

# Caracterización de propiedades físicas y mecánicas para el uso estructural de la madera de la especie “*Acacia Mangium*”



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**Cristian Dario Garzón López**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá D.C  
2022



# Caracterización de propiedades físicas y mecánicas para el uso estructural de la madera de la especie “*Acacia Mangium*”

**Cristian Dario Garzón López**

Trabajo final como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Estructuras**

Directora:

Ph.D. Caori Patricia Takeuchi Tam

Línea de investigación en Materiales para Estructuras

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C

2022



Si tú crees que puedes, puedes. Si tú crees que no puedes, no puedes. Tanto si piensas una cosa como la otra, estas en lo cierto.

Henry Ford.

El aspecto más triste de la vida en este momento es que la ciencia reúne el conocimiento más rápidamente que la sociedad reúne la sabiduría.

Isaac Asimov.



## **Declaración de obra original**

Yo, Cristian Dario Garzón López, declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Cristian Dario Garzón López

Fecha: 24/08/2022





# Contenido

	Pág.
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de símbolos .....</b>	<b>XIX</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>XXI</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Identificación del problema .....	3
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos .....	4
1.3. Justificación.....	4
1.4. Antecedentes y estado del arte .....	5
<b>2. Marco Teórico.....</b>	<b>11</b>
2.1. Acacia Mangium .....	11
2.2. Compresión paralela al grano.....	13
2.3. Compresión perpendicular al grano .....	14
2.4. Flexión estática .....	14
2.5. Tracción paralela al grano .....	15

2.6.	Tracción perpendicular al grano .....	16
2.7.	Cortante o cizallamiento.....	17
2.8.	Contenido de humedad.....	17
2.9.	Homocedasticidad.....	18
2.10.	Pruebas de normalidad.....	18
2.11.	Análisis de varianzas (ANOVA).....	20
2.12.	Análisis de varianzas multivariante.....	21
<b>3.</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>23</b>
3.1.	Obtención de la materia prima .....	24
3.2.	Elaboración de las probetas .....	28
3.3.	Realización de los ensayos en laboratorio.....	32
3.3.1	Compresión paralela al grano .....	34
3.3.2	Compresión perpendicular al grano .....	35
3.3.3	Flexión estática.....	36
3.3.4	Tensión paralela al grano .....	37
3.3.5	Tensión perpendicular al grano.....	37
3.3.6	Cortante o cizallamiento .....	38
3.3.7	Contenido de humedad.....	39
3.3.8	Densidad o peso específico.....	40
<b>4.</b>	<b>Cálculos y resultados .....</b>	<b>41</b>
4.1.	Densidad y contenido de humedad .....	42
4.2.	Compresión paralela al grano.....	44
4.3.	Compresión perpendicular al grano .....	49
4.4.	Flexión estática .....	54

4.5.	Tracción paralela al grano .....	57
4.6.	Tracción perpendicular al grano .....	63
4.7.	Cortante .....	64
<b>5.</b>	<b>Análisis de resultados .....</b>	<b>67</b>
5.1.	Densidad y contenido de humedad .....	67
5.2.	Compresión paralela al grano.....	69
5.3.	Compresión perpendicular.....	73
5.4.	Flexión estática .....	74
5.5.	Tensión paralela.....	79
5.6.	Tensión perpendicular .....	81
5.7.	Cortante .....	82
5.8.	La <i>Acacia Mangium</i> Wild en la NSR-10.....	84
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>87</b>
6.1.	Conclusiones.....	87
6.2.	Recomendaciones .....	90
<b>7.</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>93</b>



## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 3-1 Cantidad de probetas ensayadas cuyos resultados fueron tenidos en cuenta.	33
Tabla 4-1 Peso y dimensiones probeta II28BACL1.....	43
Tabla 4-2 Densidades probeta II28BACL1 .....	43
Tabla 4-3 Contenido de humedad probeta II28BACL1 .....	44
Tabla 4-4 Cargas y esfuerzos a compresión paralela probeta I22BHCL1 .....	46
Tabla 4-5 Resistencia ajustada a la compresión probeta I22BHCL1 .....	46
Tabla 4-6 Esfuerzos admisibles a la compresión paralela al grano.....	48
Tabla 4-7 Densidad y módulo de elasticidad por compresión paralela al grano .....	49
Tabla 4-8 Cargas y esfuerzos a compresión perpendicular de la probeta I14BACT1.....	50
Tabla 4-9 Resistencia ajustada a la compresión perpendicular probeta I14BACT1 .....	51
Tabla 4-10 Esfuerzos admisibles a la compresión perpendicular al grano .....	53
Tabla 4-11 Densidad y esfuerzo a la compresión perpendicular al 1% de deformación	53
Tabla 4-12 Resistencia a la compresión perpendicular al grano.....	53
Tabla 4-13 Módulo de elasticidad y resistencia máxima a flexión probeta I18BHF1.....	55
Tabla 4-14 Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad ajustado probeta I18BHF1	56
Tabla 4-15 Esfuerzos admisibles a la flexión, módulos de elasticidad y densidades.....	57
Tabla 4-16 Cargas y esfuerzos a tracción paralela probeta I27BATL2 .....	60
Tabla 4-17 Esfuerzos admisibles a la tracción paralela al grano y módulo de elasticidad	62
Tabla 4-18 Resistencia máxima a la tracción perpendicular de algunas probetas .....	63
Tabla 4-19 Resistencia a la tracción perpendicular al grano .....	64
Tabla 4-20 Resistencia máxima al corte paralelo de algunas probetas.....	65
Tabla 4-21 Esfuerzos admisibles a la rotura por cizallamiento .....	66

XIV *Caracterización de propiedades físicas y mecánicas para el uso estructural de la madera de la especie "Acacia Mangium"*

Tabla 5-1 Densidad y gravedad específica encontrada para la madera de <i>Acacia Mangium</i> Wild .....	68
Tabla 5-2 Esfuerzos admisibles según NSR-10 en MPa .....	85

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 2-1 Dirección de la carga según orientación respecto de la fibra .....	12
Figura 2-2 Partes de un tronco de madera .....	12
Figura 3-1 Ubicación de las zonas de explotación .....	24
Figura 3-2 Panorámica Lote I (Izquierda) y Lote II (Derecha).....	25
Figura 3-3 Árboles talados y marcados. ....	26
Figura 3-4 Trozas puestas en bodega en Chinauta. ....	27
Figura 3-5 Corte y marcado de las trozas para obtención de repisas .....	27
Figura 3-6 Elaboración de probetas en la carpintería de la facultad de ingeniería .....	29
Figura 3-7 Forma y dimensiones nominales de probetas en mm. ....	30
Figura 3-8 Elaboración de probetas en carpintería externa .....	31
Figura 3-9 Marcación de probetas.....	31
Figura 3-10 Esquema y ensayo en laboratorio resistencia a compresión paralela .....	34
Figura 3-11 Esquema y ensayo a compresión perpendicular .....	35
Figura 3-12 Esquema y ensayo en laboratorio a flexión estática .....	36
Figura 3-13 Ensayo resistencia a la tracción paralela al grano.....	37
Figura 3-14 Ensayo resistencia a la tracción perpendicular.....	38
Figura 3-15 Ensayo resistencia a cortante paralelo al grano .....	39
Figura 3-16 Determinación del peso para contenido de humedad .....	40
Figura 4-1 Gráfica Fuerza vs Acortamiento de la probeta I22BHCL1.....	45
Figura 4-2 Gráfica Regresión lineal Compresión paralela de la probeta I22BHCL1 .....	46
Figura 4-3 Gráfica Esfuerzo vs Deformación de la probeta I22BHCL1 .....	47
Figura 4-4 Gráfica Fuerza vs Desplazamiento de platina de la probeta I14BACT1 .....	50

Figura 4-5 Gráfica Esfuerzo vs Desplazamiento de platina de la probeta I14BACT1 ....	51
Figura 4-6 Gráfica Fuerza vs Deflexión de la probeta I18BHF1 .....	54
Figura 4-7 Gráfica Fuerza vs desplazamiento de cabezal de la probeta I18BHF1.....	55
Figura 4-8 Gráfica Fuerza vs Alargamiento de la probeta I27BATL2.....	58
Figura 4-9 Gráfica Fuerza vs desplazamiento de cabezal de la probeta I27BATL2 .....	59
Figura 4-10 Gráfica Regresión lineal Tracción paralela I27BATL2.....	60
Figura 4-11 Gráfica Esfuerzo vs Deformación de la probeta I27BATL2 .....	61
Figura 5-1 Gráfico de cajas y bigotes para resistencia máxima a la compresión paralela	70
Figura 5-2 Módulo de elasticidad a compresión paralela vs Esfuerzo máximo a compresión paralela.....	71
Figura 5-3 Esfuerzo máximo a la rotura por compresión paralela vs Densidad.....	72
Figura 5-4 Módulo de elasticidad por compresión paralela al grano vs densidad.....	72
Figura 5-5 Gráfico de cajas y bigotes para la resistencia a la compresión perpendicular	73
Figura 5-6 Resistencia a la compresión perpendicular en el límite proporcional vs Densidad.....	74
Figura 5-7 Gráfico de cajas y bigotes de módulo de elasticidad por flexión según el tipo de secado .....	76
Figura 5-8 Gráfico de cajas y bigotes de Resistencia máxima a la flexión según el tipo de secado .....	76
Figura 5-9 Correlación del Módulo de elasticidad vs Módulo de ruptura. ....	77
Figura 5-10 Correlación módulo de elasticidad a flexión vs Densidad.....	78
Figura 5-11 Correlación Módulo de ruptura a flexión vs Densidad. ....	78
Figura 5-12 Gráfico de cajas y bigotes de resistencia máxima a la tracción paralela según el tipo de secado. ....	79
Figura 5-13 Gráfico de cajas y bigotes del módulo de elasticidad por tracción según el tipo de secado. ....	80
Figura 5-14 Correlación Módulo de elasticidad a tracción vs resistencia máxima a la tensión paralela al grano. ....	81
Figura 5-15 Gráfico de cajas y bigotes de la resistencia máxima a la tensión perpendicular al grano según el tipo de secado. ....	82



Figura 5-16 Gráfico de cajas y bigotes de la resistencia máxima al corte paralelo al grano según la dirección de aplicación de la carga..... 83

Figura 5-17 Correlación Resistencia al cizallamiento paralelo al grano vs Densidad. .... 84



## Lista de símbolos

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>	<b>Unidad</b>
<b><i>A</i></b>	Área de la sección transversal mínima de la probeta	cm <sup>2</sup>
<b><i>a</i></b>	Ancho de la sección transversal de la probeta	cm
<b><i>d</i></b>	Acortamiento experimentado por la probeta	cm
<b><i>E</i></b>	Módulo de elasticidad por flexión	N/cm <sup>2</sup>
<b><i>E<sub>C</sub></i></b>	Módulo de elasticidad a compresión paralela	N/cm <sup>2</sup>
<b><i>E<sub>T</sub></i></b>	Módulo de elasticidad a tracción paralela	N/cm <sup>2</sup>
<b><i>e</i></b>	Altura de la sección transversal de la probeta	cm
<b><i>F<sub>i</sub></i></b>	Esfuerzo admisible	MPa
<b><i>F<sub>0,05</sub></i></b>	Esfuerzo característico	N/cm <sup>2</sup>
<b><i>I</i></b>	Momento de inercia	cm <sup>4</sup>
<b><i>L</i></b>	Luz entre soportes o cuchillas	cm
<b><i>m<sub>1</sub></i></b>	Masa de la muestra antes del secado	g
<b><i>m<sub>2</sub></i></b>	Masa de la muestra después del secado	g
<b><i>P</i></b>	Carga máxima soportada por la probeta	N
<b><i>P<sub>p</sub></i></b>	Carga para un acortamiento de 0,25cm	N
<b><i>P<sub>1</sub></i></b>	Carga en el límite de proporcionalidad	N
<b><i>P<sub>2</sub></i></b>	Fuerza correspondiente a un alargamiento o acortamiento	N
<b><i>S</i></b>	Superficie impresa por la pieza de presión sobre la probeta	cm <sup>2</sup>
<b><i>S<sub>CZ</sub></i></b>	Superficie del plano en que se produce el cizallamiento	cm <sup>2</sup>

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>	<b>Unidad</b>
$W$	Contenido de humedad	%
$\Delta$	Incremento de la deflexión	cm
$\sigma_{CL}$	Resistencia máxima a la rotura por compresión paralela	N/cm <sup>2</sup>
$\sigma_{CP}$	Resistencia por compresión perpendicular al grano	N/cm <sup>2</sup>
$\sigma_{CLP}$	Resistencia en el límite de proporcionalidad.	N/cm <sup>2</sup>
$\sigma_{CZ}$	Resistencia máxima de rotura por corte o cizallamiento	N/cm <sup>2</sup>
$\sigma_F$	Resistencia máxima a la flexión	N/cm <sup>2</sup>
$\sigma_{TL}$	Resistencia máxima a la tracción paralela	N/cm <sup>2</sup>
$\sigma_{TP}$	Resistencia máxima a la tracción perpendicular	N/cm <sup>2</sup>
$\sigma_{LP}$	Resistencia en el límite de proporcionalidad.	N/cm <sup>2</sup>
$\rho$	Densidad de la probeta en el momento de ensayo	g/cm <sup>3</sup>

## Resumen

El trabajo consistió en la caracterización de propiedades mecánicas básicas de interés para el uso en elementos estructurales en edificaciones de la madera de *Acacia Mangium* Wild proveniente del Valle del Rio Sinú en el departamento de Córdoba, con el fin de ampliar su presencia dentro de la industria de la construcción en Colombia.

Para la determinación de las diferentes propiedades se realizó una visita a las zonas de donde se obtuvieron las trozas de madera a estudiar, las cuales se dividieron en dos grandes grupos, secado en horno y secado al aire, con el fin de ser luego caracterizadas física y mecánicamente. En el desarrollo de la presente investigación se evaluaron el módulo de elasticidad y las resistencias a la flexión, tracción y compresión paralela y perpendicular al grano y cortante. Adicionalmente, se determinaron densidades y contenidos de humedad.

Los resultados obtenidos permiten apreciar una madera de buena calidad, la cual es apta para su uso como material principal en la elaboración de elementos estructurales en edificaciones. Realizando una clasificación según el módulo de elasticidad como lo precisa el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) y comparando los diferentes valores con los presentados para diferentes maderas, se encuentra que la *Acacia Mangium* Wild puede ubicarse dentro de la categoría **ES5** de NSR-10.

**Palabras clave:** *Acacia Mangium*, Módulo de elasticidad, Propiedades mecánicas, Madera, Caracterización mecánica.



# Abstract

## **Characterization of physical and mechanical properties for the structural use of wood of the species “*Acacia Mangium*”.**

The study consisted of the characterization of basic mechanical properties of interest for the use of *Acacia Mangium* Wild wood from the Sinu River Valley in the department of Cordoba in structural elements in buildings, to expand its presence in the construction industry in Colombia.

To determine the different properties, a visit was made to the areas where the wood logs to be studied were obtained, which were divided into two large groups, oven-dried and air-dried, so as to be later physically and mechanically characterized. In the development of this research, the modulus of elasticity and resistance to bending, traction and compression parallel and perpendicular to the grain and shear were evaluated. In addition, densities and moisture contents were also determined.

The results obtained indicate a good quality wood, which is suitable for use as the main material in the elaboration of structural elements in buildings. A classification according to the modulus of elasticity as specified by the Colombian Seismic Resistant Construction Regulation (NSR-10) and comparing the different values with those presented for different woods, it is found that *Acacia Mangium* Wild can be placed within category ES5 of NSR-10.

**Keywords:** *Acacia Mangium*, Modulus of elasticity, Mechanical properties, Wood, Mechanical characterization.





# 1. Introducción

Desde sus inicios, el hombre ha buscado la forma de protegerse de las inclemencias del clima, para lo cual hace uso de los elementos a su alrededor. La madera es uno de los materiales que fue usado desde la prehistoria (Agustín et al., 2015) y aún hoy continúa vigente. Sin embargo, con el paso de los años, llegaron nuevos materiales a los que se dedicaron los mayores esfuerzos en investigación y desarrollo.

Debido a lo anterior, el uso de la madera como material estructural se ha rezagado y concentrado en determinadas zonas del planeta, lo cual se hace palpable al observar que en Europa o Norteamérica se presenta un mayor avance y desarrollo que en otras latitudes como la colombiana. Gracias a las políticas de sostenibilidad ambiental, en los últimos años ha cobrado importancia el uso de la madera con fines estructurales en la sociedad, ya existen plantaciones y planes de reforestación, que permiten obtener dicha materia prima de un modo más sustentable que otros materiales como el concreto o el acero. En el caso de Colombia, existen varias empresas dedicadas al cultivo, aprovechamiento y producción de la madera, además, se encuentran grandes extensiones que han sido reforestadas con especies potencialmente maderables, como la acacia, y que presentan hoy día un gran potencial de explotación (Vargas Rojas, 2020).

La *Acacia Mangium* fue introducida en Colombia en los años 90 para la reforestación de zonas que han sido degradadas por la minería o la ganadería, por su rápido crecimiento y adaptación a suelos poco fértiles (Álvarez de León & García-Rubio, 2007). Para el año 2016 en Colombia ya se habían plantado cerca de 129.000 ha de *A. Mangium*, presentando un enorme potencial para la expansión de la superficie cultivada. En la última década

gracias a su potencial maderable, adicional a su uso como manejo de la erosión y recuperación de suelos degradados, se han desarrollado proyectos de aprovechamiento en diferentes zonas del país, con el fin de emplearla para la elaboración de elementos de piezas de mobiliario como tableros de mesas, sillas, bibliotecas, armarios, entre otros, así como para la obtención de insumos para alimentación, taninos para pintura, biocarbón para energía y enmiendas de suelos.(Reyes M. et al., 2018)

Al ser un material vegetal, la acacia y en general la madera presenta variaciones en sus propiedades debido a múltiples factores, lo que obliga a realizar estudios e investigaciones de las materias primas, de manera específica y constante. En Colombia, se ha cultivado *Acacia Mangium* durante años, pero aún se encuentra sin precisar información relacionada con condiciones de cada región referente a aptitudes de cultivo, calidades genéticas, parámetros de producción y por supuesto características y propiedades mecánicas(Reyes M. et al., 2018). Por tal motivo, se trazó como objetivo la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de interés para el uso estructural de la madera de *Acacia Mangium*, cultivada en Colombia, específicamente en el valle del río Sinú en el municipio de Tierralta, departamento de Córdoba. Para hacerlo, se realizó una visita de campo a las zonas de explotación de donde se obtuvieron las maderas a caracterizar, posteriormente se obtuvieron las probetas, las cuales fueron ensayadas para determinar los módulos de elasticidad y las resistencias a la flexión, tracción y compresión paralela y perpendicular al grano y cortante. A cada una de las piezas ensayadas se le tomaron sus medidas, así como su peso antes de ensayo y se obtuvieron muestras para la determinación de contenidos de humedad. En el presente documento se incluyen: la justificación, objetivos, planteamiento del problema, antecedentes, marco teórico, metodología, cálculos, análisis de resultados y conclusiones.

## 1.1. Identificación del problema

El uso de materiales con menor impacto ambiental es una necesidad y tendencia mundial, con el fin de reducir y mitigar los efectos y el avance del cambio climático. Por tal motivo, la madera ha ido retomando poco a poco mayor protagonismo como materia prima para la construcción de diferentes tipos de edificaciones. A pesar de la existencia de cierta normatividad técnica, en muchos casos como el colombiano, esta es aún incipiente y/o desactualizada, a lo que ha de sumarse la escasa investigación realizada considerando la gran variabilidad que del material; pues la madera, al ser un material vegetal, presenta variaciones en sus propiedades, según su especie, localización, cuidado, etc.

Teniendo en cuenta esto, hoy se encuentran especies caracterizadas, por lo que se conocen ciertas propiedades de interés de muchas de estas, y es por consiguiente, que normativas técnicas como la NSR-10 brindan parámetros básicos necesarios para un correcto diseño estructural, sin embargo, esto no ocurre con otras especies como la *Acacia Mangium* cultivada en Colombia, la cual es hoy en día una de las principales especies que se está empleando para reforestación y que tiene el potencial de ser una fuente de materia prima importante, pero de la cual aún no se han realizado estudios para su caracterización estructural, imposibilitando su uso como material para la elaboración de elementos estructurales en edificaciones. Por esto, se ve la necesidad de preguntarse, ¿Cuáles son las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Acacia Mangium* necesarias para usarla con fines estructurales?

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

Determinar las propiedades mecánicas de la madera comercial de *Acacia Mangium* proveniente del Valle del Sinú (Córdoba).

## 1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar los especímenes en campo (muestra) de los cuales se obtendrán las probetas para la caracterización mecánica.
- Determinar el módulo de elasticidad y las resistencias a la flexión, tracción, compresión y cortante de la *Acacia Mangium* del Valle del Sinú.
- Determinar el contenido de humedad y la gravedad específica de la madera en el momento de ensayos mecánicos.

## 1.3. Justificación

Debido a la creciente necesidad de materiales ambientalmente sostenibles, alternativas como la madera se han vuelto atractivas para su uso y desarrollo. Sin embargo, debido a la alta variedad del material, se requiere un estudio específico por cada zona y especie con el fin de obtener los valores y propiedades características para un diseño adecuado. En el caso de la *Acacia Mangium*, se han realizado ensayos en otros países (Moya Roque et al., 2010), así como ensayos preliminares en Colombia, que dejan ver el potencial maderable que tiene dicha especie. Sin embargo, para su empleo como material para la elaboración de elementos estructurales en edificaciones se deben conocer algunas propiedades mínimas tales como módulos de elasticidad, las resistencias a la flexión, tracción y compresión paralela y perpendicular al grano, cortante y densidad.

La presente investigación tuvo como objetivo la determinación de las propiedades anteriormente mencionadas con el fin de habilitar el uso como material estructural de la *Acacia Mangium* cultivada en Colombia. Se espera que este trabajo esté disponible para toda la comunidad académica, ingenieros calculistas, y público en general, con el fin de permitir un diseño estructural adecuado usando la madera de *Acacia Mangium* que se encuentra disponible en nuestro entorno.

## 1.4. Antecedentes y estado del arte

La madera es una materia prima versátil que puede ser explotada sustentablemente. Es uno de los materiales para la construcción que puede brindar alternativas interesantes y un nuevo camino más amigable con el medio ambiente para las edificaciones del futuro. Como todo material, requiere de investigación para su desarrollo y evaluación de sus propiedades para poder brindarle un uso determinado. El problema planteado ha sido desarrollado previamente en otras latitudes en el caso de la *Acacia Mangium*, así como para otras especies. También, se han elaborado estudios para la determinación y/o comparación de los resultados obtenidos dependiendo de las normas de ensayos empleadas.

En el documento de (Acuña et al., 2005), titulado “Estudio comparativo entre normas de ensayo para madera de *Pinus Sylvestris* l. en uso resistente”. Se analizan los estudios realizados a un tipo de madera de un cultivo en particular, siguiendo dos metodologías de ensayo: una con probetas pequeñas, libres de defectos, y otra con probetas de madera de uso estructural comercial. Al comparar los resultados, se encuentran diferentes variaciones y en ocasiones se presentó falta de correlación entre estos. En general, los valores de resistencia a la flexión y los módulos de elasticidad de las probetas pequeñas son superiores a los de la madera de uso estructural. Además, se presentan variaciones al momento de encontrar la densidad, lo que se atribuye a la existencia de nudos, ya que en las piezas de menor tamaño hay más control que en las de dimensiones comerciales.

En el caso de especies similares, se encuentra un estudio de (Cobas & Monteoliva, 2018), titulado, “Modelos descriptivos de distribución de madera juvenil y madura en *Robinia pseudoacacia*”. En este estudio se analizan diferentes muestras de 10 árboles de una misma plantación para determinar los patrones de variación axial y radial de la densidad de la madera y longitud de fibras en el fuste de *Robinia pseudoacacia*. También se determina la edad de transición entre madera juvenil y madera madura, y se construye un modelo descriptivo de distribución de la madera juvenil en el fuste, con base en la densidad de madera y longitud de fibras. Entre las conclusiones del estudio, se destaca que las

variaciones se presentan al cambiar de las etapas de 0-3 a 6-9 años. Se podría afirmar que se presenta la formación de madera madura a partir de los 6 años. Adicionalmente, se encontró que la densidad es homogénea en general, exceptuando el centro del tronco, el cual presenta madera joven ligeramente menos densa.

En la investigación titulada “Efectos de la edad y variación de la altura en las propiedades físicas de la madera de *Acacia Mangium* Wild”, realizada por (Chowdhury et al., 2005), se evaluaron árboles de 10, 15 y 20 años, con muestras tomadas a tres diferentes alturas. Se evaluó el contenido de humedad, la densidad básica y la contracción radial, tangencial y longitudinal. Se encontró que las diferentes propiedades no presentaron diferencias significativas con respecto a la altura del árbol, pero sí fueron afectadas por la edad de este.

El trabajo realizado por (Rokeya et al., 2010) titulado “Propiedades físicas y mecánicas de (*Acacia Auriculiformis* × *A. Mangium*) acacia híbrida”, estudió las propiedades físicas y mecánicas de la acacia híbrida producida por el cruce natural de las dos especies mencionadas. Se tomaron tres árboles representativos de una plantación en Bangladés con edades entre los 9 – 12 años. Las muestras se tomaron en parejas para ser ensayadas en condición verde y en condición seca al aire, se evaluaron densidad, contracción, módulo de elasticidad y módulo de ruptura. La madera ensayada fue catalogada como moderadamente pesada y fuerte.

El artículo titulado “Propiedades físicas y mecánicas de tres especies de árboles agroforestales de Kerala, India” presenta los resultados obtenidos por (Shanavas & Kumar, 2006), de la evaluación de las especies *Acacia auriculiformis*, *Acacia mangium*, y *Grevillea robusta*. Se obtuvieron muestras de tres árboles por cada especie, a las que se le evaluó la densidad, humedad, contracción, flexión estática, dureza y compresión paralela y perpendicular al grano. Se encontró que las propiedades mecánicas siguieron una tendencia similar a la de la densidad, con propiedades mecánicas cercanas a las de la Teca.

En el estudio realizado por (Alipon et al., 2017), que se titula “Propiedades y utilización de la *Acacia Mangium* Wild. Madera de diferentes edades y sitios en la región de Caraga, Filipinas”, se evaluaron las propiedades mecánicas de flexión estática, compresión paralela y perpendicular al grano, corte y dureza con probetas pequeñas empleando la normativa ASTM, para especímenes de tres edades (4, 6 y 8 años), procedentes de tres locaciones diferentes. Se encontró que tanto el lugar de procedencia como la edad del árbol afectaron significativamente el desempeño mecánico de la madera.

La investigación que se titula “Propiedades físicas y mecánicas de las tres variedades de *Acacia Mangium* plantadas en Java Central, Indonesia” realizada por (Rindarto et al., 2021), evaluó tres árboles de cinco años por cada variedad. Se estudiaron probetas pequeñas secadas al aire ensayadas a flexión estática, compresión paralela y perpendicular al grano y dureza. La densidad también fue medida antes de realizar cada ensayo. Se encontró una correlación significativa entre la densidad y las propiedades mecánicas estudiadas.

