímenes adultos de más de 10 m. Se propone un trabajo futuro el cual se encargue de analizar especímenes nativos de Colombia que se encuentran amenazadas por su potencial maderable (tales como, *Iriartea deltoidea* y *Wettinia kalbreyeri*) para dar un soporte científico e incentivar su cultivo. De igual manera, la realización de ensayos mecánicos complementarios que permitan hacer las respectivas comparaciones con otras maderas, tales como ensayos de flexión y esfuerzos de corte. Adicionalmente, se sugiere que las investigaciones no se limiten a obtener propiedades mecánicas, sino también caracterizar las propiedades térmicas y acústicas que podría proporcionar la tripa suave o parénquima en aplicaciones generales.

4.2 SIGNIFICANCIA DE LOS RESULTADOS

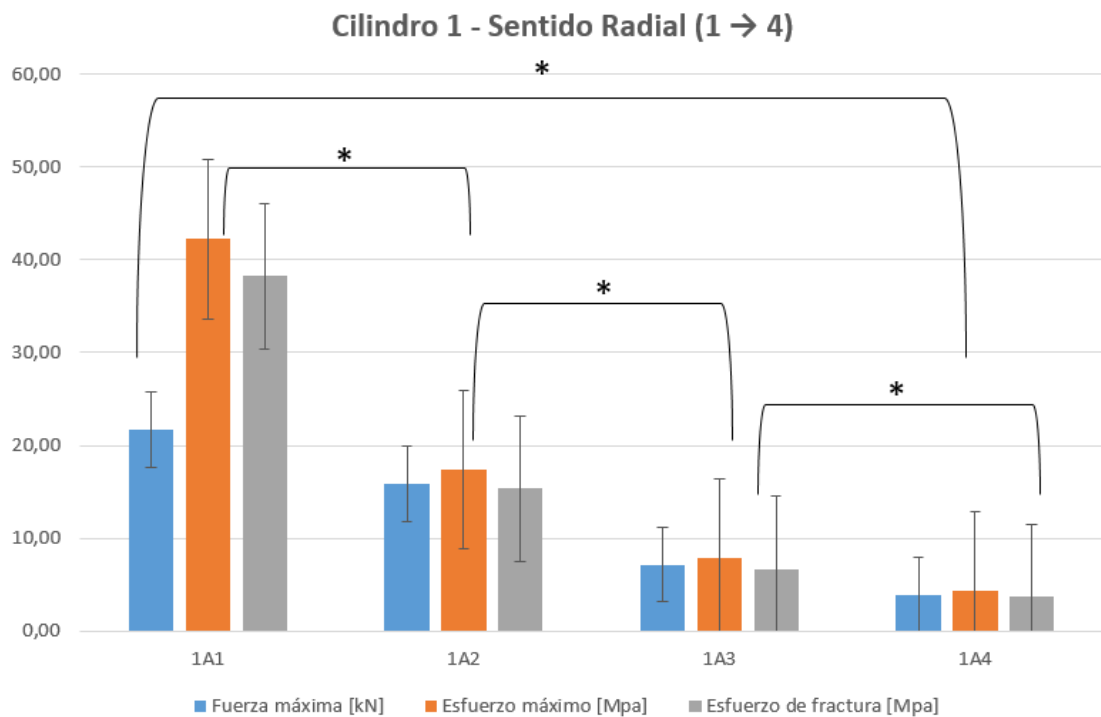
En las gráficas 6, 7 y 8 se evidencian las diferencias significativas, el valor promedio y la desviación estándar de la fuerza máxima, el esfuerzo máximo, el esfuerzo de fractura y el módulo de Young para la *R. regia* en dirección transversal a diferentes alturas del tallo (Cilindros 1,2 y 3).

En la gráfica 6 todas las propiedades en el cilindro 1 tuvieron diferencias significativas entre sí con $p < 0.0125$. La gráfica 7 muestra que no se presentaron

²⁵ HENRY-TORRIENTE, P. P., et al., Op. cit., p. 63-71.

