



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS  
DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA  
EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA**

**Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra, de madera  
de *Pinus greggii* Engelm, de una plantación experimental de Arteaga,  
Coahuila.**

Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias  
y Tecnología de la Madera

PRESENTA:

**Ing. Wendy Lizeth Mendoza Salas**

Director: Dr. Gildardo Cruz de León

Morelia, Michoacán, México, diciembre de 2025.

# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

## DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

### MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA

**Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra de madera de *Pinus greggii* Engelm, de una plantación experimental de Arteaga, Coahuila.**

PRESENTA:

Ing. Wendy Lizeth Mendoza Salas

MESA SINODAL PARA ESTA TESIS:

---

Dr. Gildardo Cruz de León

---

Dr. Genaro Esteban García Mosqueda

---

Dr. Nancy Eloisa Rodríguez Olalde

---

Dr. José Cruz de León

---

M.C. Isaac Alfaro Trujillo

Morelia, Michoacán, México, diciembre de 2025.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Gloria Irma Salas Delgado y Jorge Isidro Mendoza Meléndez, por su apoyo y sus consejos durante estos años, con infinito amor y agradecimiento para ustedes.

A mis hermanas Gloria Jazmin y Belen Melissa, por siempre estar ahí y alentarme hasta la culminación de mis estudios.

A mis compañeros de generación: Dana Limón, Jesús Méndez, Lucero Zúñiga, Britsania Flores y Luis Resendiz por formar parte de esta nueva etapa.

A Sergio Hernández por su paciencia, apoyo y motivación.

A mis maestros de la maestría, que con su experiencia, esfuerzo y dedicación contribuyeron a mi formación, para poder culminar mis estudios con éxito.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Gildardo Cruz de León por la dirección de este trabajo, además de su paciencia para poder concluir con el mismo.

Al Dr. Genaro Esteban García Mosqueda por contribuir en la investigación con sus conocimientos, como parte de la mesa sinodal, además de coordinar el proceso de colecta de material en campo.

Al M.C. Isaac Alfaro Trujillo por su colaboración como parte de la mesa sinodal, asó como en la coordinación de la elaboración de las probetas y en la asesoría para la realización de las pruebas mecánicas.

A la Dra. Nancy Eloisa Rodríguez Olalde y al Dr. José Cruz de León, que como parte de la mesa sinodal, apoyaron mediante importantes observaciones que contribuyeron a la mejora sustancial de este trabajo.

Al Ing. Adalid Rincón López por su apoyo en el acondicionamiento (troceo, secado y seccionado) del material en el laboratorio de física y mecánica de la madera.

Al Dr. Heladio Heriberto Cornejo Oviedo por la facilidad brindada para acceder al Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga.

A la Lic. Belen Melissa Mendoza Salas por la creación digital de las ilustraciones sobre trozas de madera utilizadas en este trabajo.

Al Ing. Sergio Hernández Larios por su ayuda en el procesamiento de datos.

A los estudiantes de la carrera de Ingeniería Forestal de la UAAAN María Paredes, Gabriel Sánchez y al personal de la UAAAN José Sosa por su apoyo en el derribo y troceado en campo, además del descortezado de los árboles derribados.

A los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la UMSNH, Unidad Ciudad Hidalgo Michoacán, Fernanda Pérez, Joel Sánchez, Emma Martínez y Azucena Antonio, por su apoyo para el procesamiento de las muestras en la maquina universal.

# Tabla de contenido

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| RESUMEN.....                                                           | 1  |
| SUMMARY .....                                                          | 2  |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....                                         | 3  |
| CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....                                          | 6  |
| 3.1. Planteamiento del problema .....                                  | 9  |
| 3.2. Justificación.....                                                | 10 |
| 3.3. Objetivos.....                                                    | 11 |
| 3.4. Hipótesis.....                                                    | 12 |
| CAPÍTULO 4. TEORÍA BÁSICA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES ..... | 13 |
| 4.1. Mecánica de materiales.....                                       | 13 |
| 4.2. Esfuerzo.....                                                     | 13 |
| 4.3. Deformación de los materiales bajo cargas.....                    | 14 |
| 4.4. Diagramas de esfuerzo-deformación.....                            | 17 |
| CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS .....                                 | 19 |
| 5.1. Descripción de las áreas de estudio.....                          | 19 |
| 5.2. Fisiografía.....                                                  | 20 |
| 5.3. Hidrología .....                                                  | 20 |
| 5.4. Suelo.....                                                        | 20 |
| 5.5. Clima.....                                                        | 20 |
| 5.6. Vegetación.....                                                   | 21 |
| 5.7. Características de la plantación.....                             | 21 |
| 5.8. Generalidades de la especie .....                                 | 21 |
| 5.9. Importancia económica de la especie .....                         | 22 |
| 5.10. Área de colecta de la muestra de trozas.....                     | 22 |
| 5.11. Selección de los árboles.....                                    | 23 |
| 5.12. Derribo y troceo .....                                           | 24 |
| 5.13. Traslado .....                                                   | 25 |