El trabajo realizado por (Makino et al., 2012), titulado “Propiedades de la madera de árboles jóvenes de *Acacia Mangium* plantados en Indonesia”, evaluó las propiedades de 24 y 18 árboles para 5 y 7 años respectivamente. Se determinaron la densidad básica, la compresión paralela al grano y la velocidad de las ondas de esfuerzo, encontrando una correlación positiva entre la densidad y la resistencia a la compresión paralela.

En el artículo titulado “Variación de la densidad de la madera y de las propiedades mecánicas de las procedencias de *Acacia Mangium* plantadas en Vietnam” se presentan los resultados obtenidos del estudio realizado por (van Duong et al., 2022), donde se estudiaron árboles de seis procedencias diferentes, con una edad de 5 años. Se evaluaron 480 probetas pequeñas cortadas de 30 árboles, a las cuales se les determinó la variación radial, la velocidad de la onda de tensión, densidad de la madera, módulo dinámico de elasticidad, módulo de ruptura y módulo de elasticidad. Las discrepancias entre los

resultados obtenidos para las propiedades mecánicas fueron significativas entre las diferentes procedencias.

Los investigadores (Viet et al., 2020) en su trabajo titulado “Propiedades físicas y mecánicas de los híbridos poliploides de crecimiento rápido de Acacia (*A. auriculiformis* × *A. mangium*) de Vietnam”, evaluaron y compararon 29 árboles a una edad de 3,8 años de diferentes taxones. Se estudiaron los niveles de altura del tallo, densidad básica, contenido de humedad de equilibrio secada al aire, módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidad (MOE), resistencia a la compresión y módulo de Young. Los resultados mostraron variaciones significativas entre las diferentes variedades, dejando ver el potencial que existe para la selección y mejora de la calidad de la madera.

En la investigación titulada “Tecnología de madera de plantaciones forestales: fichas técnicas”, realizada por (Moya Roque et al., 2010), se evaluaron 10 especies forestales de uso común en Costa Rica, entre estas la *Acacia Mangium* Wild. Se seleccionaron 9 árboles con una edad de 9 años, de los cuales se obtuvieron dos trozas de la base de estos. Se realizaron ensayos para diferentes propiedades físicas, químicas y mecánicas siguiendo los estándares ASTM bajo dos condiciones de humedad (seca o al 12% y verde).

La investigación realizada por (Arbeláez Alzate & Gómez Chica, 2011), titulada “Caracterización de las propiedades mecánicas de vigas en madera laminada con *Acacia Mangium* Wild”, estudió las propiedades físicas y mecánicas de la acacia de diferentes partes del mundo y ensayó 10 vigas laminadas de tamaño estructural fabricadas con madera de acacia de árboles con una edad de 9 años provenientes del municipio de Tierralta, Córdoba en Colombia.

La Reforestadora Cacerí S.A. (2011), como parte de su trabajo con las plantaciones de acacia en el Bajo Cauca Antioqueño en Colombia, realizó un estudio en el que se evaluó la evolución de algunas propiedades físicas y mecánicas a diferentes edades. Se evidenció una estabilización de las propiedades a partir de los 10 años. De estos se apreció una



madera de buena calidad con propiedades similares o superiores a especies de uso común en Colombia tales como la Teca, el Abarco o el Roble.

En la literatura, también se encuentran documentos donde se detallan los procedimientos y conclusiones obtenidos a partir de ensayos similares con otras especies de madera, los cuales son la base para los ensayos propuestos en el presente trabajo final. Algunos de estos documentos se describen a continuación.

El estudio que se titula “Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de Pino Laricio (*Pinus nigra* Arn. *Salzmannii*)” de (Fernández-Golfín et al., 2001). En este artículo, se recalca la importancia de seleccionar la madera que se toma como muestra para efectuar los ensayos, la cual debe ser representativa del total de la especie y de su variabilidad. De acuerdo con esto, antes del muestreo, se deben conocer la distribución geográfica de la especie, sus zonas de procedencia, su variabilidad dentro de cada zona, la diferente silvicultura aplicada en cada una de ellas, así como cualquier otra variable que se sospeche pueda tener influencia en los resultados. Estas afirmaciones son complementadas con lo dicho por (Fernández-Golfín et al., 1997), en el documento titulado “Caracterización mecánica de la madera aserrada de pinos silvestres de los sistemas central e ibérico mediante probetas de tamaño estructural”, donde mencionan la necesidad de determinar valores característicos. Estos valores se definen como aquellos que garantizan que el 95% del 100% de las maderas tengan una resistencia superior o igual, lo que obliga al ensayo de un número elevado de piezas.

En el trabajo realizado por (Moya et al., 2015) que se titula “Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay”, el objetivo fue caracterizar mecánicamente madera aserrada de *Pinus elliottii* y *P. taeda* y asociar sus propiedades a grados estructurales. El estudio evaluó una muestra representativa del material que se produce y comercializa en Uruguay, que incluyó madera de 25 años del litoral y de 15 años del suroeste. Aproximadamente 900 piezas de tamaño estructural previamente clasificadas en tres grados cualitativos fueron sometidas a ensayos de flexión, compresión y tracción

paralela a la fibra. Cada grado fue asociado a una familia de tensiones y comparado con los valores de EN 338 y NCh 1198.

Como se apreció, existen trabajos similares, practicados con diferentes especies e incluso con la acacia, los cuales resaltan la importancia de hacer este tipo de investigaciones, y menciona también diferentes aspectos para tener en cuenta y lineamientos a seguir.

## 2. Marco Teórico

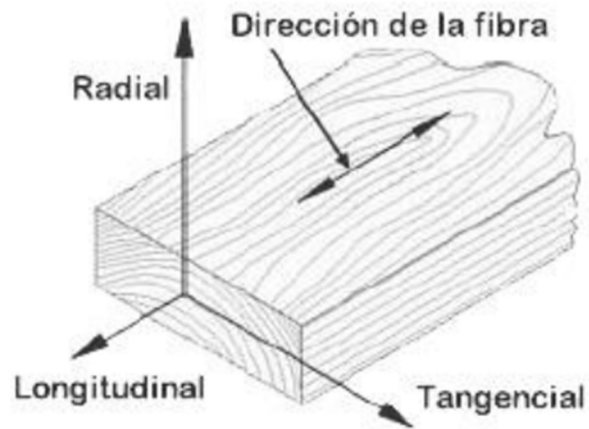
### 2.1. Acacia Mangium

La *Acacia Mangium* Wild es una leguminosa de la familia Fabaceae, nativa de Australia, Indonesia, Papúa y Nueva Guinea. Está presente entre los 19° S y los 24° N de latitud y elevaciones hasta los 1000 m.s.n.m. Cuenta con la capacidad de fijar nitrógeno y asociarse con micorrizas para mejorar la disponibilidad de fósforo.(Álvarez de León & García-Rubio, 2007). Crece en una diversidad de suelos, tolerando suelos ácidos con pH de 4,5-6,5, lo que sumado a su alta tasa de regeneración en sitios abandonados la vuelven llamativa para programas de reforestación. Es un árbol de rápido crecimiento que puede llegar a alcanzar un porte alto con alturas de hasta 30m y diámetros de hasta 50cm. Su morfología es en general recta con copa redonda y baja cantidad de ramas hasta cerca de la mitad de su altura total.(Reyes M. et al., 2018).

La madera es un material natural de origen vegetal, poroso, flexible y resistente, compuesto principalmente por fibras de celulosa unidas con lignina. Presenta un comportamiento ortótropo y por ende anisótropo, es decir, que sus propiedades varían según la dirección de aplicación de la carga respecto de la dirección de las fibras, en la Figura 2-1, se muestran las principales direcciones de referencia según la orientación de las fibras (grano).

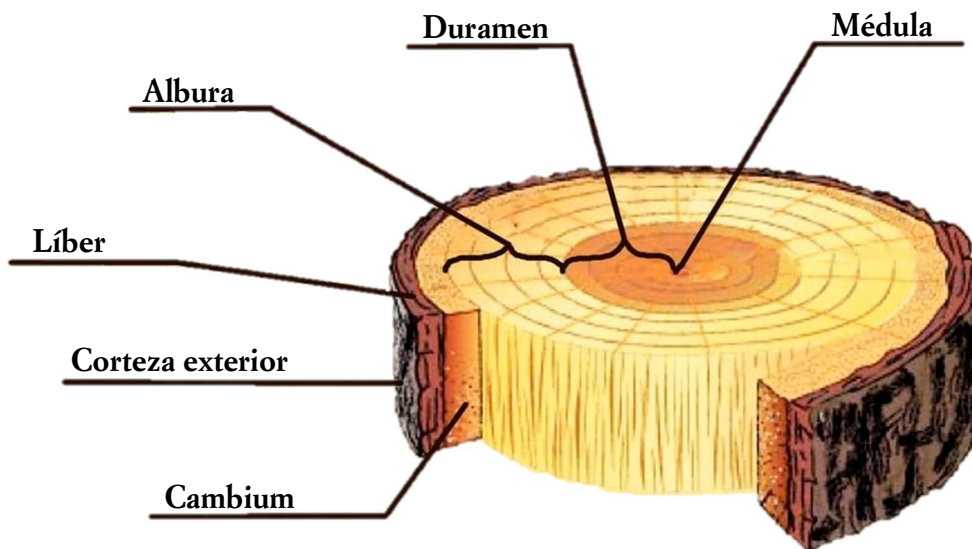
La estructura del tronco de la *Acacia Mangium*, se compone de corteza, cámbium, albura, duramen y médula, como se aprecia de forma esquemática en la Figura 2-2. La albura de la acacia es de color amarillo pálido a pardo claro, es delgada y usualmente constituye

menos del 10% del volumen total; el duramen es de color de pardo-oliva a pardo grisáceo. El grano parece recto en la sección tangencial, aunque ligeramente entrecruzado en la radial.(H. et al., 2011).



**Figura 2-1** Dirección de la carga según orientación respecto de la fibra

Adaptado de: Rodríguez Gonzales, Fernando. análisis del diseño y el comportamiento mecánico de una unión tradicional



**Figura 2-2** Partes de un tronco de madera

Adaptado de: Maderame. Partes de la Madera y sus Funciones. [En línea]

## 2.2. Compresión paralela al grano

Es posible calcular la resistencia máxima a la rotura por compresión axial o paralela al grano, utilizando la ecuación(2-1), con los datos obtenidos del ensayo a compresión axial especificado en la NTC 784 y NTC 3377 o su equivalente la ASTM D143.

$$\sigma_{CL} = P/S \quad (2-1)$$

donde,

$\sigma_{CL}$  = Resistencia máxima a la rotura en N/cm<sup>2</sup>.

$P$  = Carga máxima soportada por la probeta en N/cm<sup>2</sup>.

$S$  = Superficie de la sección transversal de la probeta, calculada antes del ensayo, en cm<sup>2</sup>.

Con los valores de la carga y acortamiento, se traza un gráfico sobre el cual se determina el límite proporcional, punto donde termina la parte lineal y comienza la parte no lineal del gráfico. El módulo de elasticidad se calcula aplicando la siguiente ecuación, tomada de la NTC 784:

$$E_c = P_1 \cdot L / S \cdot d \quad (2-2)$$

donde,

$E_c$  = Módulo de elasticidad de la madera ensayada a compresión paralela, en N/cm<sup>2</sup>.

$P_1$  = Carga en o debajo del límite proporcional en N.

$L$  = Distancia entre las abrazaderas del extensómetro, en cm.

$S$  = Superficie de la sección transversal de la probeta calculada antes del ensayo, cm<sup>2</sup>.

$d$  = Acortamiento experimentado por la probeta en cm.

### 2.3. Compresión perpendicular al grano

La resistencia a la compresión perpendicular al grano se determina mediante la ecuación (2-3), utilizando los datos obtenidos al realizar el ensayo descrito en la NTC 785 y NTC 3377 o su equivalente la ASTM D143, con lo que se tiene:

$$\sigma_{CP} = P_p/S \quad (2-3)$$

donde,

$\sigma_{CP}$  = Resistencia por compresión perpendicular al grano en N/cm<sup>2</sup>.

$P_p$  = Carga para un acortamiento de 0,25cm (2,5mm) en N.

$S$  = Superficie impresa por la pieza de presión sobre la probeta, calculada antes del ensayo, en cm<sup>2</sup>.

Con los valores de la carga y acortamiento, se traza un gráfico sobre el cual se determina el punto P, correspondiente al límite proporcional. La resistencia en el límite proporcional por compresión perpendicular al grano se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_{CLP} = P_1/S \quad (2-4)$$

donde,

$\sigma_{CLP}$  = Resistencia en el límite proporcional en N/cm<sup>2</sup>.

$P_1$  = Carga en el límite proporcional en N.

$S$  = Superficie impresa por la pieza de presión sobre la probeta, calculada antes del ensayo, en cm<sup>2</sup>.

### 2.4. Flexión estática

La resistencia máxima a flexión en una viga simplemente apoyada con carga concentrada en el centro de la luz puede calcularse, empleando los datos recogidos de la ejecución del ensayo descrito en las normativas NTC 663 y NTC 3377 mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_F = 3 \cdot P \cdot L / 2 \cdot a \cdot e^2 \quad (2-5)$$

donde,

$\sigma_F$  = Resistencia máxima a la flexión en N/cm<sup>2</sup>.

$P$  = Carga soportada por la probeta en N.

$L$  = Luz entre los soportes en cm.

$a$  = Ancho de la probeta en la dirección radial, en cm.

$e$  = Altura de la probeta en la dirección tangencial, en cm.

Con los valores de la carga y deflexión, se traza un gráfico sobre el cual se determina el punto P, correspondiente al límite proporcional. De la teoría se establece la posibilidad de determinar el módulo de elasticidad aplicando la siguiente ecuación:

$$E = P \cdot L^3 / 48 \cdot \Delta \cdot I \quad (2-6)$$

donde,

$E$  = Módulo de elasticidad por flexión en N/cm<sup>2</sup>.

$P$  = Carga soportada por la probeta en N.

$L$  = Luz entre los soportes en cm.

$\Delta$  = Incremento de la deflexión en cm.

$I$  = Momento de inercia, en cm<sup>4</sup>.

## 2.5. Tracción paralela al grano

El esfuerzo unitario máximo a la tracción paralela al grano en madera se determina usando los datos recogidos de la ejecución del ensayo descrito en la NTC 944 y NTC 3377, aplicando la siguiente ecuación:

$$\sigma_{TL} = P/A \quad (2-7)$$

donde,

$\sigma_{TL}$  = Esfuerzo unitario máximo en N/cm<sup>2</sup>.

$P$  = Carga máxima soportada por la probeta en N.

$A$  = Área de la sección mínima de la probeta, calculada antes del ensayo, en N/cm<sup>2</sup>.

Con los valores de la carga y deformación, se traza un gráfico sobre el cual se determina el punto  $P_1$ , correspondiente al límite proporcional, esto es, el punto en el cual termina la parte lineal y comienza la parte no lineal del gráfico. Para determinar el valor del esfuerzo unitario al límite de proporcionalidad, se aplica la siguiente ecuación:

$$\sigma_{TLP} = P_1/A \quad (2-8)$$

donde,

$\sigma_{LP}$  = Esfuerzo unitario al límite de proporcionalidad, en N/cm<sup>2</sup>.

$P_1$  = Carga al límite de proporcionalidad en N.

$A$  = Área de la sección mínima de la probeta, calculada antes del ensayo, en cm<sup>2</sup>.

El módulo de elasticidad se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$E_T = P_2 \cdot L / A \cdot d \quad (2-9)$$

donde,

$E_T$  = Módulo de elasticidad de la madera ensayada a tracción, en N/cm<sup>2</sup>.

$P_2$  = Fuerza correspondiente a la del alargamiento  $d$ , debajo del límite de proporcionalidad en N.

$L$  = Luz entre las cuchillas de las abrazaderas del extensómetro, en cm.

$A$  = Área de la sección mínima de la probeta, en cm<sup>2</sup>.

$d$  = Alargamiento de la probeta en cm.

## 2.6. Tracción perpendicular al grano

El valor del esfuerzo máximo a la tracción perpendicular al grano se determina empleando los datos obtenidos de realizar el ensayo NTC 961 o NTC3377, aplicando la siguiente ecuación:

$$\sigma_{TP} = P/A \quad (2-10)$$

donde,

$\sigma_{TP}$  = Esfuerzo máximo a la tracción perpendicular en N/cm<sup>2</sup>.



$P$  = Carga máxima soportada por la probeta en N.

$A$  = Área de la sección mínima, calculada antes del ensayo, en  $\text{cm}^2$ .

## 2.7. Cortante o cizallamiento

Para determinar el valor de la resistencia máxima de rotura por corte o cizallamiento paralelo al grano, se aplica la ecuación (2-11), empleando los valores obtenidos de la ejecución del ensayo descrito en la NTC 775 y NTC 3377, con lo que se tiene:

$$\sigma_{CZ} = P/S_{CZ} \quad (2-11)$$

donde,

$\sigma_{CZ}$  = Resistencia máxima de rotura por corte o cizallamiento en  $\text{N}/\text{cm}^2$ .

$P$  = Carga máxima soportada por la probeta en N.

$S_{CZ}$  = Superficie del plano en que se produce el cizallamiento en  $\text{cm}^2$ .

## 2.8. Contenido de humedad

El contenido de humedad se define como la relación del agua contenida con respecto al peso seco de la probeta (ICONTEC, 2005) y puede calcularse mediante la ecuación (2-12), con los datos obtenidos de realizar el procedimiento basado en la NTC 206-I y la NTC 3377:

$$W = [(m_1 - m_2)/m_2] \cdot 100 \quad (2-12)$$

donde,

$W$  = Contenido de humedad en %.

$m_1$  = Masa de la muestra antes del secado en g.

$m_2$  = Masa de la muestra después del secado en g.

## 2.9. Homocedasticidad

En un modelo estadístico predictivo hay homocedasticidad si en los diferentes grupos de datos observados, la varianza del modelo en relación con las variables se mantiene constante (Su & Berenson, 2017). La homocedasticidad se puede comprobar ya sea gráfica o estadísticamente. En el primero, los puntos se encontrarán distribuidos aleatoriamente y dispersos con equidad a través del eje vertical; en el segundo, se emplea principalmente la prueba de Breush-Pagan, esta plantea como hipótesis nula que existe homocedasticidad y la hipótesis alterna es la existencia de heterocedasticidad (Yang et al., 2019). Tomando como decisión estadística el p-valor, si este se encuentra por debajo del valor de significancia, se rechaza la hipótesis nula, y se asume que no hay homocedasticidad en los datos y es probado de acuerdo con la fórmula:

$$\hat{u}^2 = \gamma_0 + \gamma_1 * x + v \quad (2-13)$$

## 2.10. Pruebas de normalidad

Los análisis estadísticos que incluyen correlación, regresión y análisis de varianza, enmarcadas dentro de las pruebas paramétricas, se basan en el supuesto de una distribución normal; es decir, que los datos dentro de una población están normalmente distribuidos (Öztuna et al., 2006). El supuesto de normalidad es de suma importancia cuando se construyen intervalos de referencia para variables (Royston, 1991), ya que al no cumplir dicho supuesto es imposible sacar conclusiones precisas y confiables sobre la realidad al realizarse posteriores pruebas inadecuadas (Ghasemi & Zahediasl, 2012).

De acuerdo con Ghasemi & Zahediasl (2012) existe un número significativo de pruebas de normalidad en la literatura y algunas de estas están diseñadas para ser aplicadas bajo ciertas condiciones o supuestos a cumplir. En tamaños de muestras lo suficientemente grandes el supuesto de normalidad no debería causar mayores problemas (Islam, 2021); por lo que se pueden emplear pruebas paramétricas. Aunque la verdadera normalidad es considerada un mito (Yap & Sim, 2011), se tienen supuestos de acuerdo con el teorema

del límite central, estos son: I. si los datos de la muestra son aproximadamente normales, entonces la distribución de la muestra también lo será; II. en muestras grandes, la distribución muestral tiende a ser normal, independientemente de la forma de los datos; y III. las medias de las muestras aleatorias de cualquier distribución tendrán distribución normal (Kwak & Kim, 2017). Siendo posible visualizar la normalidad de los datos mediante gráficas o pruebas estadísticas.

El reconocimiento visual de la distribución puede emplearse para evaluar la normalidad, aunque puede ser poco fiable y no garantizar que la distribución sea normal. Algunas visualizaciones empleadas son la distribución de frecuencias, el diagrama de caja, el gráfico cuantil-cuantil (QQ) y el gráfico de probabilidad-probabilidad (PP) (Jolliffe, 2002). Las particularidades de estas visualizaciones se basan en el trazo de los valores observados frente a su frecuencia lo que proporciona un juicio visual de si la distribución tiene forma de campana e información sobre las lagunas en los datos y los valores atípicos (Diggle & Zeger, 2009); el diagrama de caja modela la mediana como una línea horizontal dentro de la caja y el rango intercuartílico como la longitud de la caja, el gráfico PP traza la probabilidad acumulada de una variable frente a la probabilidad acumulada de una distribución particular y el gráfico QQ es muy similar al gráfico PP excepto que traza los cuantiles del conjunto de datos en lugar de cada puntuación individual en los datos. Además, los gráficos QQ son más fáciles de interpretar en caso de tamaños de muestras grandes (Irizarry et al., 2012).

Adicionalmente, las pruebas de normalidad son complementarias a la evaluación gráfica, y las principales pruebas para evaluar la normalidad son la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Bee Wah & Mohd Razali, 2011), la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965), la prueba de Anderson-Darling (Tapia & Flores, 2021), prueba de asimetría de D'Agostino (Alonso & Montenegro, 2015), Prueba de Jarque-Bera (Alonso & Montenegro, 2015), entre otras. La mayoría de las pruebas mencionadas comparan las puntuaciones de la muestra con un conjunto de puntuaciones distribuidas normalmente con la misma media y desviación estándar (Ghasemi & Zahediasl, 2012); siendo el

enunciado de la hipótesis nula que la distribución de la muestra es normal. En algunas pruebas hay poca certeza en la evaluación de la distribución de los datos como la prueba Kolmogorov-Smirnov dado a que presenta una alta sensibilidad a los valores extremos (Bee Wah & Mohd Razali, 2011; Shapiro & Wilk, 1965; Tapia & Flores, 2021) en comparativa, la prueba de Shapiro-Wilk está basada en la correlación entre los datos y los puntajes normales, y llega a proporcionar mayor fuerza que la prueba KS, esto permite tener una capacidad más alta de detectar si una muestra proviene de una distribución no normal (Mendenhall & Sincich, 2016). Es por lo anterior que los investigadores recomiendan la prueba de Shapiro-Wilk como la mejor opción para probar la normalidad de los datos.

La prueba reside en el ordenamiento de los valores de la muestra ( $Y_i$ ), la media muestral ( $\bar{Y}$ ), las constantes generadas a partir de las covarianzas, varianzas y medias de la muestra (tamaño  $n$ ) de una muestra normalmente distribuida ( $\alpha$ ). Se rechaza la hipótesis nula de normalidad si el estadístico calculado es menor que el valor crítico proporcionado por la tabla para el tamaño de la muestra y la significancia dada (Carmona & Carrión, 2015). La ecuación (2-14) muestra la fórmula para la prueba Shapiro-Wilk.

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i Y_i^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2-14)$$

## 2.11. Análisis de varianzas (ANOVA)

La técnica de análisis de varianza (ANOVA) también conocida como análisis factorial, es una herramienta útil para el estudio del efecto de uno o más factores sobre la media de una variable, siendo por consiguiente la prueba estadística a emplear para comparar medias de dos o más grupos. También es posible estudiar los efectos de los factores sobre la varianza de una variable. (Amat, 2016)

El funcionamiento básico consiste en calcular la media de cada uno de los grupos para luego comparar la varianza de estas medias frente a la varianza promedio dentro de los grupos. Teniendo como premisa una hipótesis nula donde la media de la variable es la misma en los diferentes grupos, mientras la hipótesis alternativa donde al menos dos medias difieren de forma significativa.

Anova emplea un factor conocido como  $F_{\text{ratio}}$ , calculado mediante la siguiente ecuación

$$F = \frac{S_1^2 \sigma_1^2}{S_2^2 \sigma_2^2} \quad (2-15)$$

En el caso del ANOVA, dado que dos de las condiciones para su aplicación son la normalidad de los grupos y la homocedasticidad de varianza, el valor F se puede obtener dividiendo las dos varianzas calculadas a partir de las muestras. Cuanto más difieran las medias de los grupos mayor será la varianza entre medias en comparación al promedio de la varianza dentro de los grupos, obteniéndose valores de F superiores a 1 y por lo tanto menor la probabilidad de que la distribución adquiera valores tan extremos (menor el p-value). (Amat, 2016)

## 2.12. Análisis de varianzas multivariante

Análisis Multivariado o Manova es una técnica de dependencia que permite evaluar las diferencias entre las medias de distintas categorías por medio de la comparación contigua de las variables dependientes observadas. Las categorías son establecidas por el conjunto de criterios que limitan distintos estados, grupos humanos, dosis, tratamientos entre otros criterios (Manova, 2006). Existen ciertas condiciones o supuestos para emplear el Manova y estos son: I. Las variables se encuentran distribuidas de manera normal por separado, lo que se evalúa mediante las pruebas como de Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk o por visualizaciones como el gráfico QQ; II. las variables igualmente tienen distribución normal aún en conjunto lo cual se puede evaluar mediante test de Mardia; III. Los coeficientes de

correlación entre las variables en un mismo grupo son comparables y IV. las variables dependientes se correlacionan entre sí (Vargas Sánchez et al., 2020).

La prueba estadística de Pillai es una de la más robustas. Los valores para el estadístico se encuentran entre 0 a 1. El valor creciente significa que los efectos contribuyen al modelo, y se rechaza la hipótesis nula para valores grandes. La ecuación (2-16) muestra la fórmula para la prueba (Pillai, 1955).

$$\text{Pillai's trace} = [H(H + E)^{-1}] = \sum_{i=1}^q \frac{\lambda_i}{1+\lambda_i} \quad (2-16)$$

### 3. Metodología

La metodología empleada para el desarrollo del trabajo propuesto es de tipo experimental con un análisis y tratamiento de datos de tipo cuantitativo. Esto debido a que las propiedades de la madera fueron determinadas mediante ensayos físicos de diferentes probetas, realizados en el laboratorio de estructuras de la Universidad Nacional. Una vez obtenidos los datos, se realizó su respectivo tratamiento estadístico con el fin de determinar el módulo de elasticidad, humedad, densidad y las resistencias a la flexión, tracción, compresión y cortante, obteniendo así parámetros de tipo cuantitativo.

Debido a las variaciones en las propiedades de la madera ocasionados por los cambios de humedad, se realizaron dos grupos de estudio. El primer grupo, se almacenó de tal forma que se permitiera alcanzar una humedad de equilibrio, sin pasar por un proceso de secado en horno, mientras el segundo grupo de madera fue secado en horno y posteriormente ensayado.