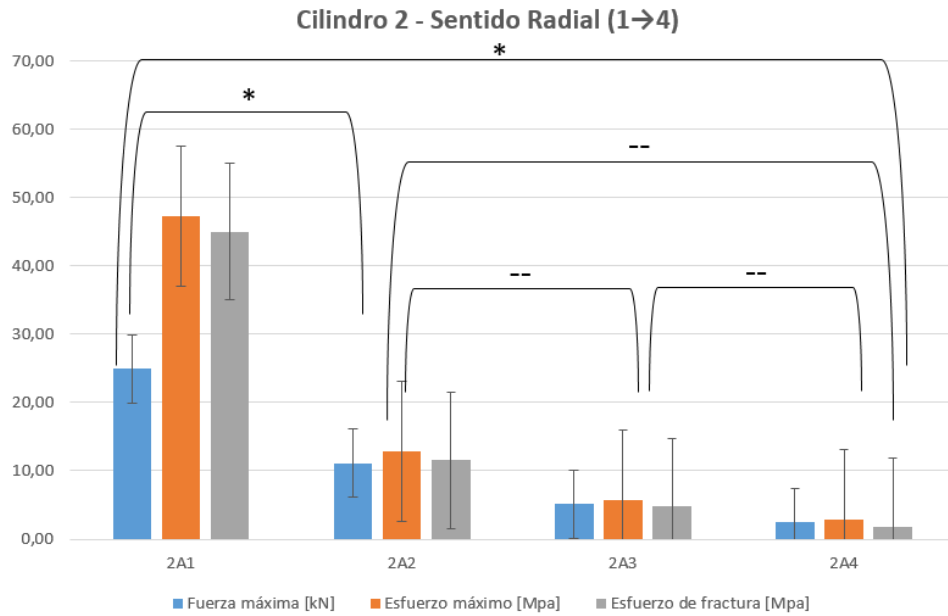
diferencias significativas entre las propiedades con respecto a 2A2, 2A3 y 2A4 a excepción del módulo de Young, este tuvo diferencia significativa coincidente con el cilindro 1, con un $p < 0.0125$; la sección 2A1 sí presentó diferencias significativas con respecto a todas las demás secciones en dirección radial. En la gráfica 8 todas las propiedades presentaron diferencias entre las secciones con un $p < 0.01$, menos 3A4 y 3A5 entre los cuales la única diferencia significativa estuvo en el módulo de Young.

Gráfica 6. ANOVA sección radial del cilindro 1 (Propiedades a compresión).



* diferencias significativas $p < 0,0125$

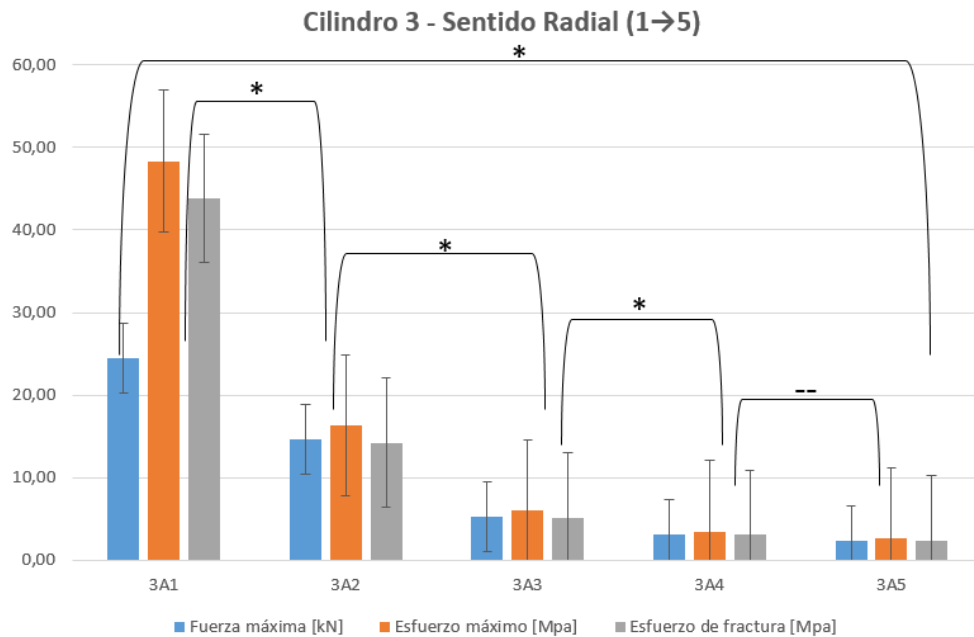
Gráfica 7. ANOVA sección radial del cilindro 2 (Propiedades a compresión).