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.14. Acondicionamiento de material para el trabajo de laboratorio .....                       | 26        |
| 5.15. Máquina Universal para las pruebas mecánicas .....                                       | 30        |
| 5.16. Selección de Probetas .....                                                              | 32        |
| 5.17. Pruebas de compresión .....                                                              | 35        |
| 5.18. Pruebas de flexión .....                                                                 | 36        |
| 5.19. Diseño experimental .....                                                                | 39        |
| 5.20. Determinación de contenido de humedad .....                                              | 40        |
| 5.21. Determinación de densidad normal y densidad básica .....                                 | 41        |
| 5.22. Determinación de otras propiedades físicas .....                                         | 42        |
| 5.23. Determinación del MOR y MOE .....                                                        | 42        |
| <b>CAPÍTULO 6. RESULTADOS .....</b>                                                            | <b>44</b> |
| 6.1. Resultados de carga máxima en pruebas de compresión .....                                 | 44        |
| 6.2. Resultados de resistencia máxima a la compresión .....                                    | 45        |
| 6.3. Resultados obtenidos para densidad normal y densidad básica .....                         | 47        |
| 6.4. Resultados obtenidos para el MOR y MOE. ....                                              | 49        |
| 6.5. Resumen de resultados. ....                                                               | 52        |
| <b>CAPÍTULO 7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....</b>                               | <b>53</b> |
| 7.1. Análisis de varianza para la resistencia a la compresión, como función de la altura. .... | 53        |
| 7.2. Análisis de varianza para la densidad normal .....                                        | 54        |
| 7.3. Comparaciones múltiples para la densidad normal .....                                     | 55        |
| 7.4. Análisis de varianza para la densidad básica .....                                        | 56        |
| 7.5. Análisis de varianza para el MOR .....                                                    | 57        |
| 7.6. Análisis de varianza para el MOE .....                                                    | 57        |
| 7.7. Comparaciones múltiples para el MOE .....                                                 | 58        |
| <b>CAPÍTULO 8. DISCUSIÓN .....</b>                                                             | <b>60</b> |
| 8.1 Usos potenciales de la madera de <i>Pinus greggii</i> .....                                | 60        |
| 8.2 Densidad básica y resistencia a la compresión .....                                        | 63        |
| 8.3 Densidad y resistencia a la compresión para la madera de <i>Pinus greggii</i> .....        | 64        |
| <b>CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES .....</b>                                                          | <b>66</b> |
| <b>APÉNDICE A. MEDICIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD. ....</b>                                      | <b>69</b> |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Contenido de humedad.....                                                                  | 69 |
| APÉNDICE B. PROBLEMÁTICA EN ENSAYOS DE FLEXIÓN.....                                        | 71 |
| APÉNDICE C. OTRAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE <i>Pinus greggii</i><br>Engelm. .... | 73 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Normas ISO para Ensayos mecánicos .....                                                            | 32 |
| Tabla 2. Selección de probetas de compresión por altura .....                                               | 33 |
| Tabla 3. Selección de probetas de flexión por altura .....                                                  | 34 |
| Tabla 4. Resultados de carga máxima en Newtons .....                                                        | 44 |
| Tabla 5. Resistencia máxima a la compresión en MPa .....                                                    | 45 |
| Tabla 6. Densidad normal para cada probeta de las tres alturas .....                                        | 47 |
| Tabla 7. Densidad básica para cada probeta de las tres diferentes alturas .....                             | 48 |
| Tabla 8. Resultados obtenidos en este trabajo para MOR .....                                                | 49 |
| Tabla 9. Resultados obtenidos en este trabajo para MOE .....                                                | 51 |
| Tabla 10. Contenido de humedad, densidad normal, densidad básica, módulos de<br>elasticidad y ruptura. .... | 52 |
| Tabla 11. Análisis de varianza para la resistencia a la compresión .....                                    | 53 |
| Tabla 12. Análisis de varianza de la densidad normal en función de la altura .....                          | 54 |
| Tabla 13. Prueba de Tukey para densidad normal.....                                                         | 55 |
| Tabla 14. Prueba de Fisher para densidad normal .....                                                       | 56 |
| Tabla 15. Análisis de varianza para densidad básica en función de la altura.....                            | 56 |
| Tabla 16. Análisis de varianza para el módulo de ruptura en función de la altura .....                      | 57 |
| Tabla 17. Análisis de varianza para el módulo de elasticidad en función de la altura.....                   | 57 |
| Tabla 18. Prueba de Tukey para MOE .....                                                                    | 58 |
| Tabla 19. Prueba de Fisher para MOE.....                                                                    | 59 |
| Tabla 20. Usos de la madera de las tres especies de pino de la tabla 7, .....                               | 62 |
| Tabla 21. Densidad básica y módulo de ruptura paralela para la madera de tres especies<br>de pino .....     | 63 |
| Tabla 22. Densidad básica y compresión paralela para madera de <i>Pinus greggii</i> .....                   | 65 |
| Tabla 23. Cuadro del contenido de humedad obtenido para cada una de las alturas<br>evaluadas .....          | 69 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Gráfico descriptivo de diagramas de esfuerzo-deformación (Acevedo, 2019).....               | 16 |
| Figura 2. Mapa del área de estudio .....                                                              | 19 |
| Figura 3. Mapa de localización de los individuos muestreados .....                                    | 23 |
| Figura 4. Señalización de los árboles seleccionados.....                                              | 24 |
| Figura 5. Derribo direccionado de los árboles      Figura 6. Seccionado de los árboles .....          | 25 |
| Figura 7. Sellado de las testas de las trozas                      Figura 8. Trozas en la UMSNH ..... | 25 |
| Figura 9. Sierra cinta MECAMICH .....                                                                 | 26 |
| Figura 10. Estufa de secado Hildebrand.....                                                           | 27 |
| Figura 11. Cepillo .....                                                                              | 28 |
| Figura 12. Canteadora SILVERLINE .....                                                                | 28 |
| Figura 13. Sierra circular SILVERLINE .....                                                           | 29 |
| Figura 14. Cepillo DeWalt .....                                                                       | 29 |
| Figura 15. Ingleteadora DeWalt.....                                                                   | 30 |
| Figura 16. Máquina Universal UTM 300kN.....                                                           | 31 |
| Figura 17 probetas de compresión      Figura 18 Probetas de flexión.....                              | 34 |
| Figura 20. Compresión paralela a la fibra .....                                                       | 35 |
| Figura 19. Pruebas de compresión.....                                                                 | 35 |
| Figura 21. gráfica esfuerzo-deformación de la compresión.....                                         | 36 |
| Figura 22. Pruebas de flexión.....                                                                    | 37 |
| Figura 23. Flexión estática .....                                                                     | 37 |
| Figura 24. grafica de esfuerzo-deformación de flexión .....                                           | 38 |
| Figura 25. Grafica de la zona lineal de una probeta de compresión .....                               | 51 |
| Figura 26. Gráfica de esfuerzo-deformación de flexión .....                                           | 71 |