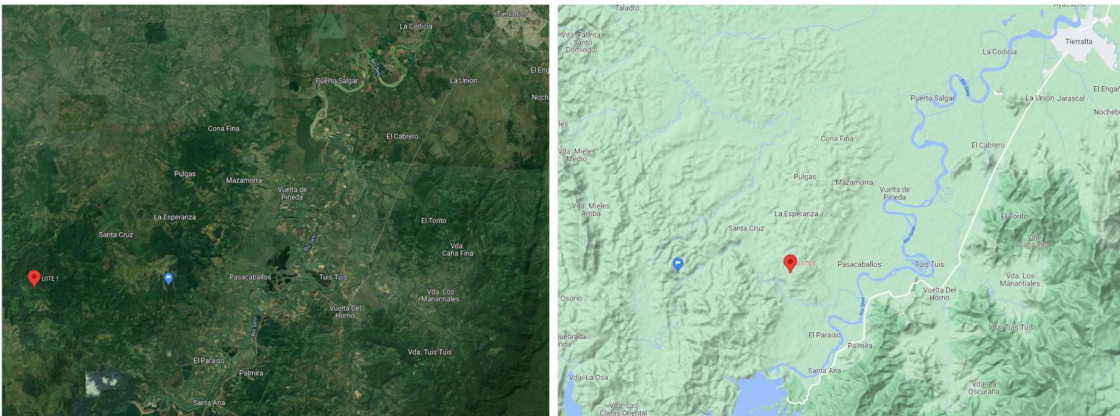
El procedimiento se ha desarrollado en tres etapas, las cuales son:

- *Obtención de la materia prima:* En esta etapa se desarrollaron, las diferentes visitas a campo, formas de entrega del material y el almacenamiento de este.
- *Elaboración de las probetas:* Debido a los diferentes tamaños y requerimientos técnicos de las probetas, fue necesario que una vez obtenido el material se realizaran los diferentes cortes y preparación de las probetas con el fin de cumplir los procedimientos y requerimientos de la normativa técnica vigente.

- *Realización de los ensayos en laboratorio:* Con las probetas elaboradas, se realizaron los diferentes ensayos requeridos.

### 3.1. Obtención de la materia prima

Para la obtención de la materia prima se determinaron las zonas de donde se obtuvo la madera. Posteriormente, se coordinó una visita a la zona de interés, la cual se muestra en la Figura 3-1, para seleccionar los especímenes (árboles), de los cuales se obtendría la madera a ensayar. La determinación y visita no fue fácil, por la inaccesibilidad de las zonas de explotación, las cuales han estado bajo la influencia de grupos armados al margen de la ley, por lo que la visita se realizó hasta que se contara con condiciones de seguridad aceptables.



**Figura 3-1** Ubicación de las zonas de explotación

Fuente: Google maps

La visita a las zonas de explotación en el valle del Río Sinú en el municipio de Tierralta, departamento de Córdoba, se realizó el 20 y 21 de marzo de 2019, lo que permitió conocer y apreciar las características del terreno como topografía, condiciones de humedad, cuidados de los cultivos, edades de las plantaciones, etc. La materia prima se tomó de forma diferenciada de dos plantaciones, las cuales se encuentran aproximadamente a una hora de recorrido desde el casco urbano para el caso del lote I, y de hora y media para el



caso del lote II. Con el reconocimiento del área, se procedió a la selección de los especímenes, de forma aleatoria, con el fin de dar un muestreo global a las franjas de explotación y con ello de la madera que será usada en forma comercial, manteniendo siempre la diferenciación entre los dos lotes de estudio. La zona presenta humedades relativas elevadas, siendo el promedio anual de 83%, con precipitación media anual de 1949 mm y una temperatura que varía entre 24°C y 31°C, siendo la media anual de 26,6°C (IGAC, 2016) con una altitud promedio para el lote I de 102 msnm y para el lote II de 270 msnm. En ambos casos las edades de los árboles varían entre los 12 y 17 años, con alturas comerciales útiles promedio de 9 m. La topografía es de media ladera con inclinaciones ligeramente pronunciadas en algunos casos, sin embargo, es perceptible una diferencia en cuidados, manejo y forma de las plantaciones como se aprecia en la Figura 3-2, presentando el caso del lote I, una morfología más boscosa, un poco irregular con especies de diferentes árboles mezcladas; por otro lado, el lote II se apreció más homogéneo, con un poco más de cuidado en la poda de los mismos, así como la presencia principalmente de la especie en estudio, adicionalmente se tiene la particularidad que al momento de la visita se evidenció la afectación generada por un incendio en dicha zona.



**Figura 3-2** Panorámica Lote I (Izquierda) y Lote II (Derecha)

Cabe mencionar que, en los dos casos y en general en esa zona geográfica, los cultivos no fueron realizados con el objetivo de la explotación sino de la recuperación de suelos, por lo que no cuentan con los parámetros y características ideales para su crecimiento, cuidado y aprovechamiento. Debido a las condiciones de la zona y forma de explotación, algunos

de los ejemplares fueron marcados y talados en el momento de la visita, mientras otros, quedaron marcados para su posterior corte y marcación de las piezas, como puede verse en la Figura 3-3.



**Figura 3-3** Árboles talados y marcados.

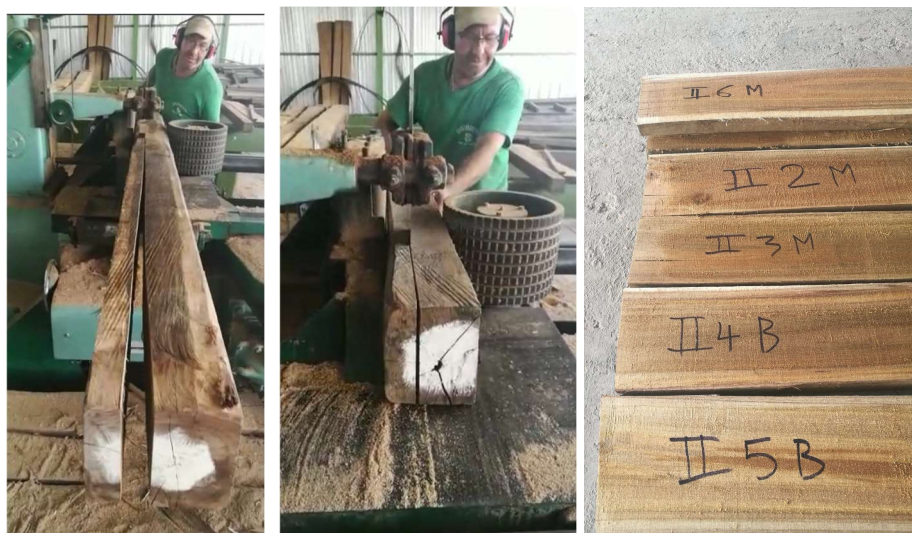
Una vez obtenidas las trozas, se esperó hasta completar la totalidad de la madera, para realizar el envío del material hasta una bodega, localizada en el corregimiento de Chinauta en el municipio de Fusagasugá en el departamento de Cundinamarca, donde la humedad relativa promedio es de 85% (Weather Atlas, 2019a).

En principio se seleccionaron 18 árboles de los cuales se esperaba la llegada de 3 trozas por cada uno, teniendo un total de 54 trozas seleccionadas, sin embargo, dadas las dificultades en temas logísticos y de coordinación, llegaron 9, de los cuales 5 presentaron condiciones aceptables, por lo que se seleccionaron trozas adicionales de los lotes de la madera recibida; teniendo en cuenta que era posible determinar el origen en lo referente al lote de explotación. Con ello se escogieron trozas adicionales para conformar un grupo de 30 trozas por lote de estudio. En la Figura 3-4, se presentan los elementos adicionales seleccionados aleatoriamente.



**Figura 3-4** Trozas puestas en bodega en Chinauta.

En las instalaciones en Chinauta se cortaron las trozas de tal forma que se obtuvieran dos piezas de 5cmx15cmx150cm por cada una, en la Figura 3-5 se muestra el proceso de obtención de las repisas. De estas, una se dejó en Chinauta para ser secada en horno, mientras la pareja se trasladó a los laboratorios de la Universidad Nacional en Bogotá, donde la humedad relativa es de cerca del 70%, pero con un punto de rocío más bajo, siendo este cercano a los 8°C (Weather Atlas, 2019b). Estas repisas fueron localizadas en la zona abierta del edificio de Ensayos e Investigación en noviembre de 2019, donde fueron dejadas para su aireación y secado al aire hasta finales de enero de 2020, momento en que se empieza con el proceso de corte y elaboración de probetas.



**Figura 3-5** Corte y marcado de las trozas para obtención de repisas

Se apreció que parte de las piezas de madera presentaban defectos tales como nudos, presencia considerable de médula o rajaduras que durante el secado se hicieron más pronunciadas y evidentes por lo que no permitían obtener las probetas adecuadamente, siendo rechazadas finalmente. En el caso de la madera que fue tratada con secado por horno, las repisas fueron tratadas dos veces por el ciclo de secado dentro del horno, con el fin de reducir su humedad a valores inferiores al 14%. Estas últimas se recibieron en una carpintería en Bogotá D.C., en enero del año 2020.

### **3.2. Elaboración de las probetas**

Una vez recibida y almacenada la madera del primer grupo en los laboratorios de la universidad, se procedió a la elaboración de las probetas. Debido a las condiciones para el secado de la madera, el grupo de piezas que tuvieron secado en horno fue cortado después de realizado dicho proceso, mientras el grupo con secado al ambiente fue cortado paulatinamente según la disponibilidad en carpintería una vez transcurrido el tiempo inicial de aireación.

Las probetas con secado al aire fueron cortadas y tratadas en la carpintería de la Facultad de Ingeniería, con la ayuda de los carpinteros como se aprecia en la Figura 3-6, para poder obtener las dimensiones y formas requeridas por la normativa con una precisión adecuada.

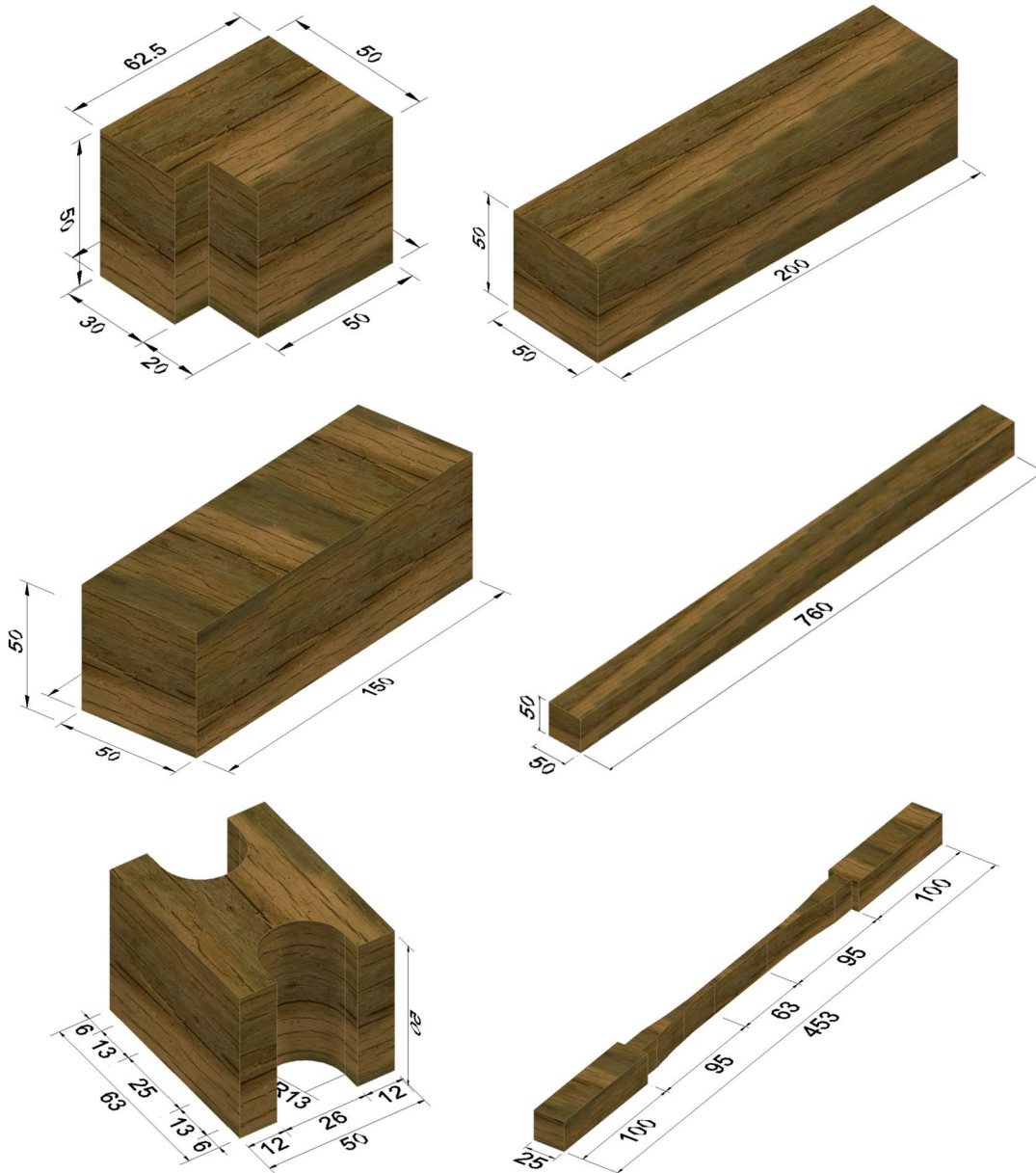
El proceso para el corte comienza con una evaluación a la repisa con el fin de determinar la forma en que será cortada, examinando defectos como nudos, médula, rajaduras, curvatura, entre otros. Los primeros elementos en cortar y obtener fueron los del ensayo de flexión dado que por sus dimensiones obligaban a reservar la zona con la menor cantidad de imperfecciones posible, condicionando así el primer corte. En algunos casos no fue posible obtener piezas del tamaño requerido sin defectos, sin embargo, se procedió con el corte de la repisa para obtener probetas de los demás ensayos.



**Figura 3-6** Elaboración de probetas en la carpintería de la facultad de ingeniería

Todas las probetas se elaboraron siguiendo las dimensiones nominales presentes en las diferentes normativas técnicas. En la Figura 3-7 se presentan las dimensiones nominales de las probetas para cada uno de los ensayos. Las probetas con secciones prismáticas sólidas se obtuvieron de los cortes iniciales sin la necesidad de lijado, tallado o cortes posteriores a los realizados de forma inicial con la sierra. En el caso de las probetas para los ensayos de tracción paralela y cortante, se requirió de un proceso adicional de corte con la sierra sin fin para obtener la forma requerida, mientras que para los especímenes de tracción perpendicular se empleó un taladro con una copa de 1” para realizar los orificios establecidos en la normativa.

Considerando que la llegada de la madera secada en horno fue recibida mientras se empezaban a elaborar las probetas de la madera secada al aire, se trabajó con una carpintería externa con el fin de trabajar de forma paralela en la elaboración de las diferentes piezas como se aprecia en la Figura 3-8. La metodología de trabajo fue la misma que la empleada en los laboratorios de la universidad.



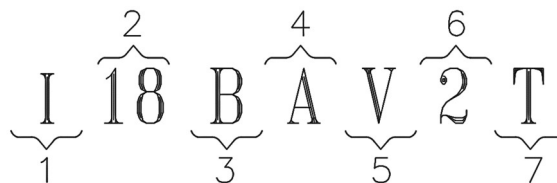
De izquierda a derecha: Probeta de cortante, compresión paralela, compresión perpendicular, flexión, Tensión perpendicular y tensión paralela.

**Figura 3-7** Forma y dimensiones nominales de probetas en mm.



**Figura 3-8** Elaboración de probetas en carpintería externa

Las diferentes probetas cortadas y preparadas fueron marcadas en el momento de su elaboración, con el fin de preservar su trazabilidad y permitir el manejo adecuado de la información. La forma de marcación se realizó considerando los diferentes parámetros de interés. La cantidad de probetas elaboradas puede verse en el Apéndice A. La forma de marcación de las probetas fue:



**Figura 3-9** Marcación de probetas.

donde,

- 1: Corresponde al lote de donde proviene la madera, puede ser I o II.
- 2: Número de la troza, puede ser un valor entre 1 y 30.
- 3: Corresponde a la parte del árbol, puede ser baja (B) o media (M).
- 4: Tipo de secado, al aire (A) o al Horno (H).
- 5: Ensayo a realizar, puede ser:
  - F: Flexión.
  - CL: Compresión paralela al grano.

- CT: Compresión perpendicular al grano.
- TL: Tracción paralela al grano.
- TT: Tracción perpendicular al grano.
- V: Cortante paralelo al grano.

6: Corresponde al consecutivo de la probeta.

7: En el caso de las probetas de cortante, pueden ser tangencial a los anillos de crecimiento (T) o perpendicular a los anillos de crecimiento (P).

### **3.3. Realización de los ensayos en laboratorio**

Una vez elaboradas las probetas, se realizaron los ensayos necesarios para la obtención de las propiedades de interés. Es de importancia mencionar que la presencia de defectos en las probetas no fue la única causa de su descarte para la realización de los ensayos o la eliminación de los resultados obtenidos, también se tuvo en cuenta la forma de falla. En algunos casos las normativas señalaban ciertos tipos de falla que no son aceptables, tales como la falla en los cabezales en el caso de los ensayos a tracción, la presencia de falla en las caras y superficies de apoyo en probetas de cortante o el aplastamiento de los extremos en el caso de la compresión paralela. En total se ensayaron más de 1160 probetas, de las cuales 906 fueron consideradas válidas. En la Tabla 3-1, se presentan la cantidad de probetas ensayadas cuyos resultados fueron considerados válidos y tenidos en cuenta para el cálculo de las diferentes propiedades.

Para la ejecución de los ensayos mecánicos se utilizó una máquina universal de ensayos. El equipo de marca Shimadzu presente en el laboratorio de estructuras de la universidad cuenta con una resolución variable de 0,01N y una capacidad de carga de hasta 300kN, aplicados mediante un cabezal móvil que se desplaza en dirección vertical. Una celda de carga interna permite medir la fuerza y desplazamiento aplicados por el cabezal, y pueden ser mostrados y controlados con buena precisión mediante un control remoto o desde un computador con el software especializado instalado.



**Tabla 3-1** Cantidad de probetas ensayadas cuyos resultados fueron tenidos en cuenta.

<b>CANTIDAD DE PROBETAS ENSAYADAS VALIDAS</b>					
<b>ENSAYO</b>	<b>LOTE</b>	<b>SECADO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>TOTAL LOTE</b>	<b>TOTAL ENSAYO</b>
<b>FLEXION</b>	I	AIRE	39	80	140
		HORNO	41		
	II	AIRE	34	60	
		HORNO	26		
<b>COMPRESION PARALELA</b>	I	AIRE	10	61	99
		HORNO	51		
	II	AIRE	10	38	
		HORNO	28		
<b>COMPRESION PERPENDICULAR</b>	I	AIRE	26	55	78
		HORNO	29		
	II	AIRE	19	23	
		HORNO	4		
<b>CORTE</b>	I	AIRE	91	148	300
		HORNO	57		
	II	AIRE	113	152	
		HORNO	39		
<b>TENSION PERPENDICULAR</b>	I	AIRE	43	98	151
		HORNO	55		
	II	AIRE	30	53	
		HORNO	23		
<b>TENSION PARALELA</b>	I	AIRE	50	76	138
		HORNO	26		
	II	AIRE	39	62	
		HORNO	23		

Adicionalmente, se emplearon dos extensómetros distintos, el primero para medir la elongación en los ensayos de tracción paralela, mientras el segundo fue empleado para medir el acortamiento en el caso de compresión paralela. También se empleó un deflectómetro para determinar la deflexión en el centro de la luz en los ensayos de flexión y la compresión aplicada en el caso de compresión perpendicular. Estos dispositivos

fueron conectados a la máquina universal de ensayos con lo que fue posible agrupar y exportar los datos recogidos junto con los de la celda de carga. Cabe mencionar que para la totalidad de los ensayos mecánicos se registraron los datos de carga y desplazamiento de la celda de carga, quedando con ello registrado la carga máxima alcanzada; también se obtuvo y registró la forma de falla. Todas las probetas fueron medidas con un calibrador, determinando las secciones de interés en cada caso.

### 3.3.1 Compresión paralela al grano

Para la determinación de la resistencia característica a la compresión paralela al grano, se realizó el ensayo siguiendo el procedimiento dado en la NTC 3377(ICONTEC, 1992) y la NTC 784(ICONTEC, 1974b) . Se usaron probetas de los dos grupos de madera de 50mmx50mmx200mm, donde la dirección del grano es paralela a la dimensión más grande. Se aplicó una carga de forma continua hasta la falla del elemento y se registraron los acortamientos con un extensómetro de 150mm de separación entre cuñas cada 0,002mm para determinar las curvas correspondientes. El ensayo se realizó como se muestra en la Figura 3-10.

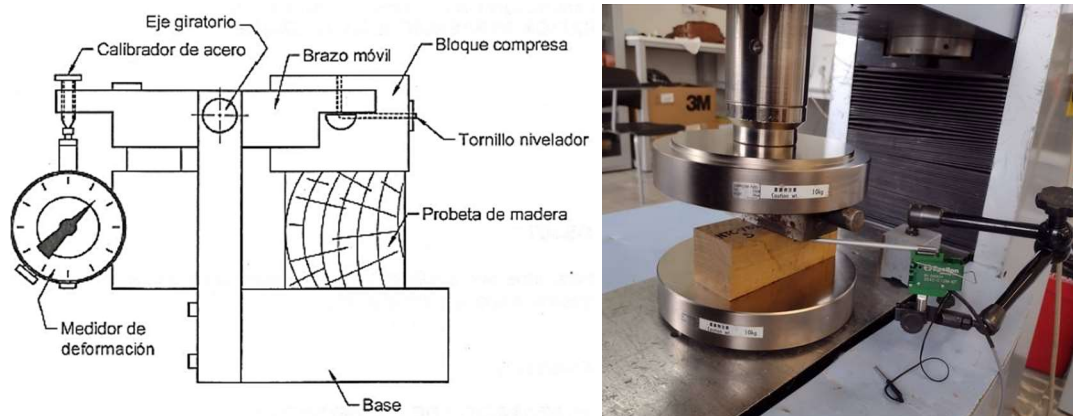


**Figura 3-10** Esquema y ensayo en laboratorio resistencia a compresión paralela  
Fuente esquema: NTC 784

Cuando las caras de la probeta no fueron perfectamente paralelas, se dispuso de un apoyo sobre la platina inferior con capas de neopreno en su interior, con el fin de solventar las irregularidades en la cara de apoyo y permitir la aplicación de la carga de forma vertical y paralela al grano.

### 3.3.2 Compresión perpendicular al grano

Para la determinación de la resistencia característica a la compresión perpendicular al grano, se realizó un procedimiento similar al anterior siguiendo las normativas NTC 3377 (ICONTEC, 1992) y la NTC 785 (ICONTEC, 1974c). Se usaron probetas de los dos grupos de madera de 50mmx50mmx150mm. Se aplicó una carga de forma continua y se tomaron datos continuamente de desplazamiento de la platina con el deflector, para la elaboración de las curvas correspondientes. El ensayo se realizó como se muestra en la Figura 3-11.



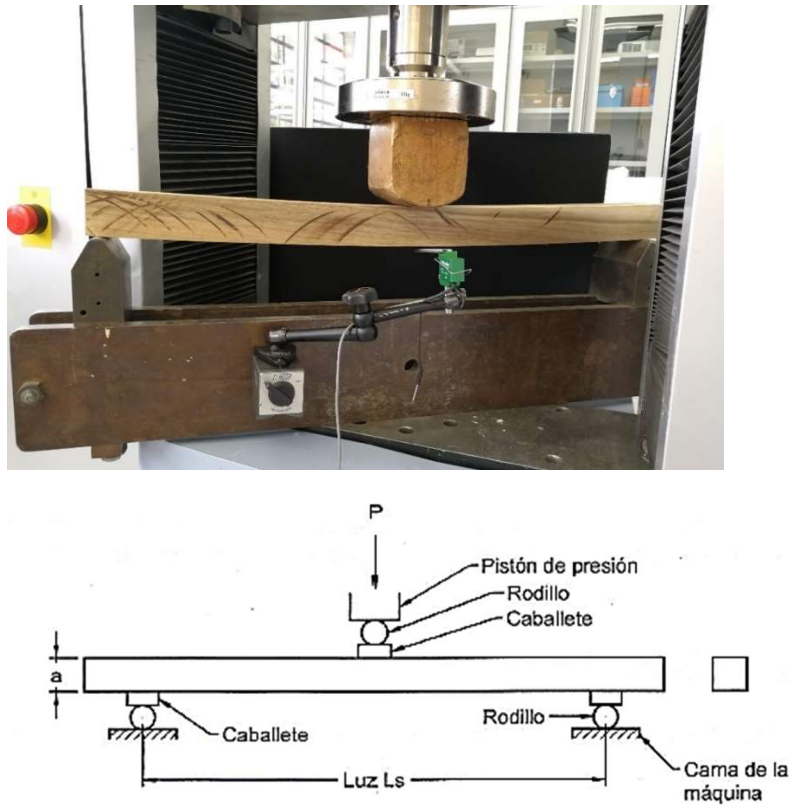
**Figura 3-11** Esquema y ensayo a compresión perpendicular

Fuente esquema: NTC 785

Fuente imagen: Ing. Javier Quintero

### 3.3.3 Flexión estática

Para la determinación de la resistencia característica a la flexión estática y la determinación del módulo de elasticidad se realizó el ensayo siguiendo el procedimiento dado en la NTC 3377 (ICONTEC, 1992) y la NTC 633 (ICONTEC, 1973). Se usaron probetas de los dos grupos de madera de 50mmx50mmx760mm, donde la dirección de las fibras es paralela a la dimensión más grande. Se aplicó una carga en el centro de la luz y se tomaron lecturas de deflexión con el deflectómetro justo debajo del punto de aplicación de la carga. El ensayo se realizó como se muestra en la Figura 3-12.



**Figura 3-12** Esquema y ensayo en laboratorio a flexión estática  
Fuente esquema: NTC663

### 3.3.4 Tensión paralela al grano

Para la determinación de la resistencia característica a tracción paralela al grano, se realizó el ensayo siguiendo el procedimiento dado en la NTC 3377 (ICONTEC, 1992) y la NTC 944 (ICONTEC, 1975a). Se usaron probetas de los dos grupos de madera de 25mmx25mmx457mm, donde la dirección de las fibras es paralela a la dimensión más grande. Se aplicó una carga de forma axial para generar esfuerzos de tracción. Se tomaron lecturas de elongación con un extensómetro de 50mm de separación entre cuñas, para la elaboración de las curvas correspondientes. El ensayo se realizó como se muestra en la Figura 3-13.



Figura 3-13 Ensayo resistencia a la tracción paralela al grano

### 3.3.5 Tensión perpendicular al grano

Para la determinación de la resistencia característica a tracción perpendicular al grano. Se realizó el ensayo siguiendo el procedimiento dado en la NTC 3377 (ICONTEC, 1992) y la NTC 961 (ICONTEC, 1975b). Se usaron probetas de los dos grupos de madera de

63mmx50mmx50mm. Se aplicó una carga para generar esfuerzos de tracción como se muestra en la Figura 3-14. Se tomó únicamente la lectura de la carga máxima alcanzada.



**Figura 3-14** Ensayo resistencia a la tracción perpendicular

### **3.3.6 Cortante o cizallamiento**

Para la determinación de la resistencia característica al corte paralelo al grano, se realizó el ensayo siguiendo el procedimiento dado en la NTC 3377 (ICONTEC, 1992) y la NTC 775 (ICONTEC, 1974a). Se usaron probetas de los dos grupos de madera de 50mmx50mmx63mm. Se aplicó una carga para generar esfuerzos de cortante generados por la forma de la probeta como se muestra en la Figura 3-15. Se tomó únicamente la lectura de la carga máxima alcanzada.