* diferencias significativas $p < 0,0125$

-- No presenta diferencias significativas; excepto por Módulo de Young: $p < 0,0125$

Gráfica 8. ANOVA sección radial del cilindro 3 (Propiedades a compresión).



* diferencias significativas $p < 0,01$

-- No presenta diferencias significativas; excepto por Módulo de Young: $p < 0,01$

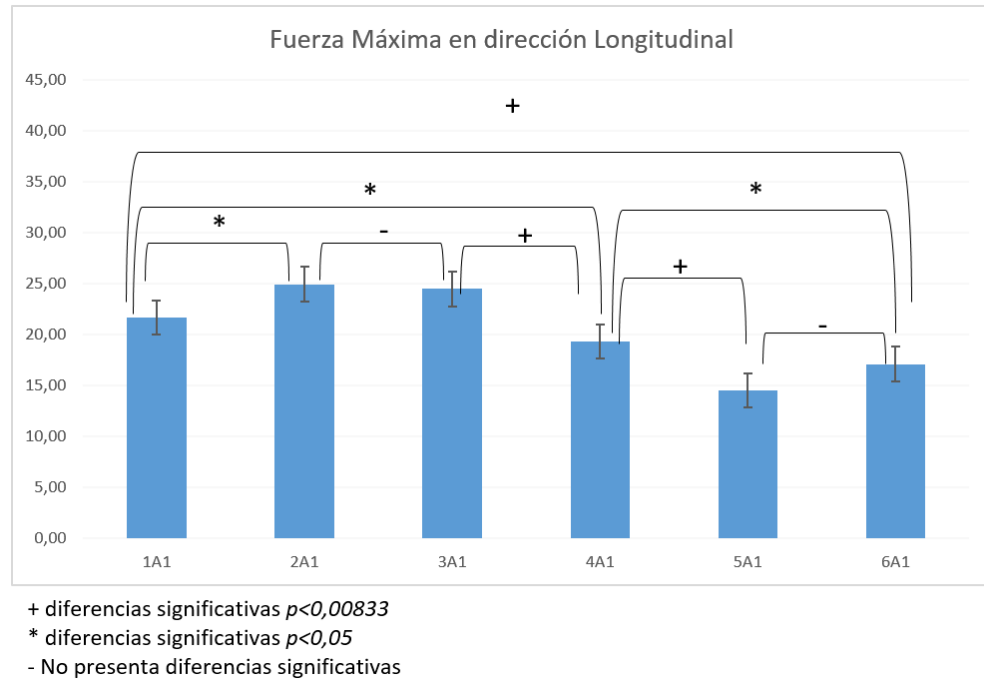
Las gráficas 9, 10, 11 y 12 muestran la fuerza máxima, el esfuerzo máximo, el esfuerzo de fractura y el módulo de Young en cada una de las secciones de la palma, cilindros 1 a 6 en dirección longitudinal.

La gráfica 9 muestra la variación del alcance de la fuerza máxima a lo largo del tallo de la palma *R. regia* sin presentar diferencias significativas entre los cilindros 2 y 3 y entre 5 y 6, pero sí entre 1 y 2, 1 y 4, 1 y 6 con un $p < 0.05$, y en las demás comparaciones presentó diferencias significativas con un $p < 0.00833$.