# RESUMEN

En este trabajo, se determinó la resistencia mecánica a la compresión, paralela a la fibra, de madera de *Pinus greggii* Engelm, como función de la altura. La madera proviene de una plantación experimental, de 32 años de edad, ubicada en Arteaga, Coahuila, México. Se seleccionaron aleatoriamente cinco árboles, de los cuales se extrajeron trozas, de 0.7 m de longitud, en tres alturas sucesivas del fuste, a partir del tocón. Las probetas se prepararon siguiendo normas ISO para asegurar uniformidad en dimensiones, contenido de humedad, densidad y condiciones de ensayo. Las pruebas se realizaron en una Máquina Universal de Ensayos, CONTROLS HM-S 300 KN. Se determinó la resistencia máxima a la compresión, el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE), respectivos. El análisis de resultados muestra que no existe variación estadísticamente significativa en la resistencia a compresión como función de la altura del fuste, para las alturas consideradas, lo que indica una uniformidad en dicha propiedad. También se determinaron las densidades normal y básica, para las alturas en cuestión, Los valores obtenidos para la densidad, corresponden a una madera de densidad media, lo que concuerda con lo reportado en la literatura. Las pruebas de flexión no fueron concluyentes, ya que los resultados que arroja la máquina universal son muy irregulares, lo que no fue posible resolver en el transcurso de este trabajo. Se concluye que la madera de *Pinus greggii* estudiada, presenta valores altos de compresión paralela a la fibra, lo que podría permitir su uso en elementos estructurales sometidos a compresión axial, lo cual no estaba reportado en la literatura. Las magnitudes reportadas para dicha especie, de otras zonas del país, son considerablemente menores, por lo que se sugería su uso solo para estructuras ligeras. Lo anterior, abre la puerta a investigaciones adicionales que amplíen su clasificación estructural.