**Figura 3-15** Ensayo resistencia a cortante paralelo al grano

### 3.3.7 Contenido de humedad

El contenido de humedad fue determinado para cada una de las probetas usando la NTC 3377 (ICONTEC, 1992) y NTC 206-1 (ICONTEC, 2005). Para ello se obtuvieron piezas cercanas a la falla, o en los casos de tracción transversal y cortante, se empleó el elemento más pequeño resultante después de la falla, acorde con lo recomendado en las diferentes normativas. Dichos elementos fueron cortados y pesados después de ser ensayados con el fin de evitar la pérdida de humedad. Posteriormente fueron puestos en un horno a 103°C para realizar su secado por mínimo 24h hasta obtener un peso constante. Al finalizar se pesaron nuevamente como se aprecia en la Figura 3-16. La pérdida en peso, expresada en porcentaje se considera el contenido de humedad de la probeta.



**Figura 3-16** Determinación del peso para contenido de humedad

### 3.3.8 Densidad o peso específico

La densidad o peso específico aparente fue determinado para cada una de las probetas prismáticas y aquellas en donde su geometría así lo permitiese, empleando la NTC290 (ICONTEC, 1974). Las probetas fueron medidas con un calibrador, realizando 3 lecturas por cada cara y pesadas usando una balanza de 0,1 g de precisión. Se aplicó el procedimiento para maderas tratadas en ambiente climatizado, con lo que las medidas y pesos de los especímenes fueron tomados justo antes del ensayo, contando así con porcentajes de humedad cercanos al 12%. Teniendo entonces el peso de la probeta seca en gramos, al dividir en el volumen de la probeta obtenido mediante la medición directa en centímetros cúbicos, se obtiene el peso específico de la probeta en gramos sobre centímetros cúbicos.



## 4. Cálculos y resultados

En la determinación de las diferentes propiedades de interés se emplearon los datos obtenidos durante los ensayos, los cuales fueron convertidos en hojas de cálculo, pudiendo con ello facilitar su manejo. Para realizar el análisis estadístico de los datos y obtener los diferentes valores característicos se utilizaron las herramientas presentes en Microsoft Excel y el software estadístico R.

El primer paso para la determinación de las propiedades de interés fue aplicar las formulaciones presentadas en el marco teórico y en la normativa de referencia a los datos obtenidos. Posteriormente, se procedió a realizar el ajuste del valor obtenido acorde con el contenido de humedad reportado, siguiendo los parámetros dados en la NTC301(ICONTEC, 2007), con el fin de ajustar los valores a una humedad del 12%.

Como se mencionó anteriormente, dada la presencia de defectos o formas de falla no aceptadas en los estándares, se rechazaron algunas repisas y probetas, sin embargo, en algunos casos se ensayaron de forma exitosa varias probetas elaboradas a partir de una misma repisa. Con el fin de disminuir y realizar una primera agrupación de los datos, se determinaron las medias aritméticas de los grupos de probetas obtenidos de una misma pieza.

Con los datos agrupados, se procedió a determinar si estos presentaban un comportamiento normal y homogéneo (cumple el supuesto de homocedasticidad), posteriormente se realizó un análisis de varianzas (ANOVA), complementado con un análisis de varianza multivariante (MANOVA), con el fin de verificar si alguna de las

variables en estudio (tipo de secado, procedencia o dirección de aplicación de la carga en el caso de cortante) tiene inferencia o genera variación en la propiedad de estudio. Debido al inconveniente presentado al momento de recibir el material y a la cantidad de elementos que tuvieron que ser rechazados por la presencia de defectos, no se tuvo en cuenta como variable la ubicación en altura de la troza evaluada.

Se determinó una medida de tendencia central siendo para este caso la media aritmética, junto con otros parámetros de estadística descriptiva para la propiedad global y segregada acorde con la variable que mostró generar la mayor diferenciación. Se calculó también el coeficiente de variación (COV) y se comparó con los máximos permitidos por la NTC 301, donde aquellos valores que fuesen superiores implicaron el ajuste de algunos de los datos involucrados en el cálculo de este.

Por último, se verificó nuevamente la normalidad del grupo de datos en caso de haber requerido algún ajuste y se procedió a determinar los valores característicos y los esfuerzos admisibles acorde con el Apéndice G-A de la NSR-10.

## **4.1. Densidad y contenido de humedad**

Para la determinación de la densidad, se tuvieron en cuenta únicamente los valores obtenidos para las probetas prismáticas, mientras que la determinación del contenido de humedad se realizó para la totalidad de las probetas ensayadas. A continuación, se presenta una muestra de los cálculos realizados:

Tomando como ejemplo la probeta II28BACL1, los datos básicos se presentan en la Tabla 4-1. Para calcular el volumen de la probeta se determinaron las medias aritméticas de cada cara. Para determinar la sección transversal se realiza tomando la media de cara 1 y cara 3 multiplicado por la media de cara 2 y cara 4.

Tabla 4-1 Peso y dimensiones probeta II28BACL1

<b>Largo</b>	<b>Cara 1</b>	<b>Cara 2</b>	<b>Cara 3</b>	<b>Cara 4</b>	<b>Peso</b>
cm	mm	mm	mm	mm	g
20,10	45,67	47,88	46,41	47,75	245,10
20,00	47,97	48,41	48,00	48,33	
20,05	48,90	48,35	48,87	48,05	
20,05					

El producto entre la sección transversal y la media del largo arroja el volumen medido de forma directa de la probeta. Con lo que la densidad es:

$$\rho = 245,10g / (20,05cm \cdot 4,76cm \cdot 4,81cm)$$

$$\rho = 0,533g/cm^3$$

En la Tabla 4-2 se presentan los diferentes valores de densidad. Es de resaltar que como valor reportado y empleado para el análisis en los diferentes ensayos se emplea la Densidad normal.

Tabla 4-2 Densidades probeta II28BACL1

<b>Largo</b>	<b>Secc. 1</b>	<b>Secc. 2</b>	<b>Secc. Trans.</b>	<b>Volumen</b>	<b><math>\rho</math></b>	<b>Densidad nominal</b>	<b>Densidad normal</b>
cm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>
20,05	47,64	48,13	2292,67	459,68	0,533	0,468	0,522

Para la determinación del contenido de humedad (W), se pesa una pequeña pieza y se aplica la ecuación (2-12), con lo cual:

$$m_1 = 29,60 g$$

$$m_2 = 26,0 g$$

$$W = [(29,60g - 26,0g) / 26,0g] \cdot 100$$

$$W = 13,80 \%$$

En la Tabla 4-3 se muestran los datos empleados. Ajustando el peso para un contenido de humedad del 0% se puede evaluar la densidad nominal, mientras que ajustando el peso para un contenido de humedad del 12% se obtiene la densidad normal. Lo anterior

considerando que las probetas se han almacenado por casi un año bajo condiciones de temperatura y humedad relativamente estables, logrando una humedad de equilibrio cercana al 12%.

Tabla 4-3 Contenido de humedad probeta II28BACL1

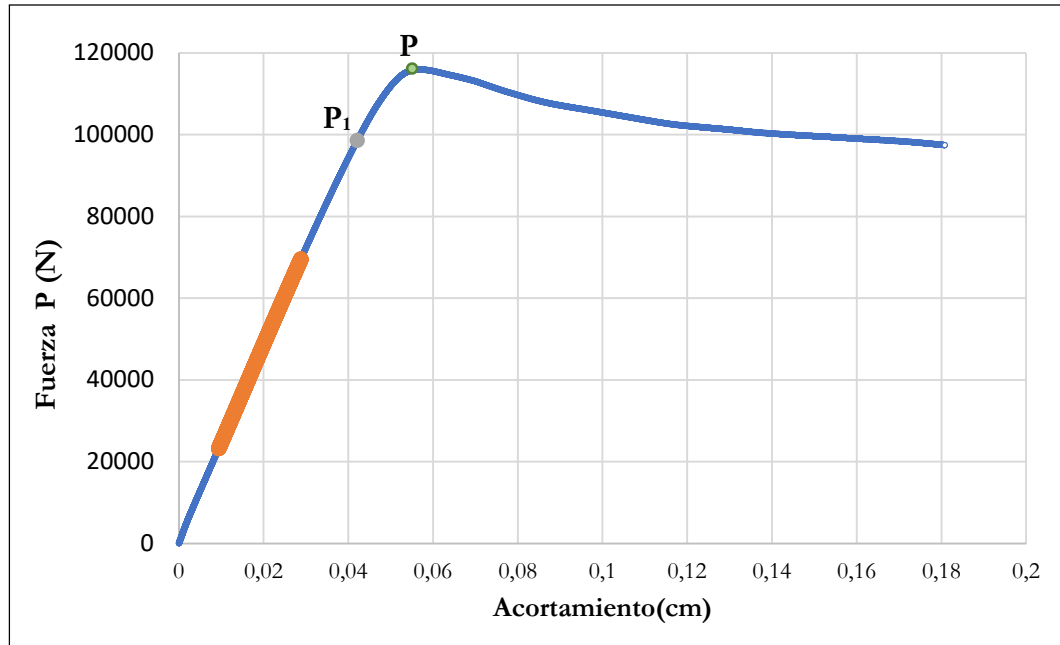
W		
m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	%
29,60	26,00	13,8%

Se tiene que en general el promedio de las probetas arrojó una densidad normal entre 0,45 g/cm<sup>3</sup> y 0,55 g/cm<sup>3</sup>, y humedades que varían en su mayoría entre el 11,5% y el 15%.

## 4.2. Compresión paralela al grano

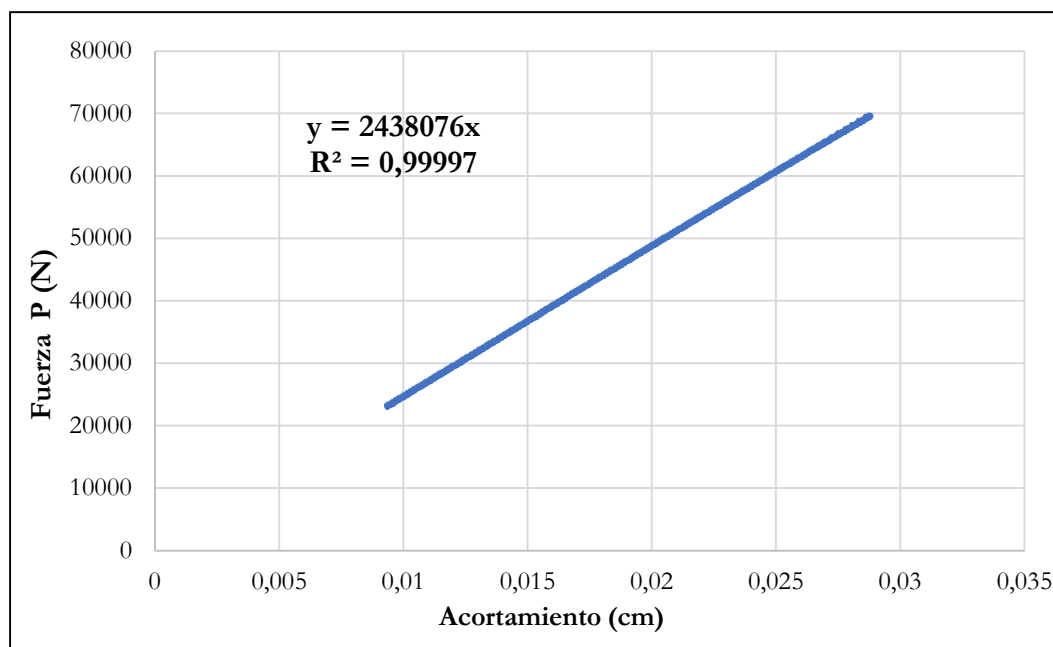
Con los datos obtenidos del ensayo, se aplicó la ecuación(2-1), para determinar el esfuerzo máximo a compresión paralela al grano. Se realizaron las gráficas de Fuerza-Acortamiento para cada una de las probetas, las cuales se presentan en el Anexo B. De las gráficas se pudo determinar el punto P correspondiente al límite proporcional, así como generar una regresión lineal para determinar la pendiente de la recta en el tramo de comportamiento elástico y con ello el módulo de elasticidad. Tomando como ejemplo la probeta I22BHCL1, se elaboró la gráfica Fuerza vs Acortamiento mostrada en la Figura 4-1.

Con los datos y la gráfica realizada se determinó el punto máximo P y el punto P<sub>1</sub> correspondiente al límite proporcional. Conociendo los puntos P y la sección transversal, la cual fue calculada acorde con lo descrito en el numeral 4.1, se aplicó la ecuación (2-1), para calcular la resistencia máxima a la rotura por compresión axial y la resistencia en el límite de proporcionalidad.



**Figura 4-1** Gráfica Fuerza vs Acortamiento de la probeta I22BHCL1

Adicionalmente se seleccionó un punto debajo del límite proporcional, con cuyos valores se aplicó la ecuación (2-2), determinando con esto el módulo de elasticidad por compresión. Sin embargo, se consideró como una mejor opción realizar una regresión lineal con los valores comprendidos entre el 20% y el 60% de la carga máxima, verificando siempre estar por debajo del límite proporcional. En la Figura 4-2 se aprecia la regresión lineal realizada para dicha probeta. Estas gráficas se elaboraron para la totalidad de los elementos ensayados a compresión paralela, y se pueden consultar en el Anexo B.



**Figura 4-2** Gráfica Regresión lineal Compresión paralela de la probeta I22BHCL1

Con lo anterior se tiene que la resistencia a la rotura por compresión longitudinal al grano y el módulo de elasticidad por compresión de la probeta I22BHCL1 es:

**Tabla 4-4** Cargas y esfuerzos a compresión paralela probeta I22BHCL1

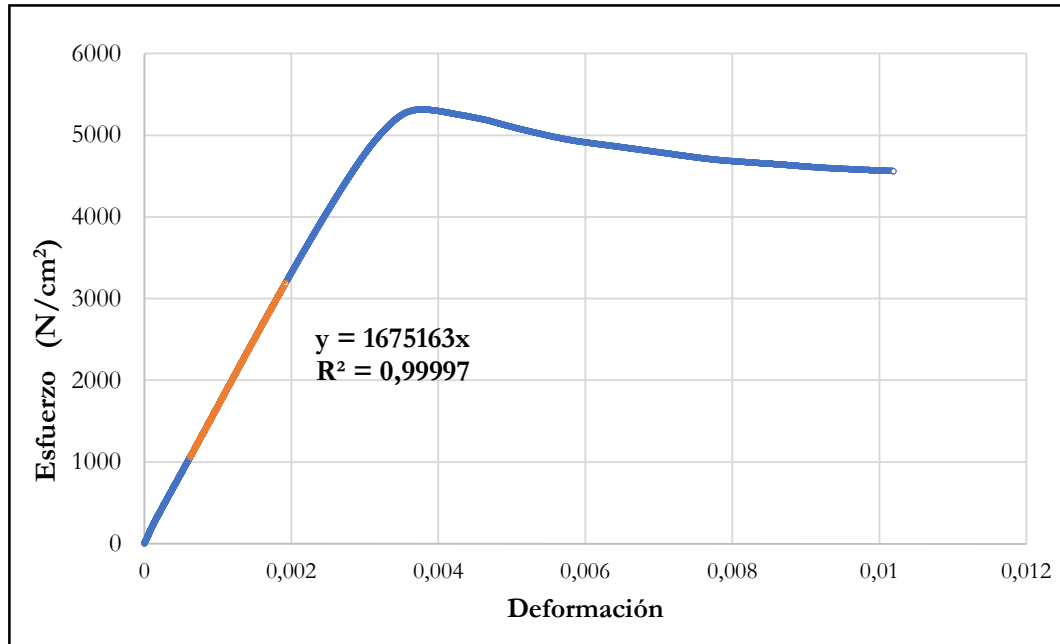
$P_1$	P	P	Acortamiento	Pendiente	$\sigma_{CLProp}$	$\sigma_{CL}$
N	N	Kgf	cm	N/cm	N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>
98615,6	116018,4	11826,5	0,0421	2438076,0	4517,1	5314,3

Se procedió ahora a realizar la corrección por humedad de los valores presentados acorde con NTC 301, donde para la resistencia unitaria máxima se establece un valor de corrección equivalente al 5% por cada 1% de variación en el contenido de humedad. Los módulos de elasticidad a compresión no fueron sujetos a corrección. En la Tabla 4-5 se presentan los valores de resistencia corregidos junto con los módulos de elasticidad.

**Tabla 4-5** Resistencia ajustada a la compresión probeta I22BHCL1

$\sigma_{CLProp}$	$\sigma_{CL}$	$E_{cproporcional}$	$E_c$
N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>
4917,0	5706,3	1610773,6	1675163,5

Teniendo en cuenta que en el campo de la ingeniería son comúnmente empleadas las gráficas esfuerzo-deformación ya que permiten hacer comparaciones entre diferentes muestras, así como determinar los módulos de elasticidad. Se presenta en la Figura 4-3 la gráfica Esfuerzo vs Deformación de la probeta y la regresión realizada al segmento con un comportamiento lineal.



**Figura 4-3** Gráfica Esfuerzo vs Deformación de la probeta I22BHCL1

De la gráfica y la regresión realizada, se puede apreciar que el valor obtenido para el módulo de elasticidad coincide con el previamente calculado empleando el procedimiento y la formulación matemática ilustrada en las normativas técnicas.

Una vez ejecutado el procedimiento descrito anteriormente para la totalidad de las probetas, se realizó el análisis estadístico de los datos obtenidos, para lo cual se calcularon las medias aritméticas de los grupos de probetas de una misma repisa con el fin de incluir en el análisis un único valor por ejemplar evaluado. Posteriormente, en el software estadístico R se realizan las verificaciones de normalidad, análisis de varianzas y análisis de varianza multivariante.

Primero se realizaron las pruebas de homocedasticidad a la variable principal de interés, donde se apreció que las varianzas analizadas bajo las diferentes variables presentan un comportamiento homogéneo, con lo que se continuó con la evaluación de la normalidad de los datos y un análisis de varianzas.

Los datos tuvieron un comportamiento normal y las variables en estudio como son el tipo de secado y el lote no generaron variación apreciable en las propiedades de estudio. Se realizó entonces un análisis de varianzas multivariante, donde se apreció que el tipo de secado generó una ligera variación por lo que se procedió al cálculo de las resistencias de forma global y segregada según el tipo de secado. Cabe mencionar que para los diferentes análisis realizados un valor inferior a 0,05 de la hipótesis evaluada implicaría una variación para tener en cuenta o un comportamiento no normal. Los resultados obtenidos del software R pueden consultarse en el Anexo C.

La resistencia máxima a la rotura por compresión paralela al grano presentó un coeficiente de variación inferior al máximo admitido, por lo cual no se requirió un ajuste de datos. Finalmente, se determinaron los esfuerzos admisibles según NSR-10, para lo cual, los valores calculados fueron reducidos a resistencias características y afectados por los factores de seguridad dados en el apéndice G.4.1 de la NSR-10. Los esfuerzos admisibles obtenidos para compresión paralela se presentan en la tabla Tabla 4-6, y el valor del MOE a compresión paralela y la densidad normal en la Tabla 4-7:

**Tabla 4-6** Esfuerzos admisibles a la compresión paralela al grano

	$\sigma_{CL}$ (N/cm <sup>2</sup> )			$\sigma_{CLprop}$ (N/cm <sup>2</sup> )		
	Global	Aire	Horno	Global	Aire	Horno
<b>Media</b>	4893,44	4967,18	4861,83	3984,70	4140,22	3918,04
n	50	15	35	50	15	35
<b>COV</b>	13,9%	17,5%	12,2%	14,9%	18,1%	13,1%
F <sub>0,05</sub>	3771,93	3534,91	3882,70	3006,59	2906,88	3074,74
F <sub>b</sub>	1471,05	1378,61	1514,25	1172,57	1133,68	1199,15
<b>Fi(Mpa)</b>	<b>14,71</b>	<b>13,78</b>	<b>15,14</b>	<b>11,72</b>	<b>11,33</b>	<b>11,99</b>



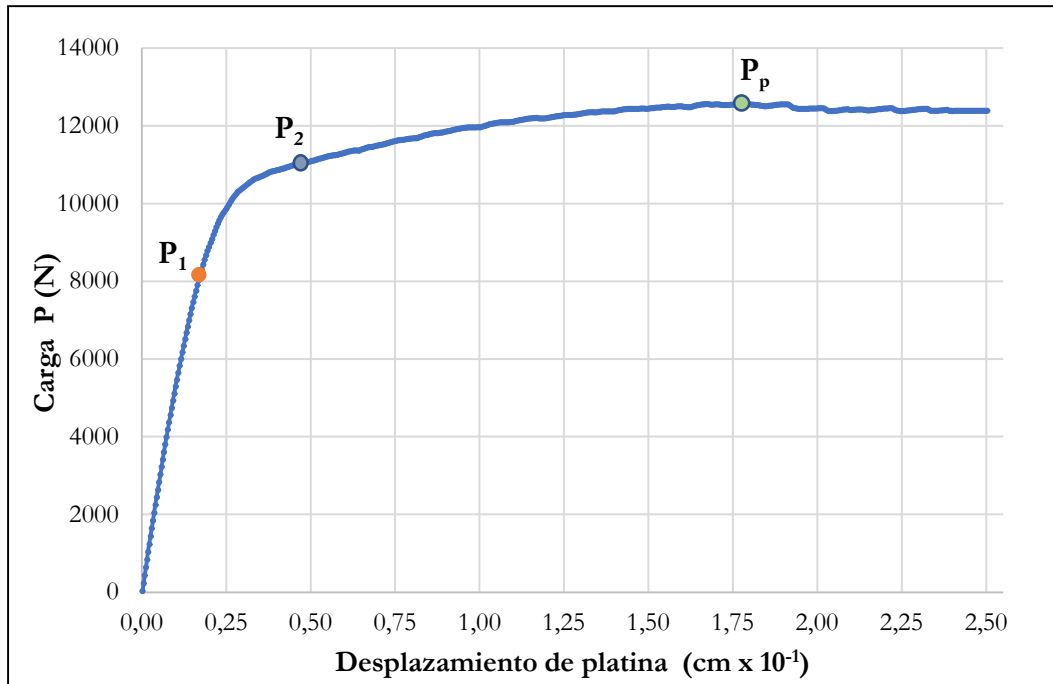
**Tabla 4-7** Densidad y módulo de elasticidad por compresión paralela al grano

	<b>Ec (N/cm<sup>2</sup>)</b>			<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>		
	<b>Global</b>	<b>Aire</b>	<b>Horno</b>	<b>Global</b>	<b>Aire</b>	<b>Horno</b>
<b>Media</b>	1449896	1481328	1436426	0,551	0,529	0,560
n	50	15	35	50	15	35
<b>COV</b>	15,5%	15,5%	15,6%	9,8%	10,1%	9,4%
F <sub>0,05</sub>	1080859	1103194	1068036	0,46	0,44	0,47
<b>Fi(Mpa)</b>	<b>14498,96</b>	<b>14813,28</b>	<b>14364,26</b>	<b>0,551</b>	<b>0,529</b>	<b>0,560</b>

### 4.3. Compresión perpendicular al grano

Con los datos obtenidos del ensayo, se aplicó la ecuación (2-3), para determinar la resistencia a la compresión perpendicular al grano. Se realizaron las gráficas Fuerza-Desplazamiento de platina para cada una de las probetas. Las gráficas para cada una se presentan en el Anexo B. De las gráficas se pudo determinar el punto P correspondiente al límite proporcional, así como también el esfuerzo generado al 1% de deformación. Tomando como ejemplo la probeta I14BACT1, se elaboró la gráfica Fuerza vs Desplazamiento de platina mostrada en la Figura 4-4.

Con los datos y la gráfica realizada se determinó el punto máximo P<sub>p</sub>, el punto P<sub>1</sub> correspondiente al límite proporcional y un punto P<sub>2</sub> referente al esfuerzo al 1% de deformación. Conociendo los puntos P y la sección de contacto de la platina sobre la probeta, que corresponde al ancho de la probeta multiplicada por el ancho de la platina metálica de contacto, se utilizó entonces la ecuación (2-3) para calcular la resistencia a la compresión perpendicular al grano. Por otro lado, el esfuerzo en el límite proporcional y al 1% de deformación fueron calculados aplicando la ecuación (2-4).



**Figura 4-4** Gráfica Fuerza vs Desplazamiento de platina de la probeta I14BACT1

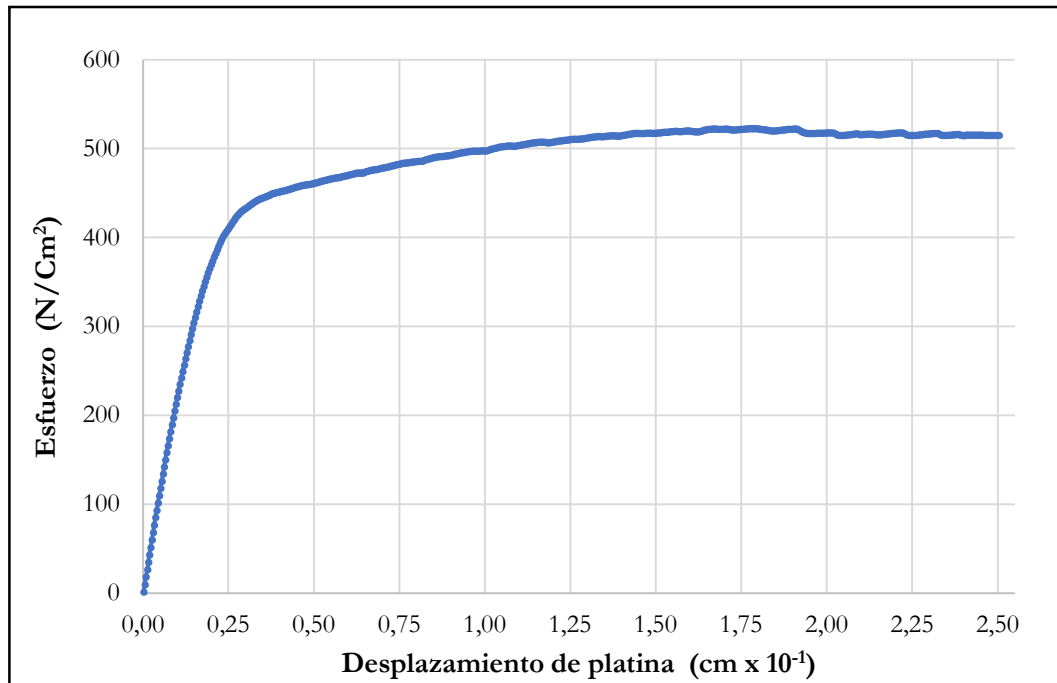
Con lo anterior, la resistencia a la compresión perpendicular al grano para la probeta I14BACT1 es:

**Tabla 4-8** Cargas y esfuerzos a compresión perpendicular de la probeta I14BACT1

$P_{1\%}$	$P_1$	$P_P$	$\sigma_{CP1\%}$	$\sigma_{CLP}$	$\sigma_{CP}$
N	N	N	N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>
11052,71	8170,38	12569,81	459,43	339,62	522,49

Considerando que es comúnmente empleado en la práctica ingenieril el uso de graficas Esfuerzo vs Desplazamiento para este tipo de ensayos, se presenta en la Figura 4-5 la gráfica Esfuerzo vs Desplazamiento de platina de la probeta I14BACT1.

Posteriormente, se realizó la corrección por contenido de humedad de los valores presentados acorde con NTC 301, donde para la resistencia a compresión perpendicular se establece un valor de corrección equivalente a 5,5% por cada 1% de variación en el contenido de humedad. En la Tabla 4-9 se presentan los valores de resistencia corregidos.