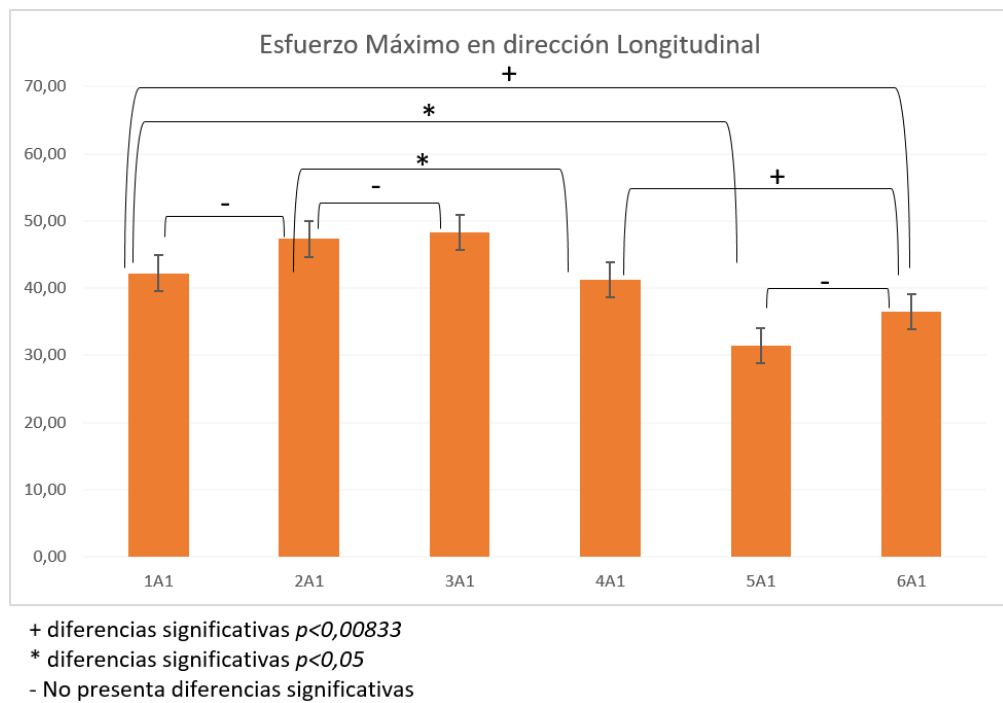
La gráfica 10 no presentó diferencias significativas para el esfuerzo máximo entre los cilindros 1 y 2, 1 y 4, 2 y 3, y 5 y 6; por el contrario, entre 1 y 5, 1 y 6, 2 y 4, y 2 y 5 presentó diferencias significativas con un $p < 0.05$; para los demás cilindros como 2 y 6, 3 y 4, 3 y 5, etc., presentó diferencias significativas con un $p < 0.00833$.

La gráfica 12 con un $p = 0.088$ no presentó diferencias significativas para el módulo de Young con respecto a los 6 cilindros en su periferia.

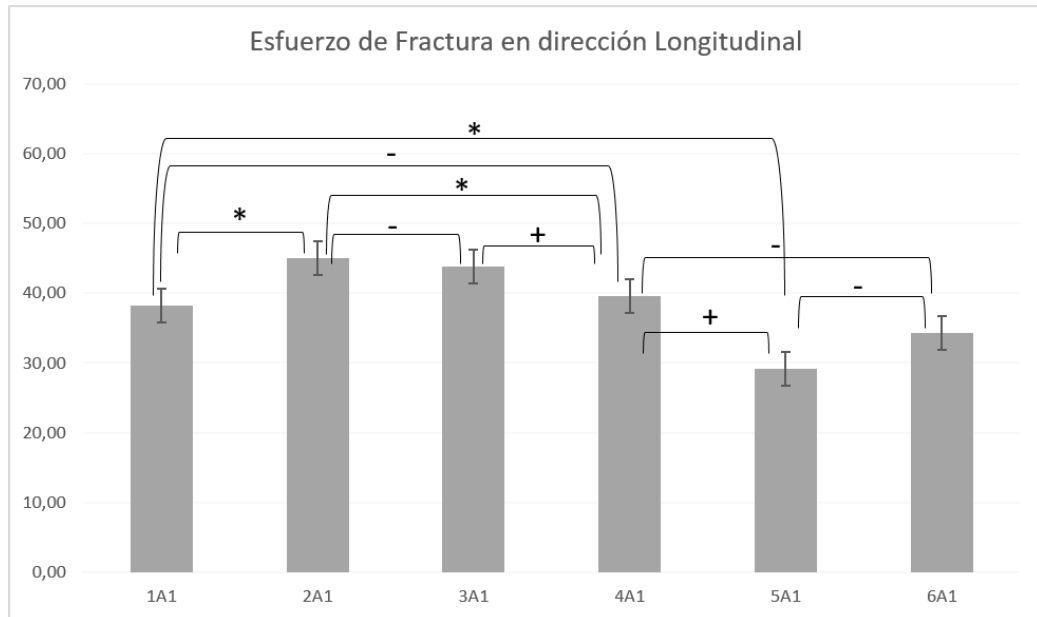
Gráfica 9. ANOVA Fuerza máxima en la sección longitudinal de R. regia.
(Propiedades a compresión).