**Palabras clave:** *Pinus greggii*, resistencia mecánica, densidad.

## SUMMARY

In this work, the mechanical resistance on parallel-to-grain compression, as function of height, for wood of *Pinus greggii* Engelm, was determined. The wood was selected from a 32-year-old experimental plantation located at Arteaga, Coahuila, México. Five trees were randomly selected, and logs, 0.7 m long, were taken at three successive heights along the stem, from the tree stump. Mechanical tests were conducted using a Universal Testing Machine CONTROLS HM-S 300 KN. The maximum compressive strength, modulus of rupture (MOR), and, modulus of elasticity (MOE), were respectively obtained. The analysis of results, show that there is no significant statistical difference in compressive strength as function of stem height for the considered heights, what means that such property is uniform. Furthermore, the normal and basic densities for the same heights were obtained. The found density values correspond to a medium wood density, in agreement to those reported in the literature. Bending tests could not be validated because of very irregular results showed by the universal machine which could not be solved through this study. As conclusion, the studied *Pinus greggii* wood shows high parallel-to-grain compression values what imply its use as structural elements not reported before. The reported parallel-to-grain compression values for this species, from other zones of the country, are considerably lower, and its use was suggested for light structural use, only. The results of this work, encourages further research to complete its structural classification.

**Keywords:** *Pinus greggii*, mechanical strength, density.

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La madera es un material ampliamente utilizado por el ser humano. Se utiliza en la industria de la construcción; en la fabricación de muebles; en la elaboración de tableros, tarimas y duelas; como combustible en forma de leña y carbón; en forma procesada, como pulpa, para la fabricación de cartón y papel, entre otros. Lo anterior, implica una extensiva explotación de los bosques naturales.

Aunque se considera a la madera como un material, las condiciones de crecimiento pueden afectar la madera afectando también otras de sus propiedades; además, puede presentar variaciones dependiendo de si proviene de plantaciones comerciales o bosques naturales (Rocha, 2019, Castro y Fragnelli, 2006). Otro factor determinante de dichas diferencias es la zona de crecimiento (López-Locía y Valencia-Manzo, 2001). También, los tratamientos silvícolas como el espaciamiento entre individuos y podas programadas ayudan a mejorar la cantidad y calidad de la madera obtenida (Moya y Arce, 2003). Otros factores provienen de las condiciones de crecimiento o el entorno, como son: el clima, el tipo de suelo, la competencia con otros especímenes, la topografía, etc. (Davel et al. 2005).

En algunas regiones del mundo existe un desabasto de madera, por lo que se han tenido que buscar alternativas para poder seguir utilizándola como materia prima. Entre estas soluciones, destacan las plantaciones forestales comerciales (PFC) las cuales ofrecen la posibilidad de abastecer a las industrias con madera de calidad permitiendo la conservación y desarrollo de los bosques nativos, lo que reduce la presión que se ejerce sobre los mismos, debido a su sobre explotación (Pandey y Brown, 2002).

México se ubica en el cuarto lugar entre los 17 países denominados mega-diversos, que conjuntamente albergan cerca del 70% de las especies conocidas

de la Tierra. La conservación de la biodiversidad, en particular, de los bosques, es un fenómeno que se requiere atender de manera prioritaria (Gobierno de la República, 2014). El rápido crecimiento poblacional del país ha generado una creciente demanda de productos forestales para cubrir las necesidades requeridas por el sector forestal industrial. En el país se consumen 27.167 millones de m<sup>3</sup> de madera por año (Dávalos-Sotelo, 2022).

Para competir con las grandes industrias madereras, los recursos forestales de México deben ser de buena calidad, duraderos y de costo competitivo. Para lograr que tengan estas características y aprovechar los recursos de manera razonable, se deben implementar técnicas adecuadas y así lograr una buena calidad del producto. También se puede obtener o mantener una base genética amplia para asegurar ganancias genéticas en el futuro, así como fuentes de recuperación (Alba-Landa *et al.* 2005). Lo anterior, se pretende lograr a través de la implementación y buen manejo de plantaciones forestales. El establecimiento de estas plantaciones es una alternativa para recuperar terrenos degradados, disminuir las tasas de erosión y asegurar el abastecimiento a la industria (Muñoz *et al.*, 2011).

Una plantación forestal comercial consiste en el cultivo de especies forestales establecidas en terrenos preferentemente forestales, con propósitos mercantiles. Esto es regulado por la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2018), que tiene por objeto fomentar la conservación, protección, restauración, producción, ordenación, cultivo, manejo y aprovechamiento de los ecosistemas forestales del país y sus recursos.