**Figura 4-5** Gráfica Esfuerzo vs Desplazamiento de platina de la probeta I14BACT1

**Tabla 4-9** Resistencia ajustada a la compresión perpendicular probeta I14BACT1

$\sigma_{CP1\%}$	$\sigma_{CLP}$	$\sigma_{CP}$
N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>
467,73	345,75	531,93

Con los valores de resistencia calculados y corregidos para la totalidad de las probetas, se procedió a realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos, para lo cual fueron determinadas las medias aritméticas de los grupos de probetas de una misma repisa con el fin de incluir en el análisis un único valor por ejemplar evaluado. Considerando que en la normativa se establece que el coeficiente de variación no deberá ser superior al 28%, se realiza su evaluación para determinar si se requiere ajustar los datos.

Para este caso el coeficiente de variación fue del 36%, por lo que se procedió a realizar el ajuste de datos acorde con la correlación presente entre la resistencia a la compresión perpendicular y la densidad. En casos donde el comportamiento de la probeta es atípico

en los dos parámetros se procedió a la eliminación de esta siguiendo lo recomendado en la NTC301.

Con los datos ajustados de tal forma que el Coeficiente de variación fuera inferior al 28%, con la ayuda del software estadístico R se realizan las verificaciones de homocedasticidad, normalidad, análisis de varianza y análisis de varianza multivariante.

Las varianzas cumplen el supuesto de homocedasticidad, con lo que se continuó con la evaluación de la normalidad de los datos y un análisis de varianzas. Los datos tienen un comportamiento normal y acorde con el análisis ANOVA de las variables en estudio la procedencia del material no generó una alteración apreciable, sin embargo, el tipo de secado si originó una marcada variación.

Se realizó entonces un análisis de varianzas multivariante para corroborar lo observado en el análisis de varianzas, en el cual nuevamente el tipo de secado generó una marcada variación por lo que se procedió al cálculo de las resistencias de forma global y segregada según el tipo de secado. Cabe mencionar que para los diferentes análisis realizados un valor inferior a 0,05 de la hipótesis evaluada implicaría una variación para tener en cuenta o un comportamiento no normal. Los resultados obtenidos pueden consultarse en el Anexo C.

Se procedió finalmente a determinar los esfuerzos admisibles según NSR-10, por lo que los valores calculados fueron reducidos a esfuerzos característicos y afectados por los factores de seguridad dados en el apéndice G.4.1 de la NSR-10. Los valores obtenidos para el esfuerzo admisible a la compresión perpendicular al grano se presentan en la Tabla 4-10, y el esfuerzo a la compresión perpendicular al 1% de deformación y la densidad normal en la Tabla 4-11:

**Tabla 4-10** Esfuerzos admisibles a la compresión perpendicular al grano

	$\sigma_{CP}$ (N/cm <sup>2</sup> )			$\sigma_{CLP}$ (N/cm <sup>2</sup> )		
	Global	Aire	Horno	Global	Aire	Horno
<b>Media</b>	<b>686,27</b>	<b>608,94</b>	<b>883,12</b>	<b>408,89</b>	<b>356,61</b>	<b>541,95</b>
Mediana	678,99	604,70	849,67	400,36	352,37	530,26
n	39	28	11	39	28	11
<b>COV</b>	<b>27,3%</b>	<b>23,3%</b>	<b>15,9%</b>	<b>27,8%</b>	<b>20,0%</b>	<b>16,7%</b>
F <sub>0,05</sub>	<b>377,79</b>	<b>375,20</b>	<b>651,94</b>	<b>222,12</b>	<b>239,58</b>	<b>393,09</b>
Fb	236,12	234,50	407,46	138,82	149,74	245,68
<b>Fi(Mpa)</b>	<b>2,36</b>	<b>2,34</b>	<b>4,07</b>	<b>1,39</b>	<b>1,50</b>	<b>2,46</b>

**Tabla 4-11** Densidad y esfuerzo a la compresión perpendicular al 1% de deformación

	$\sigma_{CP1\%}$ (N/cm <sup>2</sup> )			Densidad (g/cm <sup>3</sup> )		
	Global	Aire	Horno	Global	Aire	Horno
<b>Media</b>	<b>359,29</b>	<b>310,82</b>	<b>482,67</b>	<b>0,56</b>	<b>0,56</b>	<b>0,56</b>
Mediana	352,27	305,47	506,27	0,57	0,57	0,56
n	39	28	11	39	28	11
<b>COV</b>	<b>37,5%</b>	<b>37,0%</b>	<b>20,9%</b>	<b>8,1%</b>	<b>8,9%</b>	<b>6,0%</b>
F <sub>0,05</sub>	<b>137,39</b>	<b>121,80</b>	<b>316,71</b>	<b>0,49</b>	<b>0,48</b>	<b>0,51</b>
Fb	85,87	76,13	197,95			
<b>Fi(Mpa)</b>	<b>0,86</b>	<b>0,76</b>	<b>1,98</b>	<b>0,560</b>	<b>0,559</b>	<b>0,561</b>

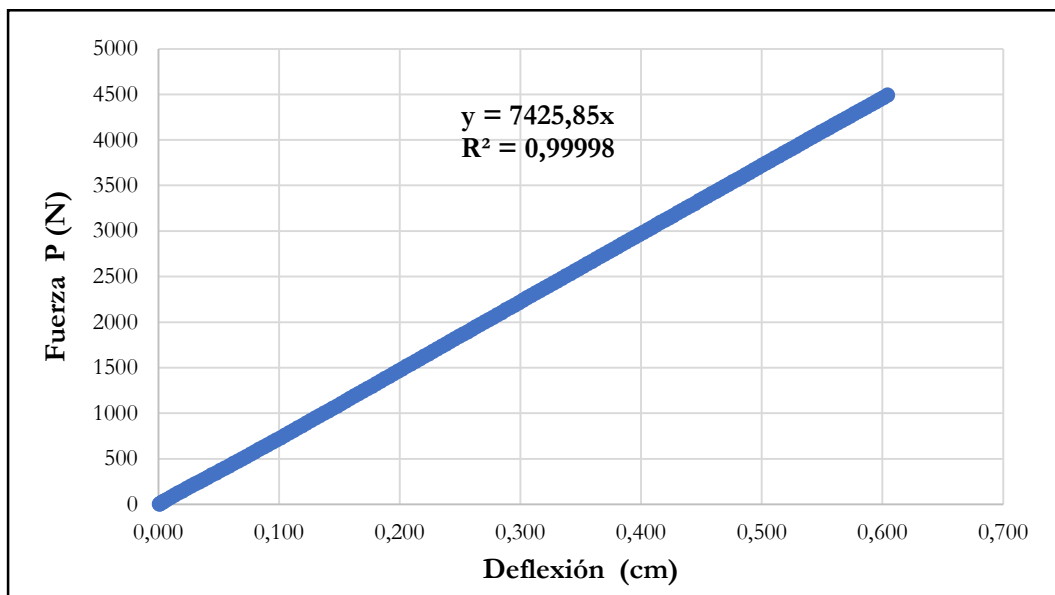
De los datos presentados es apreciable la influencia del tipo de secado, sin embargo, infortunadamente los dos grupos son desiguales por lo que tomar una media directa con la totalidad de los datos puede verse sesgada al dar un peso mayor a los elementos con secado al aire. Por tal motivo se realizó una media de las medias por tipo de secado para su comparación con los valores de referencia presentados en NSR-10, los valores obtenidos se presentan a continuación:

**Tabla 4-12** Resistencia a la compresión perpendicular al grano

$\sigma_{CP}$ (MPa)	$\sigma_{CLP}$ (MPa)	$\sigma_{CP1\%}$ (MPa)
3,21	1,98	1,37

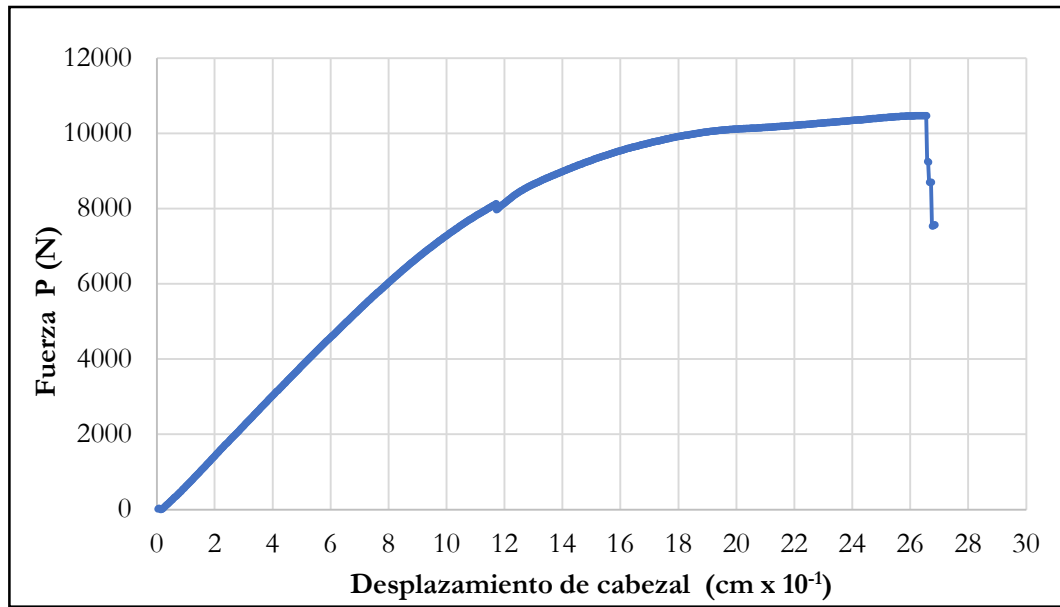
#### 4.4. Flexión estática

La resistencia máxima a la flexión fue calculada aplicando la ecuación (2-5). Se realizaron gráficas Fuerza vs deflexión para cada una de las probetas, a partir de las cuales se calculó una regresión lineal para determinar la pendiente de la recta en el tramo de comportamiento elástico y con ello el módulo de elasticidad para cada una. Tomando como ejemplo la probeta I18BHF1, se elaboró con los valores obtenidos de la ejecución del ensayo la gráfica Fuerza vs Deflexión presente a continuación:



**Figura 4-6** Gráfica Fuerza vs Deflexión de la probeta I18BHF1

Teniendo en cuenta que en la mayoría de los casos se retiró el deflectómetro antes de la falla con el fin de proteger el mismo de algún daño, se realizaron gráficas Fuerza vs desplazamiento de cabezal, con el fin de visualizar el comportamiento general hasta la falla. Las diferentes gráficas se presentan en el Anexo B. La Figura 4-7, muestra la gráfica fuerza Vs desplazamiento del cabezal para la probeta I18BHF1.



**Figura 4-7** Gráfica Fuerza vs desplazamiento de cabezal de la probeta I18BHF1

El módulo de elasticidad fue calculado empleando la ecuación (2-6). Cabe aclarar que es posible utilizar un solo punto dentro del rango elástico, sin embargo, se consideró más adecuado emplear la pendiente obtenida de la regresión lineal de la gráfica de Fuerza vs Deflexión. Los valores del módulo de elasticidad y módulo de rotura para la probeta I18BHF1 se presentan en la Tabla 4-13.

**Tabla 4-13** Módulo de elasticidad y resistencia máxima a flexión probeta I18BHF1

<b>L entre apoyos</b>	<b><i>a</i></b>	<b><i>e</i></b>	<b>I</b>	<b>Pendiente</b>	<b>E</b>	<b>P</b>	<b><math>\sigma_F</math></b>
cm	cm	cm	cm <sup>4</sup>	N/cm	N/cm <sup>2</sup>	N	N/cm <sup>2</sup>
72,00	4,843	4,822	45,236	7425,85	1276505	10476,07	10049,82

Se realizó la corrección por contenido de humedad de los valores presentados acorde con NTC 301, donde para la resistencia máxima a la flexión se establece un valor de corrección equivalente al 4% por cada 1% de variación en el contenido de humedad. En el caso del módulo de elasticidad debió ajustarse a razón de 2% por cada 1% de variación. En la Tabla 4-14 se presentan los valores ajustados.

**Tabla 4-14** Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad ajustado probeta I18BHF1

<b>E</b>	<b><math>\sigma_F</math></b>	<b>Densidad</b>
<b>N/cm<sup>2</sup></b>	<b>N/cm<sup>2</sup></b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>
1454093	12846,09	0,5872

Con los valores ajustados para la totalidad de los especímenes, se realizó el análisis estadístico de los datos, para lo cual se calcularon las medias aritméticas de los grupos de probetas de una misma repisa con el fin de incluir en el análisis un único valor por ejemplar evaluado. Considerando que en la normativa se establece que el coeficiente de variación no deberá ser superior al 16% para el módulo de ruptura e inferior al 22% para el módulo de elasticidad, se realizó su evaluación con el fin de determinar si se requería ajustar los datos.

En este caso, el coeficiente de variación para el módulo de elasticidad fue de 17.98%, el cual se encuentra dentro de lo permitido. Por otro lado, el coeficiente de variación del módulo de rotura se encuentra en el 16.42%, por lo que se procede a realizar el ajuste de datos acorde con la correlación presente entre la resistencia máxima a la flexión y el módulo de elasticidad.

Con los datos ajustados de tal forma que el Coeficiente de variación sea inferior al 16%, se realizaron las verificaciones de normalidad, análisis de varianza y análisis de varianza multivariante. Los diferentes análisis realizados en el software estadístico R pueden consultarse en el Anexo C.

Primero se realizaron las pruebas de homocedasticidad, donde se determinó que los datos tenían un comportamiento homogéneo, por lo cual a continuación se evaluó la normalidad de los datos y se realizó un análisis de varianza. Se encontró que los datos tienen un comportamiento normal, posteriormente se realizó un análisis de ANOVA, el cual mostró que, de las variables en estudio, la procedencia, es decir el lote no generó diferenciación apreciable, mientras el tipo de secado si presentó una variación importante en el comportamiento.



Se realizó entonces un análisis de varianzas multivariante, con el fin de evaluar la influencia de las variables en conjunto, el cual confirmó que la procedencia no generó variaciones apreciables en las propiedades de estudio. Por otro lado, el tipo de secado si generó variaciones importantes en la resistencia máxima a flexión y en los módulos de elasticidad. El análisis multivariante mostró de forma marcada dicha influencia, por lo que se procedió al cálculo de las resistencias de forma segregada. Es importante señalar que dada la variación y considerando que las humedades en el caso de secado al aire son bastante altas, para este caso fueron consideradas por separado totalmente, por lo tanto, no se calcularon las diferentes propiedades de forma global.

Por último, se determinaron los esfuerzos admisibles según NSR-10, por lo que los valores calculados fueron reducidos a esfuerzos característicos y afectados por los factores de seguridad dados en el apéndice G.4.1 de la NSR-10. Los valores obtenidos para los esfuerzos a la flexión y módulos de elasticidad se presentan en la tabla Tabla 4-15.

**Tabla 4-15** Esfuerzos admisibles a la flexión, módulos de elasticidad y densidades.

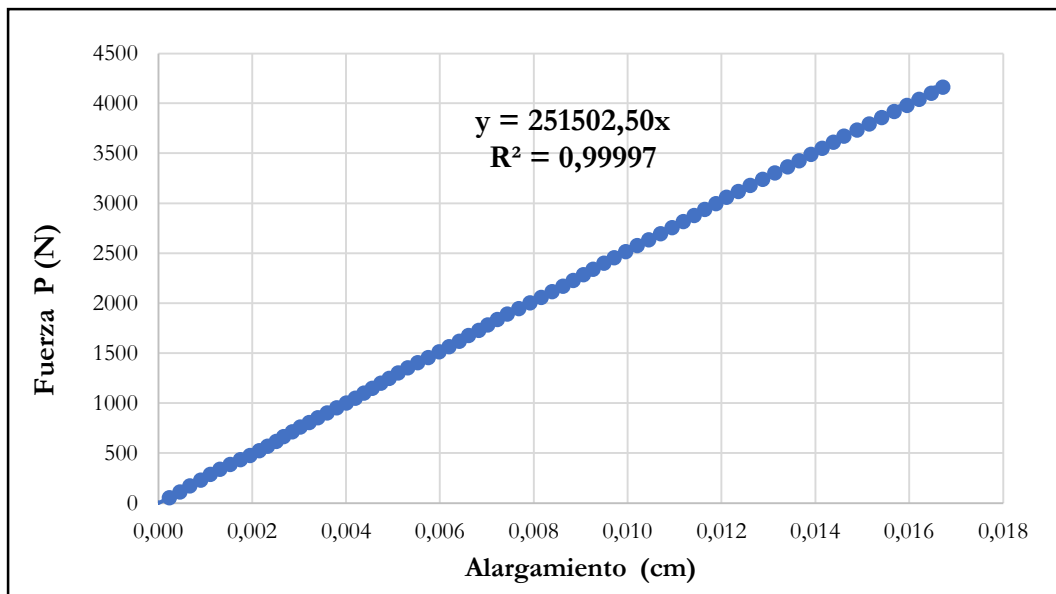
	E (N/cm <sup>2</sup> )		$\sigma_F$ (N/cm <sup>2</sup> )		Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	
	Aire	Horno	Aire	Horno	Aire	Horno
<b>Media</b>	932360	1150308	7937,91	8572,16	0,5210	0,5476
Mediana	937379	1178575	8009,78	8424,77	0,5270	0,5449
n	47	34	47	34	47	34
<b>COV</b>	<b>15,6%</b>	<b>13,6%</b>	<b>14,0%</b>	<b>15,6%</b>	<b>11,7%</b>	<b>6,3%</b>
F <sub>0,05</sub>	<b>693187</b>	<b>893491</b>	<b>6109,31</b>	<b>6369,22</b>	<b>0,4207</b>	<b>0,4908</b>
F <sub>b</sub>	430110	554395	1374,59	1433,07		
<b>Fi(Mpa)</b>	<b>9323,6</b>	<b>11503,08</b>	<b>13,74</b>	<b>14,33</b>	<b>0,5210</b>	<b>0,5476</b>

## 4.5. Tracción paralela al grano

El esfuerzo unitario máximo a la tracción paralela al grano se determinó aplicando la ecuación(2-7). Se realizaron las gráficas Fuerza-Alargamiento para cada una de las probetas. Considerando que en la mayoría de los casos se retiró el extensómetro antes de

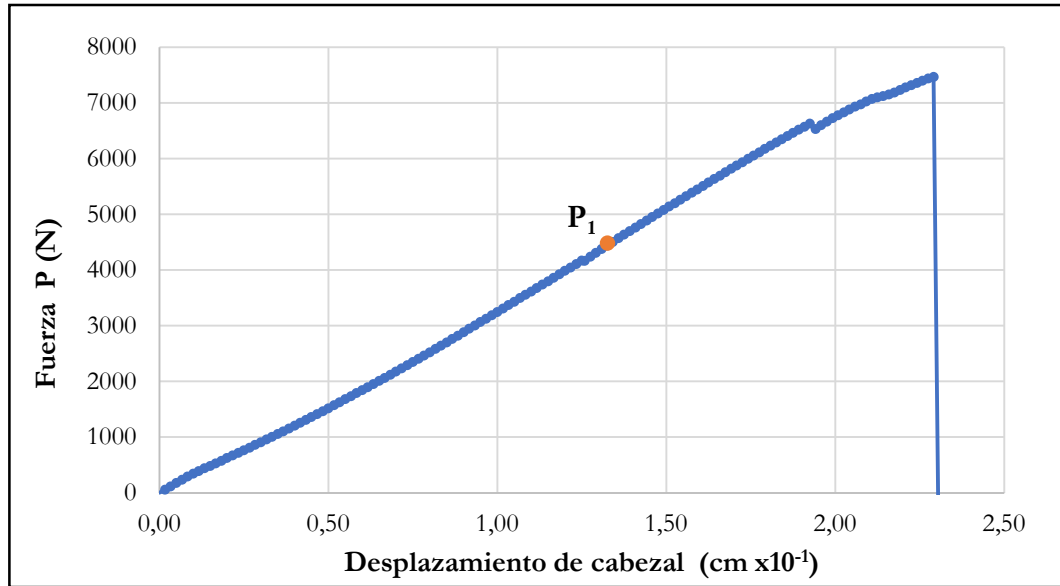
la falla con el fin de proteger el mismo de algún daño, se realizaron gráficas Fuerza vs desplazamiento de cabezal, con el fin de visualizar el comportamiento general hasta la falla. Las diferentes gráficas se presentan en el Anexo B.

De las gráficas se determinó el punto  $P_1$  correspondiente al límite proporcional, adicionalmente se realizó una regresión lineal para determinar la pendiente de la recta en el tramo de comportamiento elástico y con ello el módulo de elasticidad. Tomando como ejemplo la probeta I27BATL2, se elaboró la gráfica Fuerza vs Alargamiento mostrada a continuación:



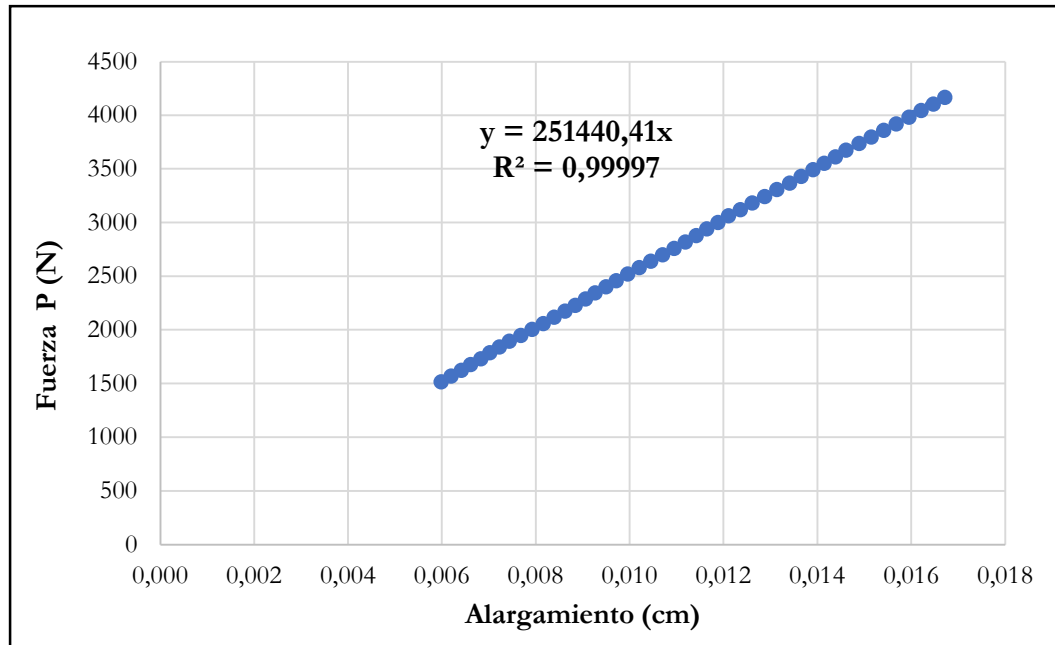
**Figura 4-8** Gráfica Fuerza vs Alargamiento de la probeta I27BATL2

Conociendo los puntos P y la sección transversal, la cual fue calculada acorde con lo descrito en el numeral 4.1, se aplicó la ecuación (2-7) para calcular el esfuerzo unitario máximo a la tracción paralela al grano y la ecuación (2-8) para el esfuerzo unitario en el límite proporcional. Considerando que en la gráfica Fuerza vs Alargamiento no se alcanza a percibir el punto de proporcionalidad, se presenta la Figura 4-9



**Figura 4-9** Gráfica Fuerza vs desplazamiento de cabezal de la probeta I27BATL2

Adicionalmente se seleccionó un punto aleatorio debajo del límite proporcional, con cuyos valores se aplicó la ecuación (2-9), determinando con esto el módulo de elasticidad a tracción. Sin embargo, se consideró como una opción más adecuada tomar los módulos obtenidos a partir de la regresión lineal con los valores comprendidos entre el 20% y el 60% de la carga máxima, verificando siempre estar por debajo del límite proporcional. En la Figura 4-10 se aprecia la regresión lineal realizada para dicha probeta, cabe señalar que estas gráficas se han realizado para la totalidad de los elementos ensayados a tracción paralela, empleando las mediciones realizadas con el extensómetro.



**Figura 4-10** Gráfica Regresión lineal Tracción paralela I27BATL2

Con lo anterior se tiene que la resistencia a la rotura por tracción longitudinal a al grano y el módulo de elasticidad por tracción es:

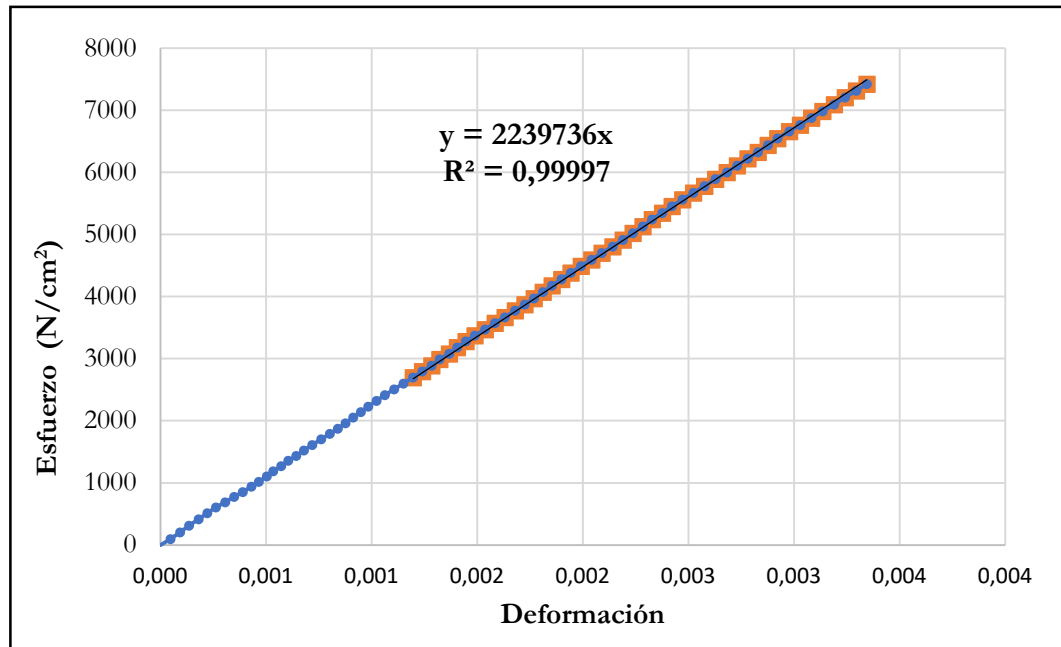
**Tabla 4-16** Cargas y esfuerzos a tracción paralela probeta I27BATL2

$P_2$	$P_1$	P	P	d	Pendiente	$\sigma_{TL}$	$\sigma_{TLP}$	$E_T$	$E_T$ (m)
N	N	N	Kgf	cm	N/cm	N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>
2986,9	4480,3	7467,1	761,2	0,0116	251440	13303	7982	2285492	2239733

Teniendo en cuenta que usualmente se realiza el cálculo del módulo de elasticidad mediante curvas Esfuerzo vs Deformación, se presenta en la Figura 4-11 la gráfica Esfuerzo vs Deformación de la probeta I27BATL2. De la pendiente obtenida de la regresión lineal, se aprecia que el valor reportado para el módulo de elasticidad es el mismo que el calculado previamente mediante la formulación matemática presentada en la NTC 944.