Gráfica 10. ANOVA Esfuerzo máximo en la sección longitudinal de R. regia

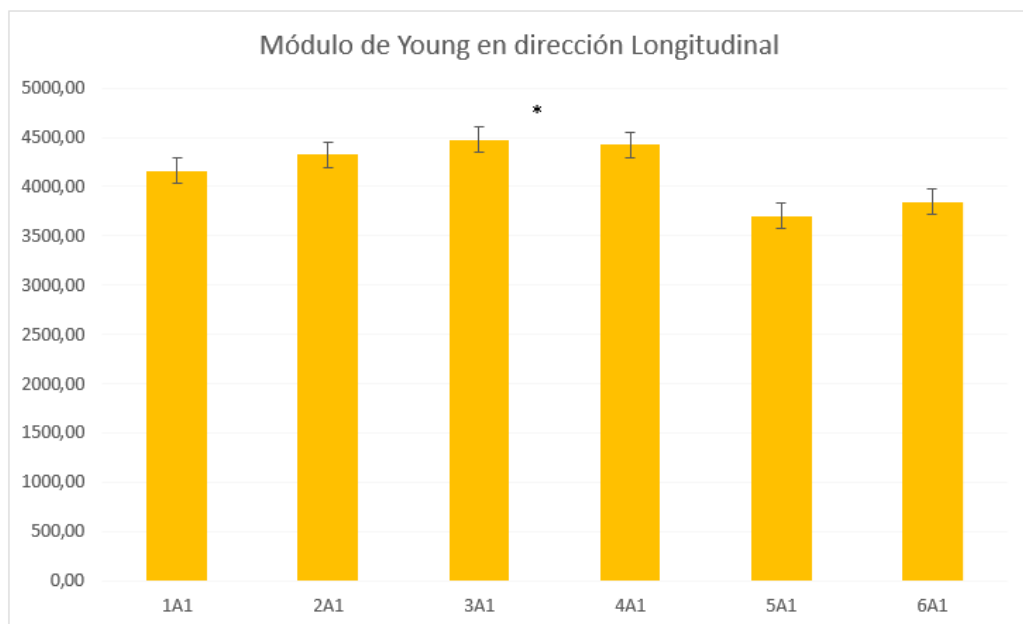


Gráfica 11. ANOVA Esfuerzo de fractura en la sección longitudinal de la R. regia (Propiedades a compresión).



+ diferencias significativas $p < 0,00833$
 * diferencias significativas $p < 0,05$
 - No presenta diferencias significativas

Gráfica 12. ANOVA Módulo de Young en la sección longitudinal de la R. regia



* No presenta diferencias significativas; $p = 0,088$

5. CONCLUSIONES

- Se determinaron los esfuerzos máximos para la palma real (*R. regia*), y se encontró una alta resistencia a la compresión como a la tensión paralela a las fibras, evidenciando características promisorias de esta especie como recurso maderable.
- Los valores de las características físicas y mecánicas que se determinaron mediante a las pruebas son notablemente mayores en la periferia y disminuyen gradualmente a medida que se llega al interior del tronco. Lo anterior está relacionado con la distribución de las fibras de esclerénquima hacia la periferia.
- Comparando los cortes transversales de las secciones, el valor de las propiedades mecánicas estudiadas disminuyeron hacia el ápice del tronco debido principalmente al alto contenido de humedad, en comparación con la región basal del mismo.
- Comparando este proyecto con investigaciones anteriores, se aporta a la comunidad científica valores de propiedades a tensión paralelo a las fibras y los módulos de elasticidad a tensión y compresión de *R. regia*

REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de madeira, NBR 7190. Rio de Janeiro: ABNT–Associação Brasileira. 1997. 9 p.