En México, se ha procurado crear programas de plantaciones forestales comerciales que ayuden a incrementar la productividad forestal en regiones prioritarias, seleccionando las regiones de acuerdo a las necesidades de cada especie para obtener aprovechamientos sustentables en el menor tiempo posible (Musálem, 2006; Aguirre, 2015).

En diversos países se ha introducido la especie de *Pinus greggii* para producción de madera o restauración ambiental. Se considera ideal para la silvicultura en zonas no tropicales donde la escasez de precipitaciones y el frío serían factores limitantes para el buen crecimiento de *Pinus greggii* (Dvorak et al., 1996; 2000).

En México, se han establecido algunas plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. En particular, el interés del presente trabajo se concentra en una plantación del estado de Coahuila. En este estado, se realizan aprovechamientos mayormente no maderables; los aprovechamientos maderables son de 3 505 m<sup>3</sup> de madera de coníferas (INEGI, 1995)

Algunas de las propiedades que se requiere conocer para determinar los usos potenciales de una especie particular de madera, son las propiedades mecánicas. La determinación formal de dichas propiedades, de acuerdo a una norma estándar, para madera de la especie previamente mencionada, será el objetivo principal de esta tesis, según se expone a continuación.

## CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

*Pinus greggii* Engelm es una especie forestal nativa de México, que se distribuye en pequeños rodales a lo largo de la Sierra Madre Oriental (Martínez, 1948). Es una especie endémica de México con gran importancia ecológica y económica. Este pino se distribuye en poblaciones aisladas a lo largo de la Sierra Madre Oriental, en zonas semiáridas y a veces semi-tropicales. Actualmente se reconocen dos variedades taxonómicas, *P. greggii* var. *greggii*, que habita la porción norte del área de distribución de la especie, y *P. greggii* var. *australis* en el sur (Donahue y López-Upton, 1996), sin traslapes entre ellas (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005).

*Pinus greggii* es una especie arbórea de valor económico para las poblaciones humanas que habitan en zonas aledañas a los bosques, se aprovecha para la obtención de madera para la industria del aserrío, y localmente en la obtención de postes para cerca y leña combustible. Además, *P. greggii* ha mostrado altas tasas de crecimiento en altura y diámetro en ensayos de plantaciones (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005).

En el caso de plantaciones comerciales de *Pinus greggii*, también se han observado altas tasas de crecimiento en diámetro y altura (Azamar *et al.*, 2000). Además, esta especie tiene la capacidad para adaptarse a terrenos degradados (Vázquez, 2018) y posee potencial para utilizarse en programas de mejoramiento genético por su rápido crecimiento y abundante producción de semillas a temprana edad (Vela, 2002).

Para determinar diferentes usos específicos de una especie de madera, es necesario conocer las propiedades mecánicas de la misma y las condiciones bajo las cuales estarán sometidos los elementos de este material. Las propiedades

mecánicas ayudan a definir la capacidad de un material para resistir cargas externas; el estudio de estas características ayuda a definir si la madera es adecuada para usos de interés particular (Roussy et al, 2013).

En los estudios de propiedades mecánicas de una especie con diferentes procedencias se trata de comparar entre procedencias para notar la similitud o diferencia en los parámetros evaluados (Campos, 1989). Sigala et al., (2023) afirma que las propiedades físico-mecánicas la madera de *P. greggii* var. *australis* proveniente de plantaciones son diferentes a las de la misma madera obtenida de rodales naturales.

Debido a las grandes demandas de madera se requiere conocimiento de la calidad de la materia prima para obtención de productos de calidad, esto se puede lograr a través del estudio de las propiedades de la madera, tanto químicas, físicas y mecánicas (Ariete, 2010).

Las propiedades mecánicas que se consideran en este trabajo son las de la resistencia mecánica en compresión paralela a la fibra y en flexión estática perpendicular a la fibra. Las pruebas correspondientes se describen a continuación:

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

*II) Prueba de resistencia mecánica en flexión estática perpendicular a la fibra.* Es la prueba que se realiza para determinar el límite de resistencia a esfuerzos de flexión de un material. Para llevar a cabo este tipo de ensayos, se deben utilizar probetas en forma de prisma rectangular y aplicando una carga en la parte central

de dicha probeta, aumentándola gradualmente hasta producir una rotura o hasta que sea imposible la aplicación de mayores esfuerzos (Drozdov y Nikulin, 1983).



## CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

### 3.1. Planteamiento del problema

A escala global, considerables áreas de bosques han sido deforestados para satisfacer la necesidad humana del uso de madera. Algunos países han propuesto como alternativa para solucionar dicho problema, el establecimiento y explotación de plantaciones forestales.