En el caso del ensayo a tracción paralela, las normativas no presentan factores de corrección por humedad. Se procedió a realizar el análisis estadístico de los datos

obtenidos, para lo cual se calcularon las medias aritméticas de los grupos de probetas de una misma repisa con el fin de incluir en el análisis un único valor por ejemplar evaluado.



**Figura 4-11** Gráfica Esfuerzo vs Deformación de la probeta I27BATL2

Considerando que en la normativa se establece que el coeficiente de variación no deberá ser superior al 16%, se realiza su evaluación con el fin de determinar si se requiere ajustar los datos. Cabe aclarar que, para este caso la NTC 301 no hace referencia de forma directa a dicho valor, sin embargo, NSR-10 considera como valor máximo el referido al módulo de rotura en flexión.

Para este caso, el coeficiente de variación es del 31.04% por lo que se realizó el ajuste de datos acorde con la correlación presente entre la resistencia máxima a la tracción longitudinal y el módulo de elasticidad. En casos donde el comportamiento de la probeta es atípico en los dos parámetros se procedió a la eliminación de esta siguiendo lo recomendado en NTC301.

Con los datos ajustados de tal forma que el coeficiente de variación fuera inferior al 16%, se realizaron en el software estadístico R las verificaciones de homocedasticidad,

normalidad, análisis de varianza y análisis de varianza multivariante. Primero se realizaron las pruebas de homocedasticidad, donde se comprobó que los datos presentaron un comportamiento que cumple con el supuesto de homocedasticidad, por lo cual a continuación se evaluó la normalidad de los datos y se realizó un análisis de varianzas.

Los datos mostraron un comportamiento normal y acorde con los análisis de ANOVA, las variables en estudio como son el tipo de secado y el lote no generan variación apreciable en las propiedades de estudio. Se realizó entonces un análisis de varianzas multivariante, con el fin de evaluar la influencia de las variables en conjunto.

Se confirmó que ni el lugar de procedencia, ni el tipo de secado generaron variaciones en los esfuerzos máximos a tracción paralela, ni en los módulos de elasticidad, por lo que se procedió al cálculo de las propiedades de forma global.

Por último, se determinaron los valores de esfuerzos admisibles según NSR-10, por lo que los valores calculados fueron reducidos a la esfuerzos característicos y afectados por los factores de seguridad dados en el apéndice G.4.1 de la NSR-10. Los valores obtenidos para la resistencia a la tracción paralela al grano se presentan en la tabla Tabla 4-17.

**Tabla 4-17** Esfuerzos admisibles a la tracción paralela al grano y módulo de elasticidad

	$\sigma_{TL}$ (N/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{TLP}$ (N/cm <sup>2</sup> )	$E_T$ (N/cm <sup>2</sup> )
<b>Media</b>	<b>11036,3</b>	<b>6637,4</b>	<b>1375048,8</b>
Mediana	11264,6	6895,0	1393099,1
n	69	75	64
<b>COV</b>	<b>15,2%</b>	<b>32,3%</b>	<b>17,7%</b>
$F_{0,05}$	<b>8272,53</b>	<b>3111,48</b>	<b>974929,39</b>
Fb	1395,99	525,06	
<b>Fi(Mpa)</b>	<b>13,96</b>	<b>5,25</b>	<b>13750,49</b>

## 4.6. Tracción perpendicular al grano

El valor del esfuerzo máximo a la tracción perpendicular al grano fue calculado aplicando la ecuación (2-10) con los datos obtenidos de la ejecución del ensayo. Del ensayo se tomaron solo los valores de la carga máxima alcanzada  $P$ . Las dimensiones de cada una de las probetas fueron tomadas antes del ensayo, por lo tanto, se conoce el área de la sección mínima de la misma. Cabe aclarar que la normativa no establece un factor de corrección por contenido de humedad. En la Tabla 4-18 se presentan los valores obtenidos para algunas de las probetas, el listado completo se presenta en el Anexo A.

**Tabla 4-18** Resistencia máxima a la tracción perpendicular de algunas probetas

Probeta	W			A	P	$\sigma_{TP}$	$\sigma_{TP}$
	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	%	cm <sup>2</sup>	Kgf	Kgf/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>
I29BATT1	26,60	24,00	10,8	11,05	276,18	25,00	245,25
I19MHTT2	28,80	25,70	12,1	10,78	389,01	36,09	354,04
II13BHHTT2	32,60	29,30	11,3	9,53	432,67	45,38	445,19
I18BATT4	28,60	25,60	11,7	10,01	244,62	24,44	239,76
I9BATT4	35,00	31,40	11,5	10,80	431,63	39,95	391,91
I11BHHTT2	23,20	20,90	11,0	9,32	465,34	49,94	489,92
I5BATT1	23,40	21,00	11,4	10,52	600,12	57,07	559,82
II3MHTT1	36,70	32,80	11,9	11,74	626,14	53,32	523,05
I22BHHTT3	34,00	30,30	12,2	12,32	457,03	37,08	363,77
II1BHHTT3	28,00	25,10	11,6	11,06	471,25	42,62	418,13

Con las resistencias calculadas para la totalidad de las probetas, se procedió a realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos, para lo cual se calcularon las medias aritméticas de los grupos de probetas de una misma repisa con el fin de incluir en el análisis un único valor por ejemplar evaluado. Posteriormente en el software estadístico R se realizaron las verificaciones de homocedasticidad, normalidad y análisis ANOVA.

Primero se realizaron las pruebas de homocedasticidad y normalidad, con lo que se comprobó que los datos tienen un comportamiento homogéneo y normal, posteriormente se realizó un análisis de varianzas.

Los análisis ANOVA mostraron que ni el tipo de secado, ni la procedencia generaron variación apreciable en las propiedades de estudio. Por lo anterior se procedió al cálculo de las resistencias de forma global. Los datos obtenidos, fueron llevados al percentil 5 con el fin de determinar el esfuerzo característico, cabe señalar que NSR-10 no incluye valores para el cálculo de los esfuerzos admisibles en tracción perpendicular.

**Tabla 4-19** Resistencia a la tracción perpendicular al grano

	$\sigma_{TP}$ (N/cm <sup>2</sup> )
<b>Media</b>	<b>474,09</b>
Mediana	463,95
n	82
<b>COV</b>	<b>23,5%</b>
F <sub>0,05</sub>	<b>290,95</b>
<b>Fi(Mpa)</b>	<b>4,74</b>

## 4.7. Cortante

El valor de la resistencia máxima al cizallamiento paralelo al grano fue determinado aplicando la ecuación (2-11) con los datos obtenidos de la ejecución del ensayo. Las dimensiones y pesos de cada una de las probetas fueron tomados antes del ensayo con lo que se conoce el área de la sección del plano de falla de esta y una densidad estimada. Cabe aclarar que, debido a los cortes adicionales realizados a las probetas para obtener la forma requerida, se pudieron generar discontinuidades o vacíos que no fueron tenidos en cuenta en el cálculo del volumen, por lo tanto, la densidad calculada se tiene en cuenta solo con fines de estimar una correlación con los valores de resistencia y no como la densidad propiamente de la especie en estudio.

Se realizó la corrección por contenido de humedad de los valores presentados acorde con la NTC 301, donde para la resistencia máxima al cizallamiento se establece un valor de corrección equivalente al 3% por cada 1% de variación en el contenido de humedad. En



la Tabla 4-20 se presentan los valores obtenidos para algunas de las probetas, el listado completo se presenta en el Anexo A.

Una vez calculadas y ajustadas las resistencias para cada una de las probetas, se procedió a realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos, para lo cual se calcularon las medias aritméticas de los grupos de probetas de una misma repisa con el fin de incluir en el análisis un único valor por ejemplar evaluado.

**Tabla 4-20** Resistencia máxima al corte paralelo de algunas probetas

Probeta	W	$S_{CZ}$	$\rho$	P	$\sigma_{CZ}$	$\sigma_{CZ}$ ajus.
	%	cm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	N	N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>
I22BAV2T	13,6	24,44	0,60	29413,62	1203,34	1262,41
I21BAV1T	13,6	24,05	0,50	14036,15	583,64	610,94
I22BAV4T	13,1	24,32	0,54	29007,88	1192,63	1232,00
I16BAV2T	13,4	24,21	0,57	31119,97	1285,24	1340,97
I9BAV2T	13,5	24,14	0,61	27987,73	1159,28	1210,11
I2BAV7T	12,4	24,34	0,49	22588,21	928,07	940,44
I25BAV3T	13,4	24,01	0,64	28894,47	1203,57	1255,30

Considerando que en la normativa se establece que el coeficiente de variación no deberá ser superior al 14%, se realiza su evaluación con el fin de determinar si se requiere ajustar los datos.

El coeficiente de variación obtenido es del 20.4%, por lo que se procedió a realizar el ajuste de datos acorde con la correlación presente entre la resistencia al corte y la densidad. Con los datos ajustados de tal forma que el coeficiente de variación sea inferior al 14%, se realizan las verificaciones en software estadístico R de normalidad y homocedasticidad y se ejecuta un análisis de varianza y un análisis de varianza multivariante.

Se encontró que los datos presentaron un comportamiento homogéneo y normal, por lo que se continuó con los análisis de varianzas. Los análisis ANOVA arrojaron que las variables en estudio como son el tipo de secado y la procedencia no generaron

diferenciación apreciable en las propiedades de estudio. Sin embargo, la dirección de la aplicación de la carga si mostró tener inferencia en la variación de las resistencias conseguidas, por consiguiente, se realizó un análisis de varianzas multivariante para corroborar lo encontrado.

El análisis MANOVA dio como resultado que es apreciable la influencia de la dirección de aplicación de la carga en el valor de la resistencia al corte, por lo que se calculó el esfuerzo máximo al cizallamiento de forma global y segregada según la dirección de aplicación de la carga.

Con el ajuste realizado se tiene que el coeficiente de variación es inferior al 14% en todos los casos de estudio. En la Tabla 4-21 se presentan los valores medios obtenidos, junto con los esfuerzos característica y los esfuerzos admisibles una vez afectados por los factores de seguridad establecidos en NSR-10.

**Tabla 4-21** Esfuerzos admisibles a la rotura por cizallamiento

	$\sigma_{CZ}$ (N/cm <sup>2</sup> )		
	<b>Global</b>	<b>Perpendicular</b>	<b>Tangencial</b>
<b>Media</b>	<b>879,55</b>	<b>853,30</b>	<b>904,62</b>
Mediana	860,82	840,13	918,41
Cuenta	131	64	67
<b>COV</b>	<b>13,7%</b>	<b>13,3%</b>	<b>13,4%</b>
$F_{0,05}$	<b>682,01</b>	<b>666,44</b>	<b>704,63</b>
Fb	142,06	138,82	146,77
<b>Fi(Mpa)</b>	<b>1,42</b>	<b>1,39</b>	<b>1,47</b>

## **5. Análisis de resultados**

Se encontró que la totalidad de las rectas de regresión de las probetas evaluadas e incluidas en el cálculo presentaron coeficientes de determinación cercanos a 1, brindando fiabilidad a los valores obtenidos y comprobando el cumplimiento del comportamiento teórico en el rango elástico de la madera. Es por lo anterior que, a pesar de que en ciertas normativas se presentaba como forma de cálculo del módulo de elasticidad la toma de un único punto debajo del límite de proporcionalidad, se optó por tomar como valor a reportar el obtenido mediante las regresiones lineales, gracias al comportamiento observado en las gráficas.

La variable de ubicación en altura de la troza evaluada no se tuvo en cuenta, con lo que se redujo el estudio a la evaluación de la influencia del tipo de secado representada en la nomenclatura como “A” para secado al aire y “H” para el secado en horno, la procedencia geográfica, representada como “I” para la zona catalogada como Lote I y “II” para la zona denominada Lote II y en el caso del cortante, se empleó la notación “T” cuando la dirección y por ende el plano de falla es tangencial a los anillos de crecimiento y “P” cuando estos son perpendiculares a los anillos de crecimiento.

### **5.1. Densidad y contenido de humedad**

Las densidades obtenidas mostraron tener variaciones menores a las de las propiedades mecánicas en estudio, considerando que el coeficiente de variación fue inferior al 10% en la mayoría de los casos. Adicionalmente se observó que los valores reportados son similares entre las probetas de diferentes ensayos mecánicos, cumpliendo con ello el comportamiento esperado, ya que los especímenes ensayados fueron elaborados partiendo

de las mismas piezas de madera, por lo cual no se esperaba encontrar diferencias importantes. En la Tabla 5-1 se presentan las densidades por ensayo y global. También se presenta la gravedad específica, entendida como la relación entre la densidad normal y la densidad del agua.

**Tabla 5-1** Densidad y gravedad específica encontrada para la madera de *Acacia Mangium* Wild

Ensayo	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )				G. Específica
	Global	Flexión	Comp. L.	Comp. P	Global
Media	0,5527	0,5476	0,551	0,56	0,4979
COV	8,08%	6,3%	9,8%	8,1%	8,08%
F <sub>0,05</sub>	0,4792	0,4908	0,46	0,49	0,4317

Al analizar la influencia de las variables en estudio se encontró que únicamente el tipo de secado generó una ligera alteración a los valores reportados, donde la densidad obtenida para los elementos secados en horno es ligeramente mayor. Esto puede deberse a diferenciaciones volumétricas. Cabe aclarar que las variaciones reportadas son bajas lo que además se comprobó con el análisis ANOVA realizado en cada ensayo, el cual no arrojó influencia notoria por parte de alguna de las variables estudiadas.

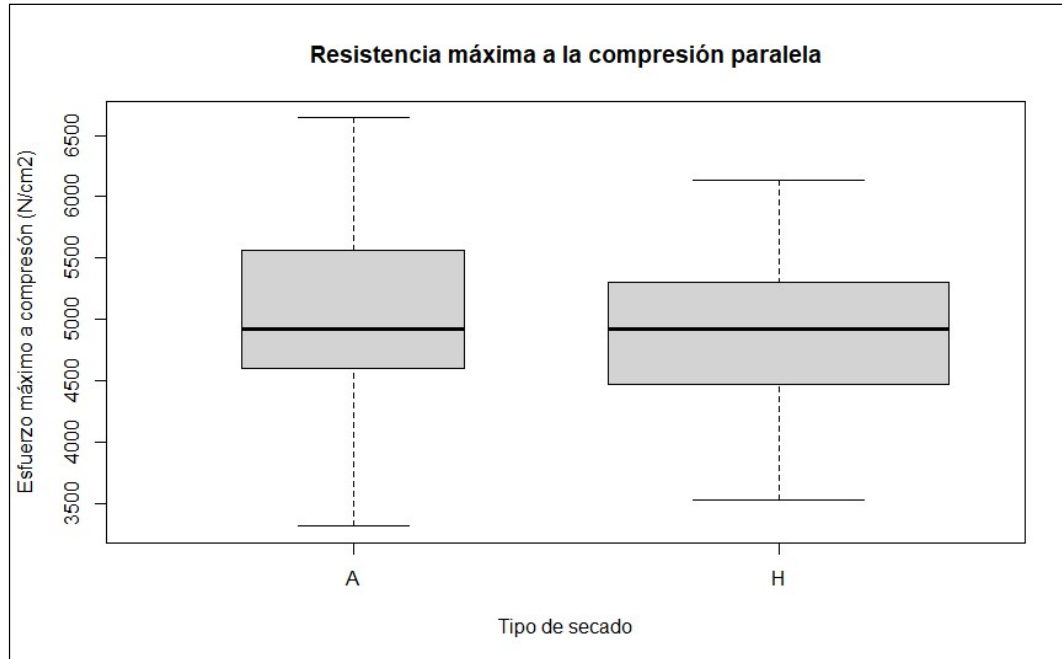
La humedad reportada dejó ver la posibilidad de obtener en la ciudad de Bogotá valores cercanos al 12%, logrando así una madera con condiciones adecuadas para ensayo con tan solo almacenarla de forma tal que se permita su secado al aire, sin necesidad de realizar un proceso de secado en horno. Sin embargo, este proceso requiere de un tiempo prolongado, ya que los ejemplares ensayados en el año 2020 presentaron contenidos de humedad elevados, mientras los especímenes evaluados en el 2021 lograron humedades que como en los casos de los elementos fallados a tracción, reportaron valores similares a los presentados por elementos de secado en horno.

## 5.2. Compresión paralela al grano

De las curvas Fuerza vs Acortamiento realizadas para cada una de las probetas se pudo apreciar un comportamiento con falla dúctil en la mayoría de estas. Por otro lado, los módulos de elasticidad obtenidos presentaron un comportamiento normal sin verse afectados de forma importante por las variables en estudio, como se comprobó en los análisis de ANOVA. Adicionalmente, se obtuvo un coeficiente de variación relativamente bajo, teniendo en cuenta que a pesar de la no limitación por parte de la NTC 301 para un valor máximo admisible, al comparar con el presentado para el módulo de elasticidad obtenido por flexión, los COV aquí alcanzados se encuentran debajo de dicho límite, con lo que no fueron objeto de ajustes.

La resistencia máxima a la rotura por compresión paralela al grano tampoco mostró haber sido afectada de forma notoria por las variables en estudio como se evidenció con los análisis de ANOVA, sin embargo, el análisis MANOVA mostró una ligera influencia por parte del tipo de secado, por lo cual se elaboró el gráfico de cajas y bigotes presentado en la Figura 5-1, donde se apreció que existe una ligera diferencia en el comportamiento de los datos, no obstante, el valor medio es muy similar en los dos casos, con la particularidad que los elementos con secado al aire presentaron un mayor nivel de variación.

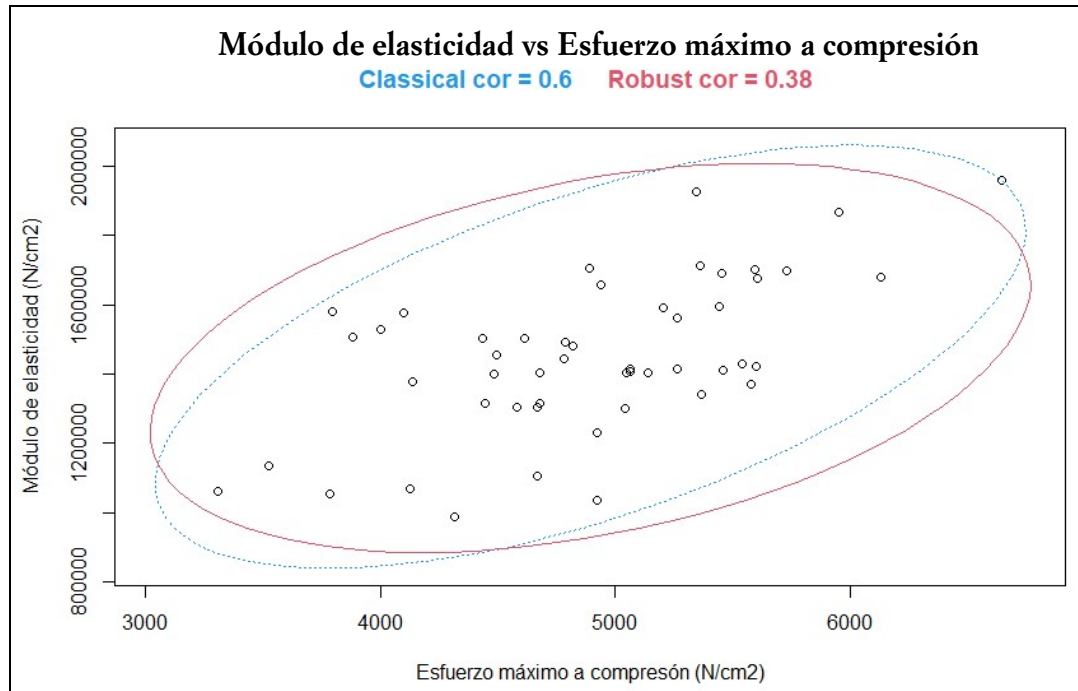
Lo valores de resistencias obtenidos son ligeramente superiores a los presentados en la literatura para plantaciones en algunos países asiáticos y latinoamericanos como Costa Rica. Cabe aclarar que, en varias de las investigaciones consultadas, las edades de los especímenes rondan los 5-10 años, mientras para el caso de estudio las edades rondan los 11 – 15 años.



**Figura 5-1** Gráfico de cajas y bigotes para resistencia máxima a la compresión paralela

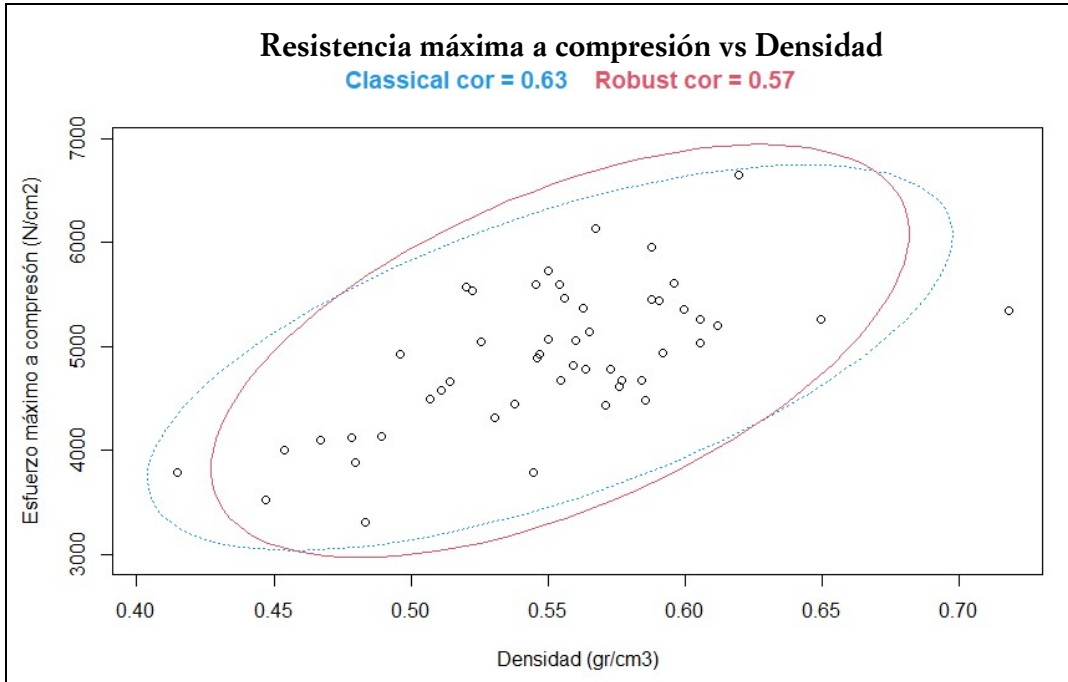
Teniendo en cuenta que la determinación del módulo de elasticidad por compresión se ha realizado partiendo de los datos obtenidos de la ejecución del ensayo para la evaluación de la resistencia máxima a la rotura por compresión axial, se evaluó la correlación existente entre estas dos propiedades. En la Figura 5-2, se presentan los módulos de elasticidad obtenidos vs los esfuerzos máximos a compresión paralela al grano de cada uno de los ejemplares evaluados.

Es apreciable que como era de esperarse, existe una correlación lineal directa entre los dos parámetros evaluados, sin embargo, no se considera que esta sea lo suficientemente fuerte como para permitir inferir con cierta certeza el valor de alguno de los dos parámetros en caso de conocerse solo uno de ellos. No obstante, esta correlación puede ser de utilidad toda vez que si permite ver un comportamiento proporcional posibilitando proponer una idea del comportamiento que tendría alguno de los dos parámetros en caso no conocer alguno.

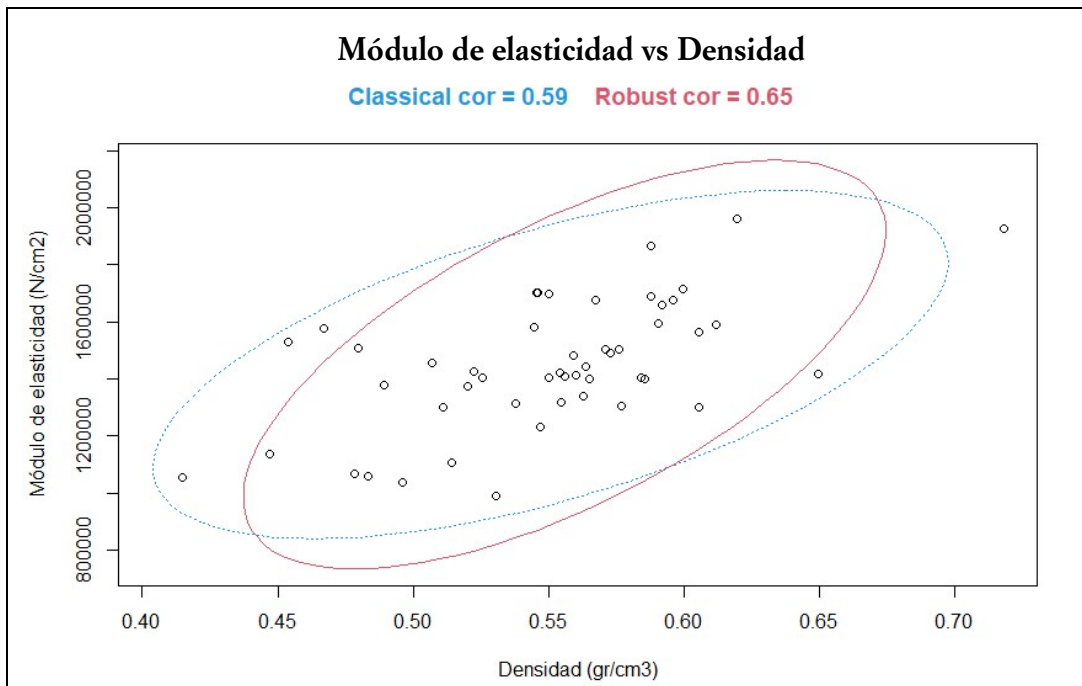


**Figura 5-2** Módulo de elasticidad a compresión paralela vs Esfuerzo máximo a compresión paralela

En la literatura estudiada se hace referencia a la correlación existente entre la densidad y las propiedades mecánicas, e incluso nuestra normativa en un principio clasificaba el desempeño de las diferentes especies según su densidad. Hoy en día, se tienen otros parámetros que permiten inferir el desempeño global de la madera de forma más adecuada y precisa, sin embargo, el peso específico sigue siendo en determinados casos un parámetro valioso al brindar una idea del comportamiento global que tendría la madera. En la Figura 5-3 se relaciona la resistencia máxima a compresión paralela al grano vs densidad y en la Figura 5-4 se muestra la correlación del módulo de elasticidad a compresión paralela al grano vs la Densidad.