BALICK, M. J. Useful palms of the world: a synoptic bibliography. New York: Columbia University Press. 1990. p. 20

BENYUS, Janine M. Biomimicry: Innovation inspired by nature. New York: Harper Perennial. 2002. p. 15-38.

Bergman, R., Cai, Z., Clausen C., Diitenberg, M. Falk, R., Frihart, C., Glass, S., Hunt, C., Ibach, R. *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*. New York. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory. 2010. p. 104.

CALLISTER, William. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Universidad de Utah: Departamento de ciencia e ingeniería de materiales. Bogotá: Editorial Reverté. 2002. p. 118-132.

Cook, O. F. (1901). *A synopsis of the palms of Puerto Rico*. Puerto Rico: Bulletin of Torrey Botanical Club.

DELGADO, G. Propiedades de la madera. Ciudad de Mérida: Universidad de los Andes Mérida. 1987. p. 23-25.

FATHI, Leila. Structural and mechanical properties of the wood from coconut palms, oil palms and date palms. Hamburg: Universität Hamburg. 2014. p. 6-16.

FRÜHWALD, A., PEEK, R., & SCHULTE, M. Utilization of coconut timber from North Sulawesi, Indonesia. GTZ. 1992. p. 78.

GALEANO, Gloria *et. al.* Plan de conservación, manejo y uso sostenible de las palmas de Colombia. . Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Universidad Nacional de Colombia. 2015. p. 23-25.

GIL, Ivonne y PRADA, Ronny. Análisis y caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de la palma de lata. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. 2008. p. 44.

HENDERSON, Andrew; GALEANO, Gloria and BERNAL, Rodrigo. Field guide to the palms of the Americas. New Jersey: Princeton University Press. 1995. p. 134-135.

HENRY-TORRIENTE, P. P., GARCÍA-DELGADO, J. M., GARCÍA-MANTILLA, M. V., y MORENO-CARO, I. Propiedades y usos de la madera de *Roystonea Regia* (H.B.K.) O. F. Cook. (Palma Real). Forestal Baracoa. 2015. p. 63-71.

JOHNSON, Dennis V. Non wood forest products. Tropical Palms. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2011. p. 10-18.

JONES, D. L. Palms of the World. Washington: Smithsonian Institution Press. 1995. p. 50.

KILLMANN, W. Struktur, Eigenschaften und Nutzung von Stämmen wirtschaftlich wichtiger Palmen. Hamburg: Universität Hamburg. 1993. p. 48.

MISSOURI BOTANICAL GARDEN. *EOL: Encyclopedia of Life*. Consultado el 14 de Octubre de 2017. [En línea] Disponible en: <http://www.efloras.org/>

PARTHASARATHY, M. and KLOTZ, L. H. Palm "wood". Springer-Verlag. 1976. p. 215-229.

RANA, M.; DAS, A. K. and ASHADUZZAMAN, M. Physical and mechanical properties of coconut palm (*Cocos nucifera*) stem. Bangladesh journal of scientific and industrial research. 2015. p. 39-45.

RICH, Paul M. Mechanical Architecture of Arborescent Rain Forest Palms. En: Principes. Noviembre, 1986. Massachusetts: Universidad de Harvard. vol 30, no 3, p. 117-131.

VARGAS, M., Julio O. La madera: Clasificación y propiedades. Cochabamba: Escuela de Ciencias Forestales. 2014. p. 34.

WILBON, P. A. Progress in renewable polymers from natural terpenes, terpenoids, and rosin. *Macromolecular Rapid Communications*. 2002. p. 8-37.

ZONA, Scott. Roystonea (Arecaceae: Arecoideae). New York: The New York Botanical Garden. 1996. p. 25-27.