En particular, en el estado de Coahuila, México, el problema es más agudo, ya que es un estado mayoritariamente árido, con bosques escasos y la sobre-explotación de los mismos podría causar un daño ecológico grave. Se podría plantear como solución local, establecer plantaciones forestales de especies nativas. Una de estas especies es la de *Pinus greggii* que, incluso, actualmente está vedado su aprovechamiento. Literatura presentada en el capítulo previo, menciona que es una especie con buenas posibilidades de desarrollo en condiciones poco favorables.

Ya existe una plantación forestal experimental de *Pinus greggii* de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Coahuila; sin embargo, hace falta el estudio de diferentes propiedades de la madera obtenida de la misma, para considerar sus diversos usos potenciales. Entre ellas, están las propiedades mecánicas. Hasta donde se tiene conocimiento, no existen en el país, estudios sobre propiedades mecánicas para esta especie, proveniente de plantaciones.

El problema particular para el presente trabajo, es que no se han determinado formalmente las propiedades mecánicas de la madera obtenida de la plantación mencionada. Una vez que se determinen dichas propiedades, se pueden identificar diferentes usos para la madera de la especie en cuestión, en los cuales, su resistencia mecánica sea un factor preponderante para que satisfaga

requerimientos de seguridad predefinidos. Por otro lado, la determinación de las propiedades mecánicas para diferentes alturas del fuste de árbol, proporcionaría información sobre la uniformidad de las mismas, lo cual está directamente relacionado con la homogeneidad de la madera y, simultáneamente, proporcionaría información sobre la calidad de la misma.

La literatura afirma que la primera troza del fuste del árbol, a partir del tocón, es la que contiene la madera de mejor calidad (Bruce, 1982). Para el presente trabajo, se determinarán las propiedades mecánicas como función de la altura, considerando tres secciones longitudinales sucesivas, a partir del tocón, cuyas longitudes se seleccionaron de tal forma que las probetas obtenidas de dichas secciones, cumplan con la longitud que exige la norma elegida.

### **3.2. Justificación**

Las plantaciones forestales son una alternativa para el abastecimiento de madera en la industria, de esta forma, se puede contribuir a aminorar la deforestación de los bosques, lo que implica una grave alteración del ecosistema, que también afecta la existencia y desarrollo de otras especies animales y vegetales.

Lo anterior, es aún más relevante en la explotación de los escasos bosques de zonas áridas y semiáridas, como es el caso del estado de Coahuila, con la especie de *Pinus greggii* Engelm cuya explotación, como se mencionó previamente, no está actualmente permitida, incluso para trabajos de investigación. En el presente trabajo, se ha utilizado madera obtenida de una plantación experimental y se ha enfocado el estudio en la determinación de las propiedades mecánicas de dicha madera.

El estudio sobre las propiedades mecánicas de las plantaciones establecidas es esencial para optimizar su aprovechamiento y garantizar su uso sustentable en la industria maderera, además nos brinda la posibilidad de conocer la calidad de la madera y facilita su clasificación adecuada para los diferentes fines y usos para

así maximizar su valor comercial asegurando su durabilidad. El determinar los usos potenciales para dicha madera, también puede motivar el establecimiento de más plantaciones de esta especie, y en particular, plantaciones comerciales rentables en su aprovechamiento.

El desarrollo de esta investigación puede contribuir al conocimiento para mejorar la calidad de los productos maderables, ayudar a satisfacer la demanda del mercado y promover prácticas de manejo forestal sostenible, para la especie en estudio. Estos conocimientos son claves para el desarrollo y fortalecimiento de la industria forestal en México.

### **3.3. Objetivos**

#### **Objetivo general**

Determinar y comparar las diferencias en la resistencia mecánica a la compresión y flexión de madera de *Pinus greggii* Engelm, de la plantación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, del estado de Coahuila, para tres alturas sucesivas en el fuste, a partir del tocón.

#### **Objetivos específicos**

- 1) Determinar la resistencia mecánica a la compresión de la madera de *Pinus greggii* Engelm de la plantación en cuestión, para las tres alturas consideradas.
- 2) Determinar la resistencia mecánica a la flexión de la madera de *Pinus greggii* Engelm de la plantación en cuestión, para las tres alturas consideradas.
- 3) Comparar las propiedades mecánicas obtenidas en 1) y 2),

### **3.4. Hipótesis**

La resistencia mecánica a la compresión y flexión, de la madera de *Pinus greggii* Engelm, varía con la altura a la que fue obtenida en el fuste (es función de la altura).