**Figura 5-3** Esfuerzo máximo a la rotura por compresión paralela vs Densidad



**Figura 5-4** Módulo de elasticidad por compresión paralela al grano vs densidad

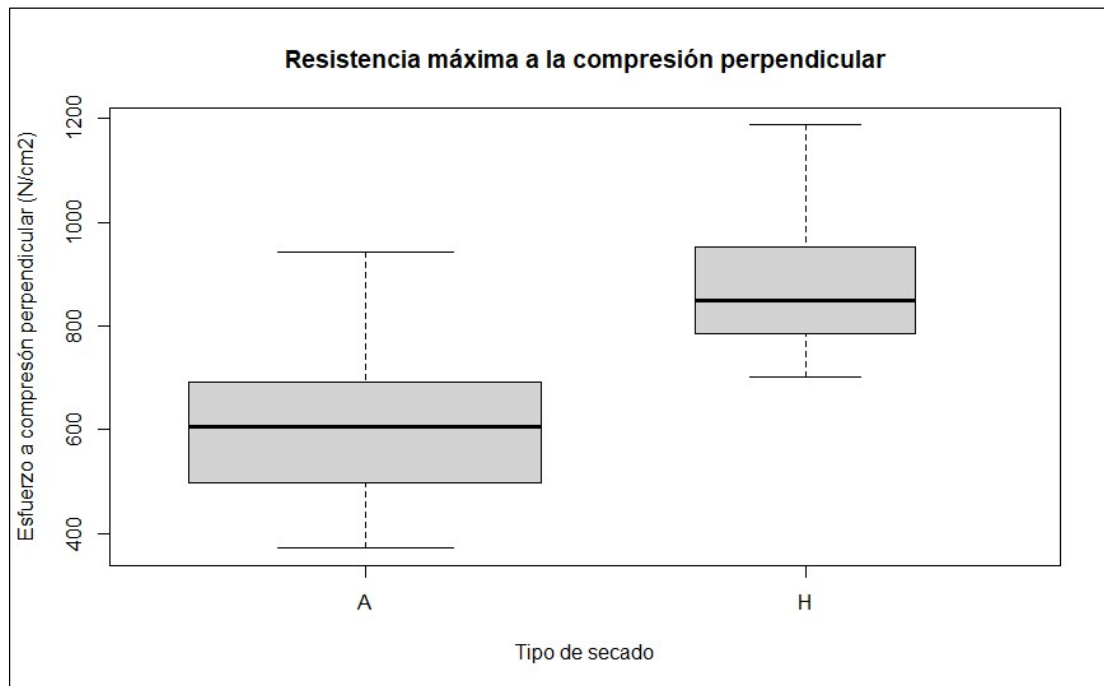
Para los casos presentados se apreció que la densidad presenta una correlación proporcional directa con la resistencia máxima a la compresión paralela al grano y el



módulo de elasticidad a compresión, incluso superior que la correlación presente entre estos dos últimos, con lo que podría emplearse para seleccionar los ejemplares con mejores propiedades mecánicas. Estos resultados concuerdan con lo presentado por otros investigadores donde relatan una buena correlación positiva entre la densidad y las propiedades mecánicas de la *Acacia Mangium*.

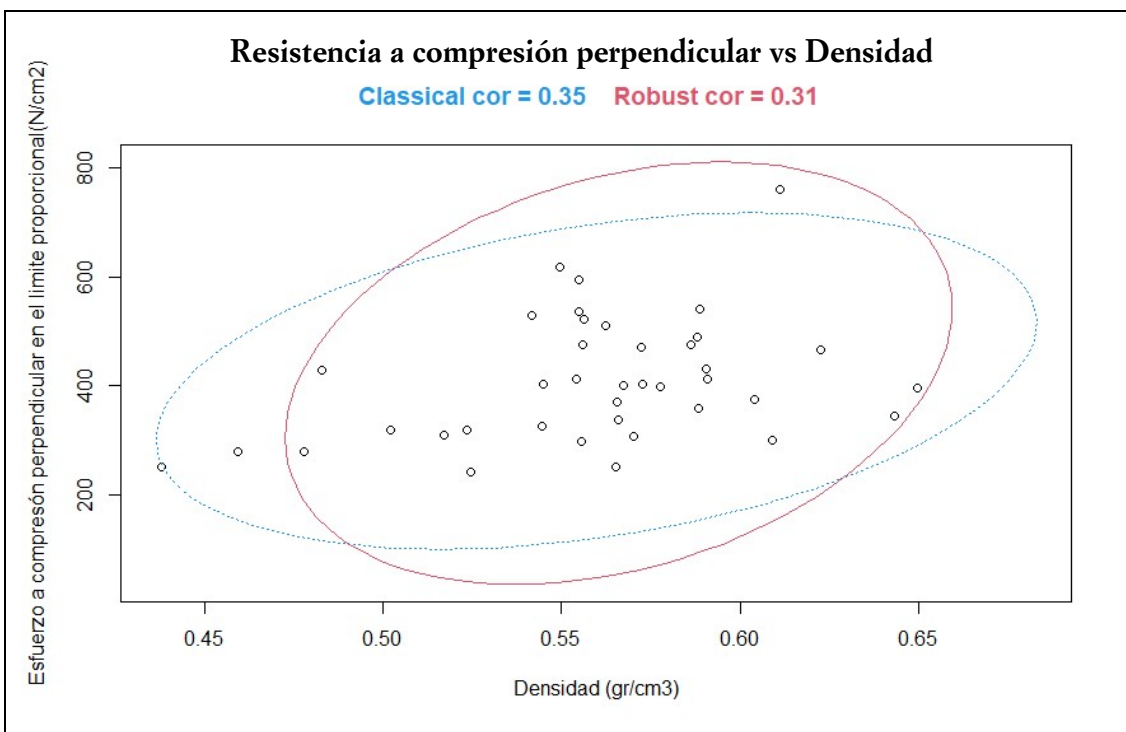
### 5.3. Compresión perpendicular

La resistencia a compresión perpendicular al grano mostró verse afectada en gran medida por el tipo de secado, lo cual es apreciable en la Figura 5-5. Se observó que no solo la resistencia obtenida fue inferior en el caso del secado con aire, sino que también presentó mayor variación, generando que la resistencia característica tuviese una mayor afectación y, por ende, fuese incluso aún menor en este apartado.



**Figura 5-5** Gráfico de cajas y bigotes para la resistencia a la compresión perpendicular

Comparado con las correlaciones presentadas para el caso de compresión paralela, en este caso son inferiores, sin embargo, se sigue presentando una correlación positiva, con lo cual a pesar de no ser un indicador adecuado para inferir con precisión el comportamiento a compresión perpendicular conociendo solo su densidad, si pudiera emplearse para seleccionar especímenes en los casos donde se desee encontrar una mejor calidad y desempeño. Otro factor para considerar es la posible afectación presentada por el tipo de secado, la cual puede marcar su influencia también en la correlación general presentada. La correlación encontrada para la resistencia a la compresión perpendicular y la densidad se presenta en la Figura 5-6.



**Figura 5-6** Resistencia a la compresión perpendicular en el límite proporcional vs Densidad

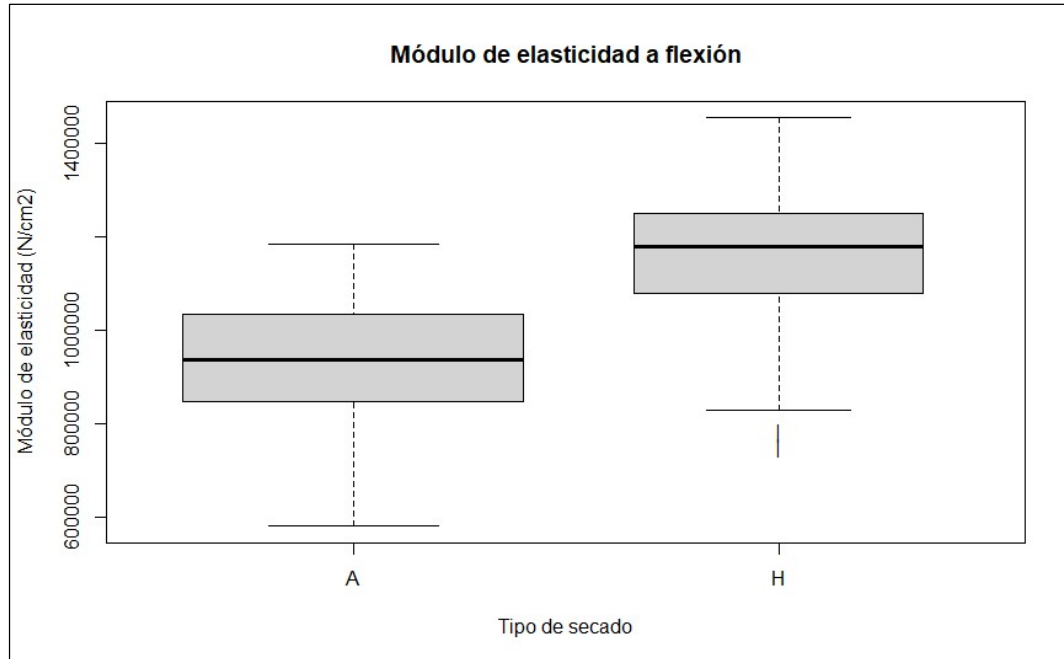
## 5.4. Flexión estática

Los ensayos a flexión con elementos con secado al aire fueron los primeros en ser ejecutados, razón por la cual, a diferencia de lo presentado en los elementos ensayados a tensión, las probetas ensayadas a flexión reportaron valores de humedad elevados, siendo

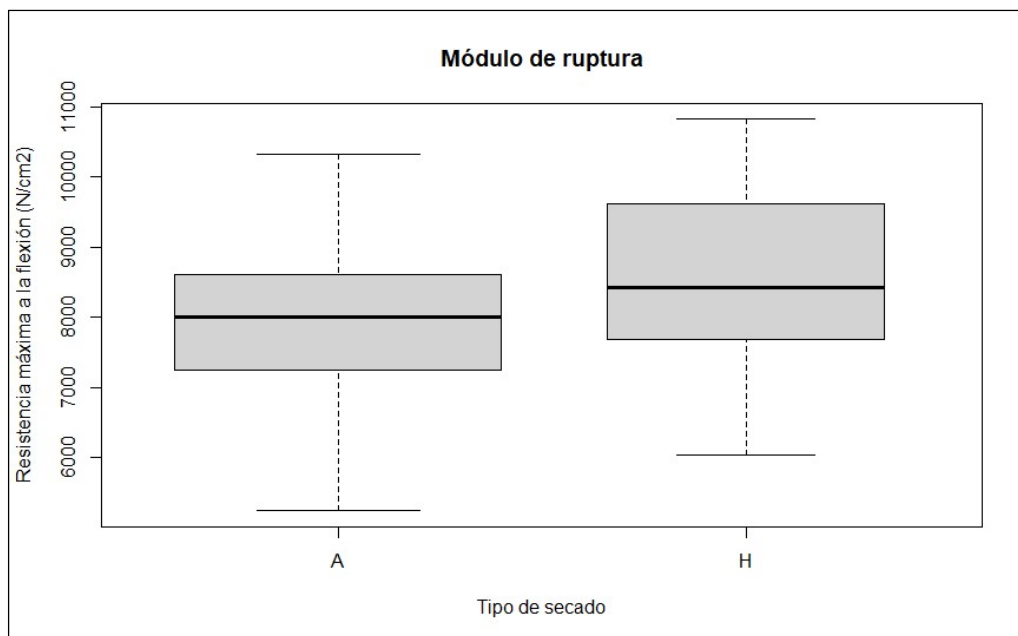
superiores al 50% en muchos de los casos. Debido a esto, se esperaban variaciones importantes al comparar los resultados obtenidos con los de los elementos secados en horno, situación que fue señalada por los análisis de ANOVA y MANOVA, los cuales reportaron una fuerte influencia de la variable tipo de secado en el desempeño a flexión de los elementos.

La Figura 5-7 y Figura 5-8 presentan el gráfico de cajas y bigotes para el módulo de elasticidad(MOE) y la resistencia máxima a la flexión o módulo de ruptura (MOR), segregados según el tipo de secado. En estos se aprecia de forma clara la diferencia presentada en los valores medios y rangos de los datos, siendo más marcada en el caso del MOE. Cabe aclarar que los datos presentados y analizados corresponden a los ajustados de tal forma que se cumpliera con el COV máximo permitido según la NTC 301, por lo cual es posible que al realizar el ajuste se modificara ligeramente el rango de variación presentado para el caso del MOR.

La resistencia máxima a la flexión alcanzada es ligeramente superior a las reportadas en la literatura, mientras en el caso del módulo de elasticidad se encuentra dentro del rango de los valores encontrados. Cabe aclarar que las edades de los especímenes evaluados son diferentes, ya que en la literatura se emplearon en su mayoría ejemplares con edades inferiores a los 10 años, mientras en el caso de estudio la edad de los árboles superaba en la mayoría de los casos los 12 años.

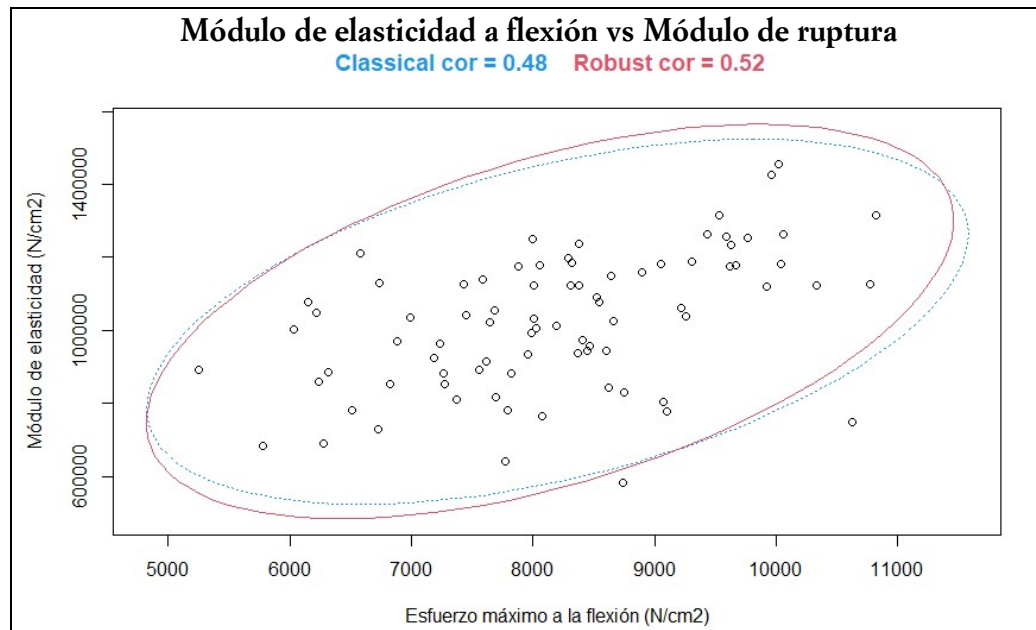


**Figura 5-7** Gráfico de cajas y bigotes de módulo de elasticidad por flexión según el tipo de secado



**Figura 5-8** Gráfico de cajas y bigotes de Resistencia máxima a la flexión según el tipo de secado

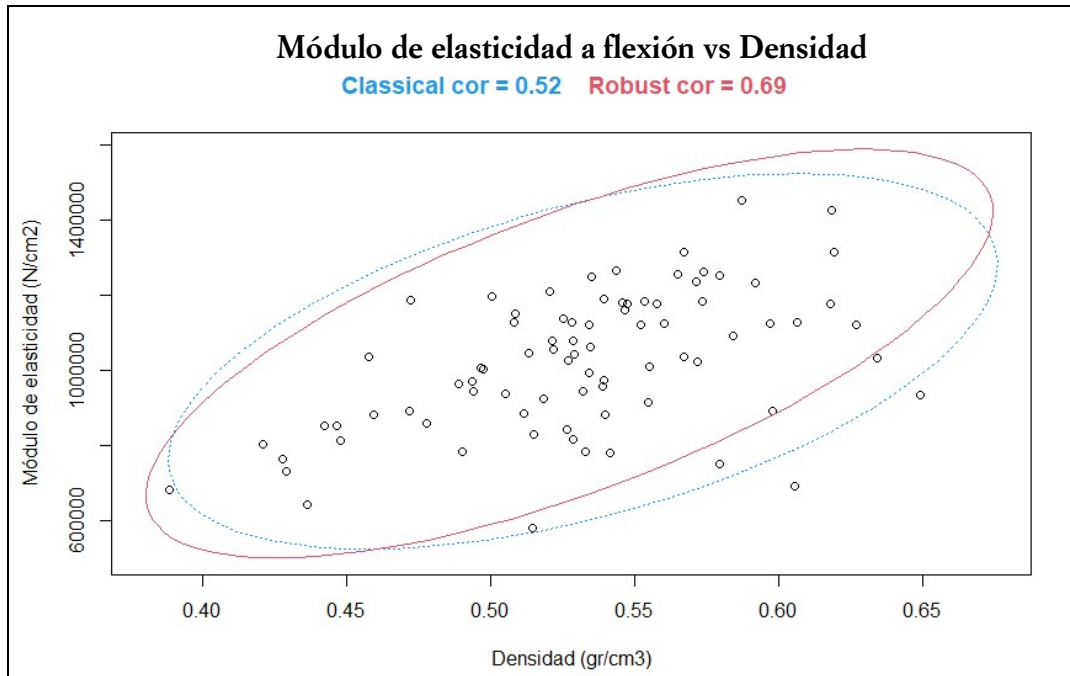
Considerando que el módulo de elasticidad a flexión y la resistencia máxima a la flexión fueron obtenidas del mismo ensayo, se evaluó la correlación existente entre estas propiedades, la cual se presenta en la Figura 5-9. Se encontró que existe una correlación proporcional directa con un coeficiente cercano a 0,50.



**Figura 5-9** Correlación del Módulo de elasticidad vs Módulo de ruptura.

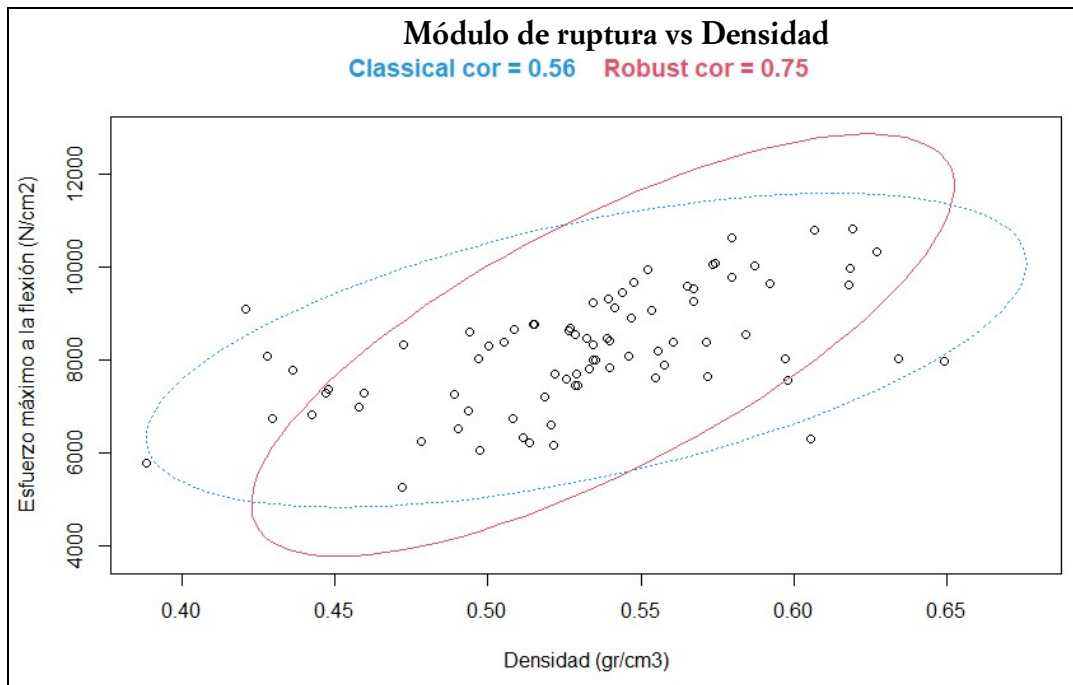
Considerando la proporcionalidad presentada en la literatura referente a la densidad y el desempeño mecánico y la aparente buena correspondencia existente en el caso de la madera de la *Acacia Mangium*, se evaluó la correlación existente entre la densidad y el módulo de elasticidad, presentada en la Figura 5-10, y la densidad y el módulo de ruptura analizada en la Figura 5-11. Se obtuvo que al igual que en el caso de la compresión paralela existe una relación proporcional directa con coeficientes de correlación superiores a 0,50.

Es de atención que las correlaciones obtenidas en los dos casos son superiores a la conseguida entre el MOR y el MOE. Teniendo en cuenta el nivel de correlación visualizado, es posible brindar una idea del comportamiento mecánico relacionado con el MOR y el MOE conociendo el valor de la densidad, lo cual es coherente con lo reportado por diferentes autores relacionado con la buena congruencia entre el desempeño mecánico y la densidad para el caso de la *Acacia Mangium*. No obstante, cabe que aclarar que no se considera que el coeficiente de correlación sea lo suficientemente fuerte como para inferir con certeza las propiedades mecánicas con solo el valor de la densidad, pero si es de utilidad para seleccionar ejemplares con un mejor desempeño mecánico.



**Figura 5-10** Correlación módulo de elasticidad a flexión vs Densidad.

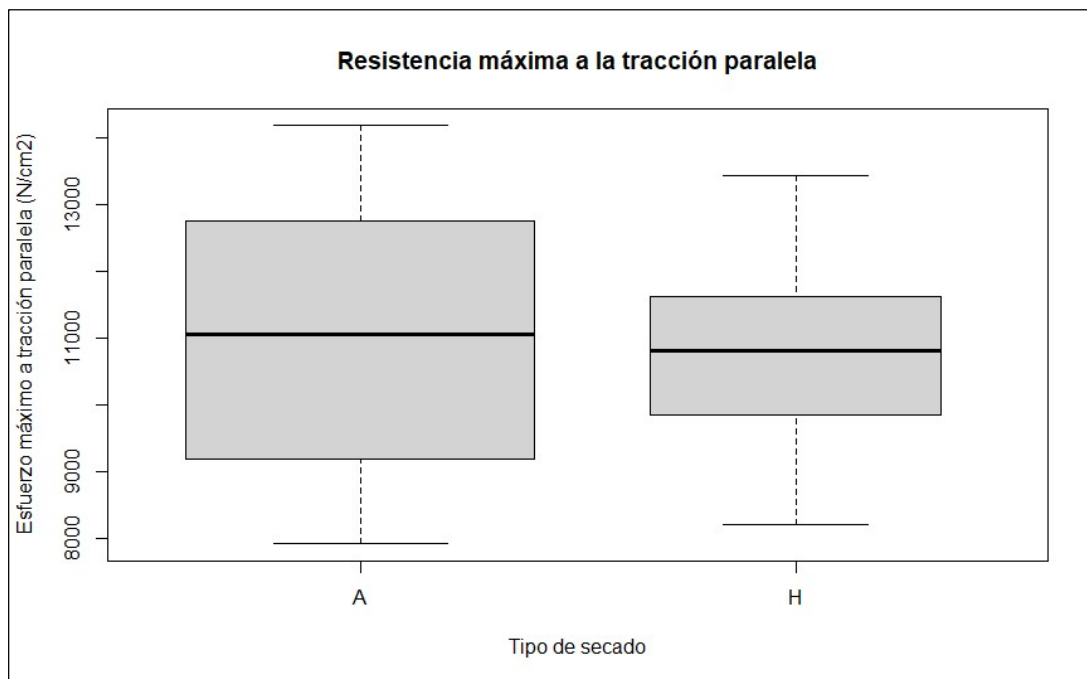
Es de importancia precisar que las correlaciones presentadas corresponden a elementos libre de defectos, por lo que su uso para elementos macizos puede generar variaciones, sin embargo, se considera de gran utilidad en casos como los elementos laminados al permitir seleccionar y optimizar los elementos para lograr un mejor desempeño.



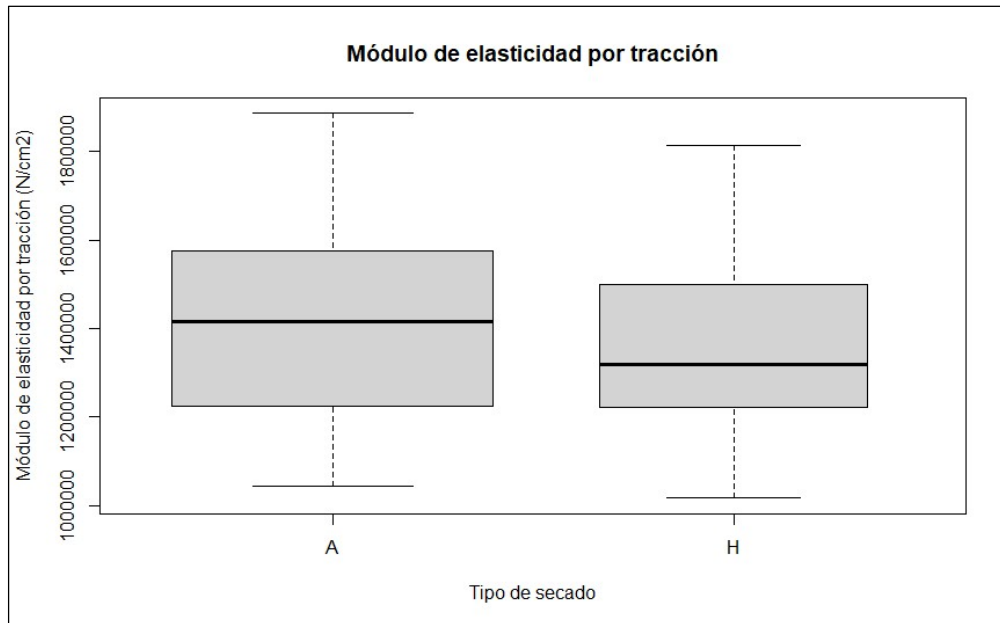
**Figura 5-11** Correlación Módulo de ruptura a flexión vs Densidad.

## 5.5. Tensión paralela

Las resistencias a la tracción paralela al grano y los módulos de elasticidad a la tracción presentaron valores similares indiferente de las variables en estudio, lo cual se comprobó con los análisis ANOVA y MANOVA, donde en ninguno de los casos se reportaron variaciones significativas. En la Figura 5-12 y Figura 5-13 se presentan los gráficos de cajas y bigotes del esfuerzo máximo a la tracción paralela y el módulo de elasticidad por tracción segregados por el tipo de secado, la cual fue la variable que mostró un mayor nivel de interferencia. Se observó que los valores medios son similares entre sí, al igual que los rangos de variación con lo que se pudo comprobar de forma gráfica lo que reportado por lo análisis numéricos realizados previamente.