# CAPÍTULO 4. TEORÍA BÁSICA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES

## 4.1. Mecánica de materiales

La mecánica de materiales, también conocida como resistencia de materiales, es una rama de la ingeniería que estudia el comportamiento de los cuerpos sólidos sometidos a diversas cargas, su objetivo principal es el análisis de las fuerzas externas en los materiales determinando esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en las estructuras y sus componentes (Gere y Goodno, 2016).

La mecánica de materiales ayuda al análisis y diseño de las estructuras portadoras de carga, esto involucra la determinación de esfuerzos y deformaciones de los materiales. Al disponer de los valores de la estática y al determinar las fuerzas en los elementos de una estructura, se conoce el esfuerzo (Beer et al, 2009).

Fitzgerald (2015) enfatiza que esta rama proporciona los principios del diseño en sistemas estructurales, las fuerzas exteriores aplicadas a los cuerpos, los esfuerzos internos resultantes y las deformaciones, son esenciales para el diseño y el análisis de las estructuras y sus componentes.

## 4.2. Esfuerzo

De acuerdo a la mecánica de materiales, el esfuerzo se define como una magnitud física que describe la intensidad de una fuerza interna que actúa sobre un área específica de un material o estructura (Rivera, 2023).

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo,  $F$  es la fuerza aplicada y la  $A$  es el área de la sección transversal del material.

Thomas Young (1807) describe al esfuerzo como la capacidad de un material para resistir fuerzas externas sin sufrir deformaciones o roturas.

Rivera (2023) clasifica los tipos de esfuerzo según su naturaleza, es decir según la dirección de la fuerza aplicada:

- *Esfuerzo normal* (Axial). Ocurre cuando la fuerza es perpendicular a la sección transversal del material y puede ser de tracción o de compresión.
- *Esfuerzo cortante* (Cizalladura). Se presenta cuando las fuerzas actúan paralelamente a la sección transversal, provocando que las capas del material se deslicen unas sobre otras.
- *Esfuerzo de torsión*. Surge cuando un momento de torsión se aplica sobre un material, generando esfuerzos cortantes distribuidos, estos tienden a retorcer el cuerpo del material.
- *Esfuerzo de flexión*. Ocurre cuando una carga perpendicular al eje longitudinal del material genera una curvatura, produciendo esfuerzos de compresión en una cara y de tracción en otra.

El análisis de esfuerzos es fundamental para garantizar que los materiales y estructuras puedan soportar las cargas a las que serán sometidos sin fallar. Este tipo de estudios permite diseñar elementos estructurales que sean seguros y funcionales, evitando deformaciones o roturas (Salazar, 2007).

#### **4.3. Deformación de los materiales bajo cargas**

En ingeniería la deformación de los materiales se refiere al cambio en la forma o tamaño de un cuerpo cuando se aplica una carga extra. Este fenómeno es

fundamental para comprender la reacción de los materiales a las fuerzas y su comportamiento en diversas condiciones de uso (Dulos, 1875).

Figuerola *et al* (2019) identifican varios tipos de deformación:

- *Deformación elástica.* Es aquella que ocurre cuando un material se deforma bajo una carga, pero regresa a su forma original una vez que la carga es retirada. Este tipo de deformación es común en materiales como el caucho y sigue la ley de Hooke

$$\sigma = E \varepsilon$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo,  $E$  el módulo de elasticidad y  $\varepsilon$  la deformación.

- *Deformación plástica.* Ocurre cuando el material experimenta una deformación permanente que no desaparece al retirar la carga. Este se produce cuando se supera el límite elástico y es esencial en procesos de fabricación.
- *Deformación por fluencia lenta.* Este fenómeno se presenta en materiales visco-elásticos, como los polímeros y resulta de mucha importancia para estructuras como el hormigón.
- *Deformación por rotura.* Es el daño irreversible que ocurre cuando el material no puede soportar las tensiones aplicadas y se fractura, este indica el punto de fallo del material y depende de la ductilidad y resistencia del mismo, para evitar este tipo de fallo en estructuras es crucial el diseño para evitar fallas.