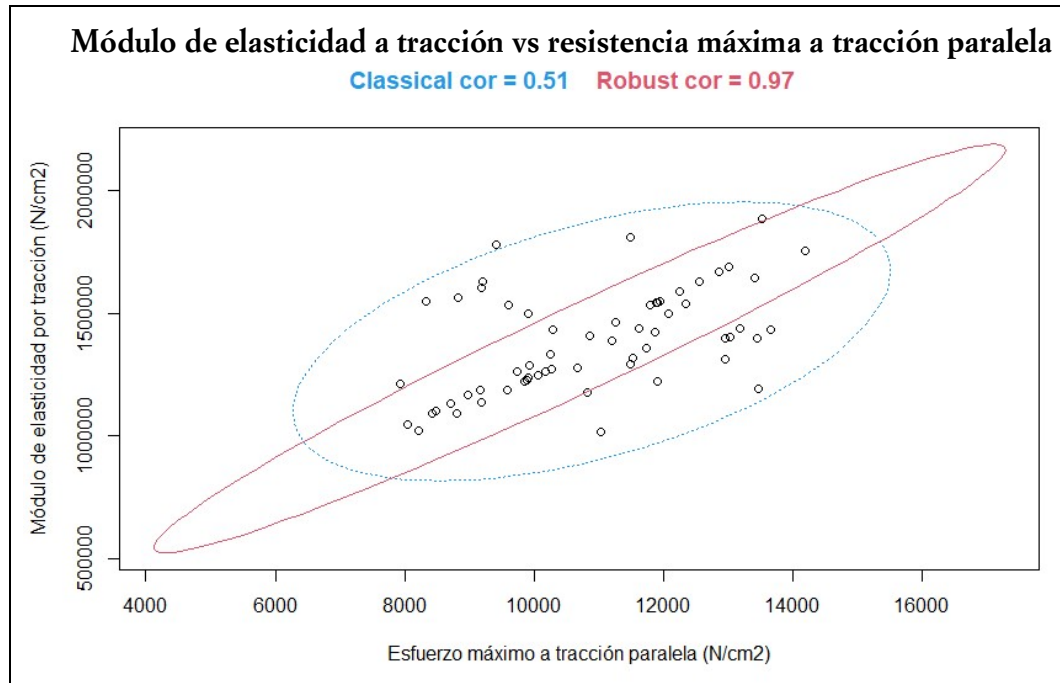
**Figura 5-12** Gráfico de cajas y bigotes de resistencia máxima a la tracción paralela según el tipo de secado.



**Figura 5-13** Gráfico de cajas y bigotes del módulo de elasticidad por tracción según el tipo de secado.

Debido a la forma irregular de las probetas ensayadas a tensión paralela, no se contó con valores de densidad para este caso, sin embargo, similar a lo realizado en el caso de compresión paralela, dado que el módulo de elasticidad a tensión fue obtenido de los mismos elementos en el mismo ensayo, se determinó la correlación existente entre este y la resistencia máxima a la tracción. En la Figura 5-14 se presenta la correlación existente entre estos parámetros. Se obtuvo que existe una correlación proporcional directa, con un coeficiente superior a 0,50, con lo cual se puede afirmar que, en caso de conocer la resistencia, por ejemplo, se puede inferir o dar una idea del valor que tendría el módulo de elasticidad a la tracción.

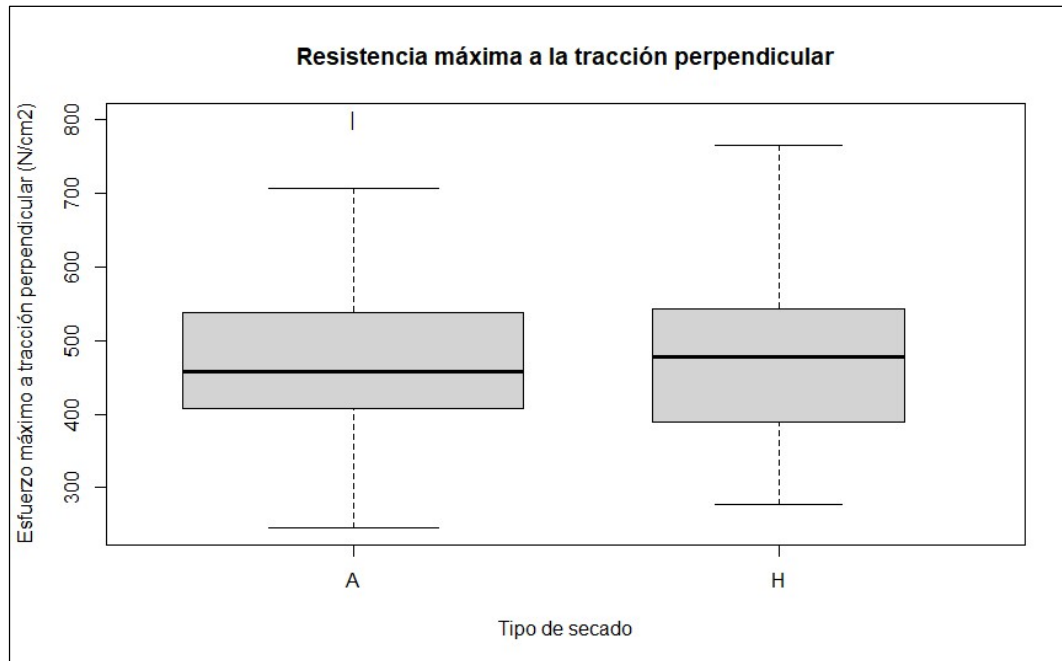




**Figura 5-14** Correlación Módulo de elasticidad a tracción vs resistencia máxima a la tensión paralela al grano.

## 5.6. Tensión perpendicular

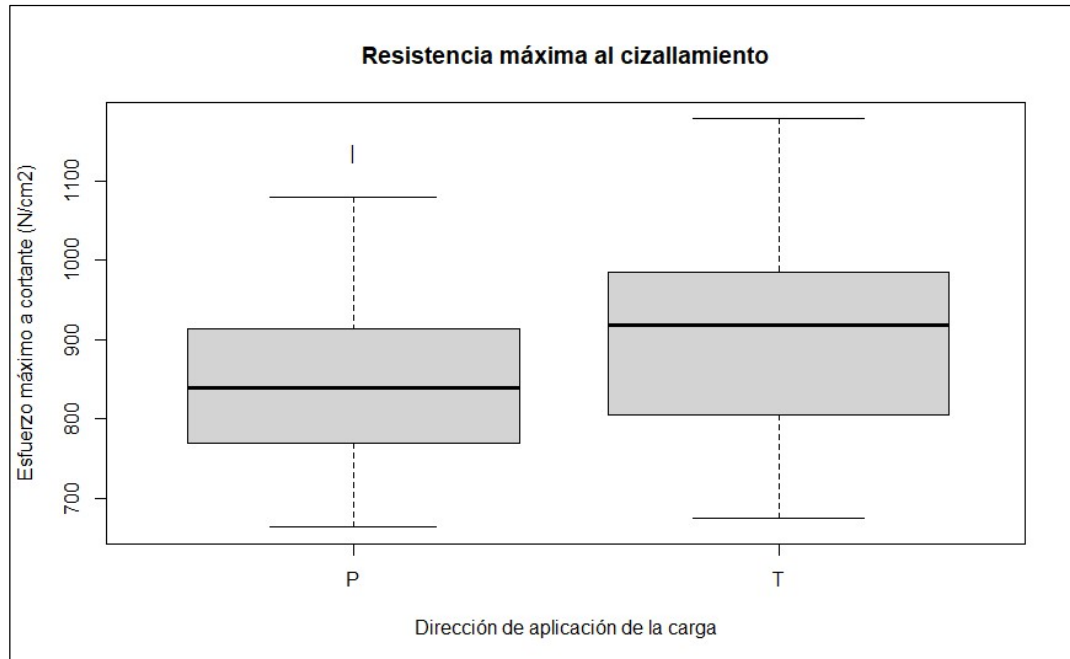
Los valores obtenidos para la resistencia máxima a la tensión perpendicular no mostraron haber sido afectados por las variables en estudio, lo cual se aprecia en la Figura 5-15, donde se presentan los valores de esfuerzos máximos a la tracción obtenidos segregados según el tipo de secado, la cual fue la variable que en los casos de compresión y flexión fue la generadora de la mayor alteración en las resistencias obtenidas. Para este caso, se observó que los valores medios son muy cercanos entre sí y los rangos para cada tipo presentaron magnitudes similares. Es de anotar que la resistencia a la tracción perpendicular reportada es del orden del 22% comparada con la obtenida para la tracción paralela al grano.



**Figura 5-15** Gráfico de cajas y bigotes de la resistencia máxima a la tensión perpendicular al grano según el tipo de secado.

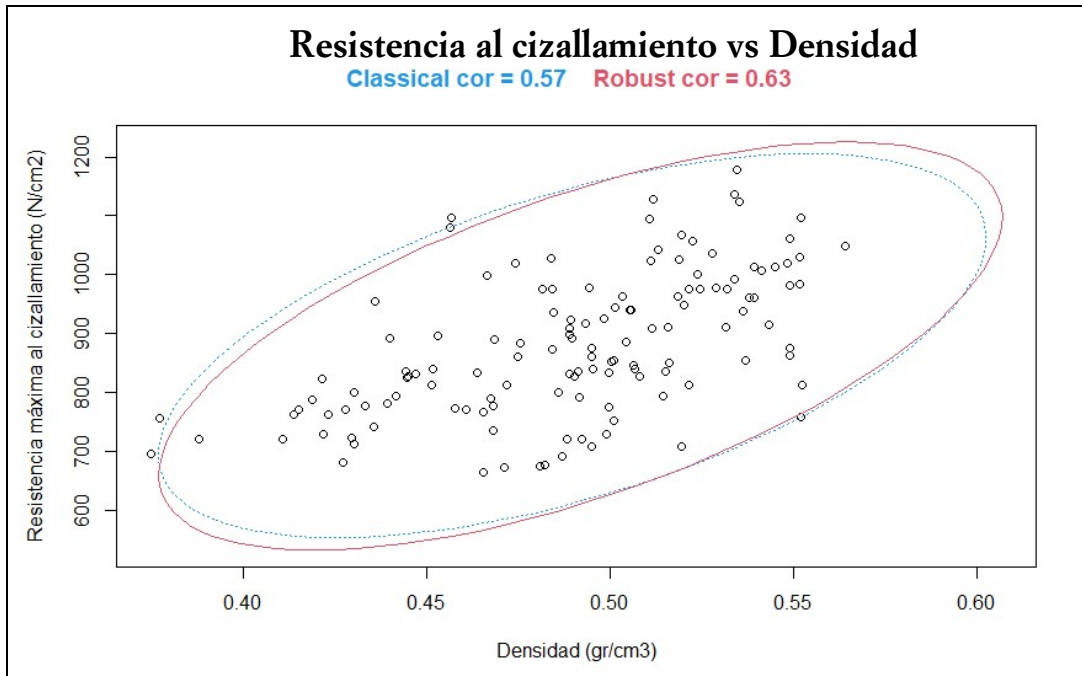
## 5.7. Cortante

Similar a lo obtenido en los ensayos a tensión, las principales variables en estudio parecieron no tener mayor influencia en el desempeño a cizallamiento paralelo al grano, sin embargo, para este caso en particular se evaluó la variable de la dirección de la carga, la cual acorde con lo reportado por los análisis de ANOVA y MANOVA si pareció generar afectación en las cargas máximas alcanzadas. En la Figura 5-16 se presenta el gráfico de cajas y bigotes del esfuerzo a cortante paralelo al grano máximo según la dirección de aplicación de la carga, en el cual se aprecia la diferenciación generada, donde las resistencias alcanzadas cuando la carga es tangencial a los anillos de crecimiento fueron mayores que las obtenidas aplicando la carga de forma perpendicular.



**Figura 5-16** Gráfico de cajas y bigotes de la resistencia máxima al corte paralelo al grano según la dirección de aplicación de la carga.

La densidad mostró también tener influencia en el desempeño a cortante, similar a lo ocurrido con compresión y flexión, en la Figura 5-17 se presenta la correlación existente entre la resistencia al cizallamiento paralelo al grano y la densidad, se apreció que existe una correlación proporcional directa, con coeficientes de correlación cercanos a 0,60, siendo similares a los obtenidos para compresión paralela. En consecuencia, no se considera dicha correlación lo suficientemente fuerte como para determinar el valor de resistencia al corte paralelo al grano con tan solo conocer la densidad, pero si puede ser una herramienta útil para la selección del material en pro de conseguir un mejor desempeño mecánico.



**Figura 5-17** Correlación Resistencia al cizallamiento paralelo al grano vs Densidad.

## 5.8. La *Acacia Mangium* Wild en la NSR-10

La NSR-10 en el apéndice G-A, brinda los coeficientes y factores para calcular los esfuerzos admisibles, adicionalmente el apéndice G-B presenta valores de esfuerzos admisibles, con un contenido de humedad del 12%, de las diferentes propiedades mecánicas, para varias especies de madera, las cuales fueron clasificadas en 6 tipos, agrupadas según el módulo de elasticidad a flexión. La clasificación está distribuida de tal forma que la categoría ES1 corresponde a las maderas con el mejor desempeño mecánico y va disminuyendo hasta llegar a la categoría ES6.

El módulo de elasticidad obtenido para la acacia fue de 11500MPa, adicionalmente, realizando la comparación de los esfuerzos admisibles obtenidos, los cuales se sintetizan en la Tabla 5-2, con los reportados para las diferentes especies, se aprecia que la acacia cuenta con resistencia similar al *Erismia Uncinatum*, comúnmente conocido como Flor Morado Muerillo, el cual está clasificado como categoría ES5.

**Tabla 5-2** Esfuerzos admisibles según NSR-10 en MPa

	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	MOE	MOR	$\sigma_{CL}$	$\sigma_{CLP}$	$\sigma_V$	$\sigma_{TL}$	$\sigma_{TT}$
Media	0,5527	11503,08	85,692	48,92	7,460	8,792	110,363	4,741
COV	8,08%	13,6%	15,6%	13,9%	19,6%	13,7%	15,2%	23,5%
F <sub>0,05</sub>	0,4792	8934,91	63,670	37,71	5,136	6,818	82,725	2,909
F <sub>i</sub>	<b>0,5527</b>	<b>11503,08</b>	<b>14,33</b>	<b>14,71</b>	<b>3,210</b>	<b>1,42</b>	<b>13,96</b>	<b>4,74</b>

Por lo anterior y teniendo en cuenta que la categoría ES5 presenta valores de módulo de elasticidad en un rango entre 11200 MPa y 17200 MPa, se puede afirmar que la madera de *Acacia Mangium* Wild proveniente del valle del Río Sinú en el departamento de Córdoba, puede ser clasificada como categoría **ES5** de la NSR-10.

De lo visto durante la elaboración de probetas, ejecución de ensayos y los valores obtenidos, se puede afirmar que la madera de *Acacia Mangium* Wild estudiada posee propiedades mecánicas adecuadas para la elaboración de elementos estructurales para edificaciones en Colombia.



## 6. Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1. Conclusiones

- La madera de *Acacia Mangium* evaluada es de buena calidad, apta para su uso en elementos estructurales en edificaciones, la cual puede ser clasificada por las propiedades mecánicas evaluadas y principalmente por el módulo de elasticidad a flexión como categoría ES5 de NSR-10
- La caracterización mecánica realizada mediante la determinación de los esfuerzos máximos, característicos y admisibles (según metodología propuesta en la NSR-10) a la flexión, tracción, compresión y cortante de la madera *Acacia Mangium* Wild, permiten apreciar que esta brinda prestaciones mecánicas iguales o superiores, comparadas con algunas de las especies comúnmente usadas en Colombia, tales como el pino pátula, pino radiata o la teca de procedencia colombiana.
- La variable “procedencia o lote” no generó afectación importante en el comportamiento mecánico obtenido, lo cual puede deberse a que las dos zonas de explotación evaluadas se encuentran relativamente cerca por lo que parámetros medio ambientales como la humedad relativa, régimen de lluvias, tipos de suelo, temperatura media, entre otros son similares entre sí.
- En la visita de campo realizada a las zonas de explotación de donde se obtuvieron los ejemplares ensayados, se apreció que ninguna de las dos plantaciones presentaba los estándares y/o prácticas típicas requeridas en proyectos de

aprovechamiento y explotación forestal consolidados, ya que el objetivo inicial de dichas plantaciones era principalmente de reforestación y recuperación de suelos.

- Los resultados para las diferentes propiedades son similares a los reportados por otros autores en estudios realizados en Colombia y Costa Rica, por lo que podría esperarse que las propiedades aquí obtenidas se mantengan o incluso mejoren a medida que las plantaciones y explotaciones forestales implementen prácticas de silvicultura orientadas al mejoramiento de los cultivos.
- Debido a la informalidad de las explotaciones, gran parte de los ejemplares marcados al momento de la visita técnica no fue recibido en la bodega en el corregimiento de Chinauta, sin embargo, por la forma en que el material fue recibido y la presencia de algunos ejemplares marcados en cada grupo, fue posible determinar la procedencia y escoger muestras aleatorias adicionales para evaluar. Esta situación obligó a descartar la ubicación de la troza en la altura del árbol como variable de estudio.
- Obtener contenidos de humedad cercanos al 12% empleando la metodología de secado al aire fue posible en una ciudad con características climatológicas como las de Bogotá. Sin embargo, requirió de un tiempo prolongado, debido a que los ejemplares ensayados luego de 3 meses de haber recibido el material presentaron contenidos de humedad superiores al 50%, mientras los evaluados al año siguiente arrojaron valores cercanos al 12%.
- Los módulos de elasticidad obtenidos por flexión, compresión paralela al grano y tracción paralela al grano son diferentes entre sí, lo cual es congruente con lo expresado por diferentes autores, y puede deberse a la ortotropía del material.
- La madera de *Acacia Mangium* Wild presentó una correlación proporcional directa entre el desempeño mecánico y la densidad, siendo incluso superior en algunos



casos a la presentada entre el módulo de elasticidad y la propiedad evaluada en el ensayo en el respectivo ensayo.

- Según la densidad la *Acacia Mangium* puede ser clasificada como moderadamente pesada. Adicionalmente, la densidad o gravedad específica mostró ser relativamente estable en los diferentes ensayos, siendo similar en casi todas las probetas independientemente de la propiedad mecánica evaluada, lo cual es esperado, ya que fueron obtenidas de las mismas piezas.
- De la evaluación realizada a las diferentes piezas de *Acacia Mangium* se apreció que se produjo agrietamiento en los extremos de las piezas, siendo críticos en zonas cercanas a la médula. Algunas de las repisas presentaron encorvadura y/o alabeo luego del secado. Este tipo de defectos, sumados al bajo desempeño mecánico reportado en los elementos que presentaron porciones de médula, conlleva a tratar con precaución el empleo de esta madera en elementos rollizos o macizos, sin embargo, debido a los buenos resultados conseguidos en las probetas libres de defectos se considera de gran potencial para la elaboración de elementos estructurales laminados.
- El comportamiento visto bajo diferentes contenidos de humedad permitió apreciar que sigue el patrón esperado en cuanto se genera una afectación en las propiedades conforme los contenidos de humedad varían, presentando por lo general un menor desempeño mecánico a medida que aumenta el porcentaje de agua presente en el material.

## 6.2. Recomendaciones

- Se recomienda estar en comunicación constante con las diferentes partes involucradas en la obtención de la madera, desde el corte el árbol hasta el ensayo de las probetas, con el fin de evitar perder información y evitar en lo posible la pérdida del material seleccionado.
- Es importante verificar y/o consultar información referente a la calibración de los hornos a emplear para realizar el secado de los elementos en la evaluación del contenido de humedad, ya que una variación excesiva de temperaturas puede llevar a mayores tiempos en la obtención de masas constantes o inducir no solo la evaporación del agua sino la quema del material orgánico.
- Es aconsejable revisar cada pieza con detenimiento antes de realizar los primeros cortes, con el fin de evaluar posibles defectos que impidan su correcto aprovechamiento. También se aconseja comenzar con la obtención de los elementos de mayores tamaños, ya que serán estos los que condicionarán el orden de los cortes a realizar.
- Se recomienda verificar en forma y tamaño que las probetas a tensión perpendicular se acoplen adecuadamente a las mordazas presentes en el laboratorio, ya que estas por requerir encajar completamente, pueden no quedar adecuadamente apoyadas en las superficies de contacto.
- Es aconsejable permitir un secado adicional de los extremos de las probetas de compresión paralela, con el fin de disminuir la probabilidad de presentar la falla en las orillas por exceso de humedad en comparación con la parte central.

- Se recomienda permitir el secado adecuado de las diferentes piezas, hasta lograr humedades de equilibrio o porcentajes de humedad cercanos al 12%, con el fin de minimizar las variaciones en la respuesta mecánica debidas al contenido de agua presente en los elementos, brindando con ello una menor influencia de los factores empíricos aplicados para realizar la corrección requerida para la estandarización de resultados.
- Se recomienda verificar el adecuado ajuste de las probetas de tensión longitudinal en las mordazas presentes en el laboratorio, pues puede ser requerido aplicar presión adicional en estas con el fin de evitar falla por corte en la cabeza de los especímenes.



## 7. Referencias

- Acuña, L., Llorente, A., & Casado, M. (2005). Estudio comparativo entre normas de ensayo para madera de *Pinus sylvestris* L. en uso resistente. *Congresos Forestales*.
- Agustín, A., Maza, M., & Historia, G. de. (2015). *El uso de la madera en el Holoceno: problemáticas y casos*.
- Alipon, M. A., Alcachupas, P. L., Bondad, E. O., & Cortiguerra, E. C. (2017). *Properties and Utilization of Acacia mangium Willd. Timber at Different Ages and Sites in Caraga Region, Philippines*. 6(2), 74–87.
- Alvárez de León, M., & García-Rubio, F. (2007). *Especies Multipropósito al servicio de la ganadería en los llanos Orientales*. 3. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=CO2019002705>
- Amat, J. (2016). ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias. *Ciencia de Datos*, 14, 1–47.
- Arbeláez Alzate, E. M., & Gómez Chica, M. A. (2011). *Caracterización de las propiedades mecánicas de vigas en madera laminada con Acacia (Acacia Mangium Willd)*.
- Chowdhury, Q., Shams, I., & Alam, M. (2005). Effects of age and height variation on physical properties of mangium (*Acacia mangium* Willd.) wood. *Australian Forestry*, 68(1), 17–19. <https://doi.org/10.1080/00049158.2005.10676221>
- Cobas, A. C., & Monteoliva, S. (2018). Modelos descriptivos de distribución de madera juvenil y madura en *Robinia pseudoacacia*. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 20(2), 287–296.
- Fernández-Golfín, J. I., Díez, M. R., Baonza, M. v, Gutiérrez, A., Hermoso, E., Conde, M., & van den Eynde, V. (2001). Caracterización de la calidad y las

- propiedades de la madera de Pino Laricio (*Pinus nigra* Arn. *Salzmannii*). *Forest Systems*, 10(2), 311–331.
- Fernández-Golfín, J. I., Díez, M. R., & Gutiérrez, A. (1997). Caracterización mecánica de la madera aserrada de pino silvestre de los Sistemas Central e Ibérico mediante probetas de tamaño estructural. *Forest Systems*, 6(1), 183–213.
- H., K., M.H., K., & M., K. (2011). *Acacia mangium* Willd.: Ecology, silviculture and productivity. *Acacia Mangium Willd.: Ecology, Silviculture and Productivity*. <https://doi.org/10.17528/cifor/003392>
- ICONTEC. (1973). *NTC 663 Maderas. Determinación de la resistencia a la flexión.*
- NTC 290 Determinación del peso específico aparente, (1974).
- ICONTEC. (1974a). *NTC 775 Maderas. Determinación de la resistencia al cizallamiento paralelo al grano.*
- ICONTEC. (1974b). *NTC 784 Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión axial o paralela al grano.*
- ICONTEC. (1974c). *NTC 785 Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano.*
- ICONTEC. (1975a). *NTC 944 Maderas. Determinación de la tracción paralela al grano.*
- ICONTEC. (1975b). *NTC 961 Maderas. Determinación de la tracción perpendicular al grano.*
- ICONTEC. (1992). *NTC 3377 Maderas. Ensayos con probetas pequeñas.*
- ICONTEC. (2005). *NTC 206-1 Determinación del contenido de humedad para ensayos físicos y mecánicos.*
- ICONTEC. (2007). *NTC 301 Requisitos de las probetas pequeñas para los ensayos físicos y mecánicos de la madera.*
- IGAC. (2016). *Tierralta, uno de los municipios de Córdoba en los que renacerá la paz.* Diccionario Geográfico de Colombia. <https://www.igac.gov.co/es/noticias/tierralta-uno-de-los-municipios-de-cordoba-en-los-que-renacera-la-paz>

- Makino, K., Ishiguri, F., Wahyudi, I., Takashima, Y., Iizuka, K., Yokota, S., & Yoshizawa, N. (2012). Wood properties of young acacia mangium trees planted in Indonesia. *Forest Products Journal*, 62(2), 102–106. <https://doi.org/10.13073/0015-7473-62.2.102>
- Manova, I. (2006). *Análisis multivariado de varianza y covarianza*.
- Moya, L., Cardoso, A., & Cagno, M. (2015). Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 17(3), 597–612.
- Moya Roque, R., Muñoz, F., Salas Garita, C., Berrocal Jiménez, A., Leandro Zúñiga, L., & Esquivel Segura, E. (2010). Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. En *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* (Vol. 7, Issue 18).
- Reforestadora Cacerí S.A. (2011). *ACACIA MANGIUM*. 5.
- Reyes M., G., Carmona G., S. L., & Fernández, M. E. (2018). Aspectos fisiológicos y de aprovechamiento de *Acacia mangium* Willd. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(1), 244–253. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7340>
- Rindarto, B. N., Hidayati, F., Sunarti, S., & Nirsatmanto, A. (2021). Physical and mechanical properties of the three breeding generations of *Acacia mangium* planted in Central Java, Indonesia. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 18(2), 83–88. <https://doi.org/10.1007/s13196-021-00283-3>
- Rokeya, U. K., Hossain, M. A., Ali, M. R., & Paul, S. P. (2010). Physical and mechanical properties of (*Acacia auriculiformis* x *A mangium*) hybrid *Acacia*. *Journal of Bangladesh Academy of Sciences*, 34(2), 181–187.
- Shanavas, a, & Kumar, B. (2006). Physical and mechanical properties of three agroforestry tree species from Kerala, India. *J Trop Agric*, 44, 23–30. <http://jtropag.in/index.php/ojs/article/viewArticle/164>
- Su, H., & Berenson, M. (2017). Comparing tests of homoscedasticity in simple linear regression. *JSM Mathematics and Statistics*, 4(1), 10–17.

- van Duong, D., Schimleck, L., & Lam Tran, D. (2022). Variation in Wood Density and Mechanical Properties of *Acacia mangium* Provenances Planted in Vietnam. *Journal of Sustainable Forestry*, 00(00), 1–15. <https://doi.org/10.1080/10549811.2022.2045507>
- Vargas Rojas, L. N. (2020). *ENSAYO DE ASERRIO CON MADERA DE ACACIA MANGIUM WILD. PROCEDENTE DE LA ORINOQUIA COLOMBIANA*. UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- Vargas Sánchez, J. J., Muñoz Mercado, J. J., Paba Luna, N. A., & Ordoñez Castro, N. (2020). Aplicación de la técnica multivariada Manova a dos variables de control provenientes de tres modelos de simulación estocásticos de un proceso productivo. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(28), 66–75. <https://doi.org/10.31908/19098367.2056>
- Viet, D. D., Ma, T., Inagaki, T., Kim, N. T., Chi, N. Q., & Tsuchikawa, S. (2020). Physical and mechanical properties of fast growing polyploid acacia hybrids (*A. auriculiformis* x *A. mangium*) from Vietnam. *Forests*, 11(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/F11070717>
- Weather Atlas. (2019a). *Previsión meteorológica a largo plazo Chinauta*. <https://www.weather-col.com/es/colombia/chinauta-pronostico-del-tiempo-extendido>
- Weather Atlas. (2019b). *Previsión meteorológica y clima mensual Bogotá, Colombia*. <https://www.weather-col.com/es/colombia/bogota-clima>
- Yang, K., Tu, J., & Chen, T. (2019). Homoscedasticity: An overlooked critical assumption for linear regression. *General Psychiatry*, 32(5), 1–5. <https://doi.org/10.1136/gpsych-2019-100148>