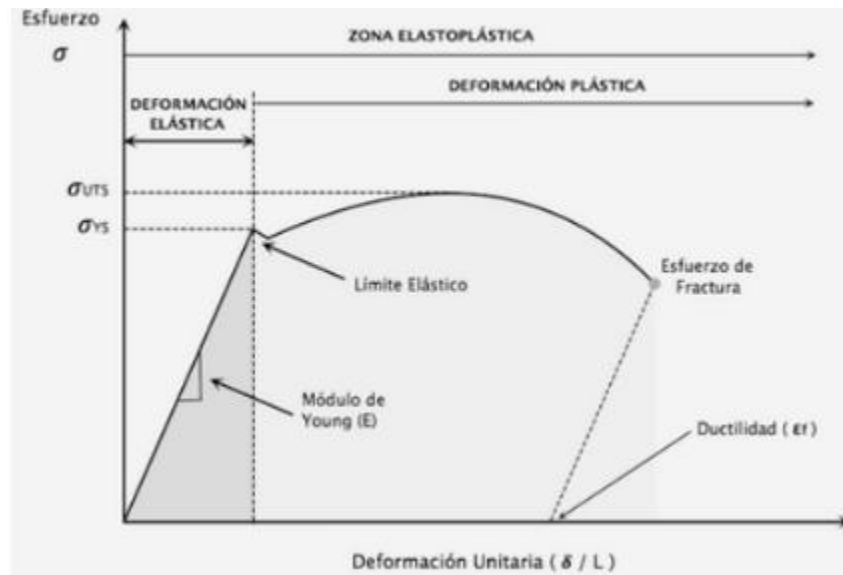


Figura 1. Gráfico descriptivo de diagramas de esfuerzo-deformación (Acevedo, 2019)

El comportamiento elástico-plástico de los materiales es aquel en donde vuelven a su forma después de aplicar una carga y después se deforman permanentemente (plásticamente) si la carga supera el límite. Esto se ilustra en una curva que muestra el punto donde comienza la deformación plástica, esa curva se conoce como curva de esfuerzo-deformación (Jiménez *et al*, 2020).

Existen diversos factores que afectan a la deformación en materiales como el tipo de material es decir si es un polímero, metal o cerámica ya que tienen comportamientos diferentes según la carga; la temperatura es otro factor relevante ya que el aumento de temperatura puede aumentar la deformación como en la termo-fluencia; el tiempo también es un factor relevante en la deformación ya que la duración de la carga aplicada influye en la cantidad de deformación (Jiménez *et al*, 2020).

Comprender las deformaciones es esencial para diseñar estructuras confiables asegurando que los materiales no sufran deformaciones excesivas y comprometan su integridad además de prevenir fallas para identificar y mitigar riesgos de rotura o deformación.



#### 4.4. Diagramas de esfuerzo-deformación

Singer (1994) describe a los diagramas de esfuerzo-deformación como una herramienta que permite visualizar como un material responde a las cargas aplicadas, identificando puntos críticos como el límite de proporcionalidad, límite de fluencia, esfuerzo máximo y esfuerzo de fractura.

Un diagrama esfuerzo–deformación (o curva  $\sigma$ – $\epsilon$ ) representa cómo responde un material cuando se le aplica una carga uniaxial. Se construye a partir de una prueba de tracción, registrando el esfuerzo ( $\sigma$  = fuerza/área) en el eje vertical y la deformación ( $\epsilon$  = cambio de longitud/longitud original) en el horizontal.

*Regiones clave de los diagramas esfuerzo-deformación:*

- *Límite de proporcionalidad.* Es la región lineal y se describe como el comportamiento elástico que sigue la ley de Hooke ( $\sigma = E \cdot \epsilon$ ), donde **E** es el módulo de elasticidad o de Young.
- *Límite elástico.* Hasta este punto el material vuelve a su forma original. Más allá, comienza la deformación plástica, es decir, permanente.
- *Punto de fluencia.* Hay un pico seguido de una caída, aquí inicia la deformación plástica a bajo incremento de esfuerzo.
- *Endurecimiento por deformación.* Tras la fluencia, el esfuerzo vuelve a aumentar hasta alcanzar la resistencia máxima ( $\sigma_u$ ), gracias al ordenamiento interno del material.
- *Punto de tensión máxima.* Es la carga máxima soportada antes de que se inicie la estricción.
- *Estricción y fractura.* Después del pico se concentra la deformación en una sola sección y finalmente ocurre la fractura.

### *Comportamiento de los diagramas*

- *Elástico ó plástico.* Dentro de la región elástica, al retirar la carga, el material recupera su forma (deformación reversible). En la región plástica, la deformación es permanente.
- *Toughness* (tenacidad). Es el área total bajo la curva: representa la energía absorbida antes de la fractura.
- *Dúctil o frágil.* Los materiales dúctiles (como aceros suaves) tienen largas fases plásticas y estricción visible. Los frágiles (como certains vidrios) prácticamente no deforman antes de romperse.

# CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS

## 5.1. Descripción de las áreas de estudio

Para llevar a cabo el estudio se tomaron como áreas de colecta el sitio de la plantación de Arteaga Coahuila ubicada en las coordenadas  $25^{\circ} 24' 27.00''$  N,  $100^{\circ} 36' 24.25''$  W a una altura de 2346 msnm que se encuentra dentro del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

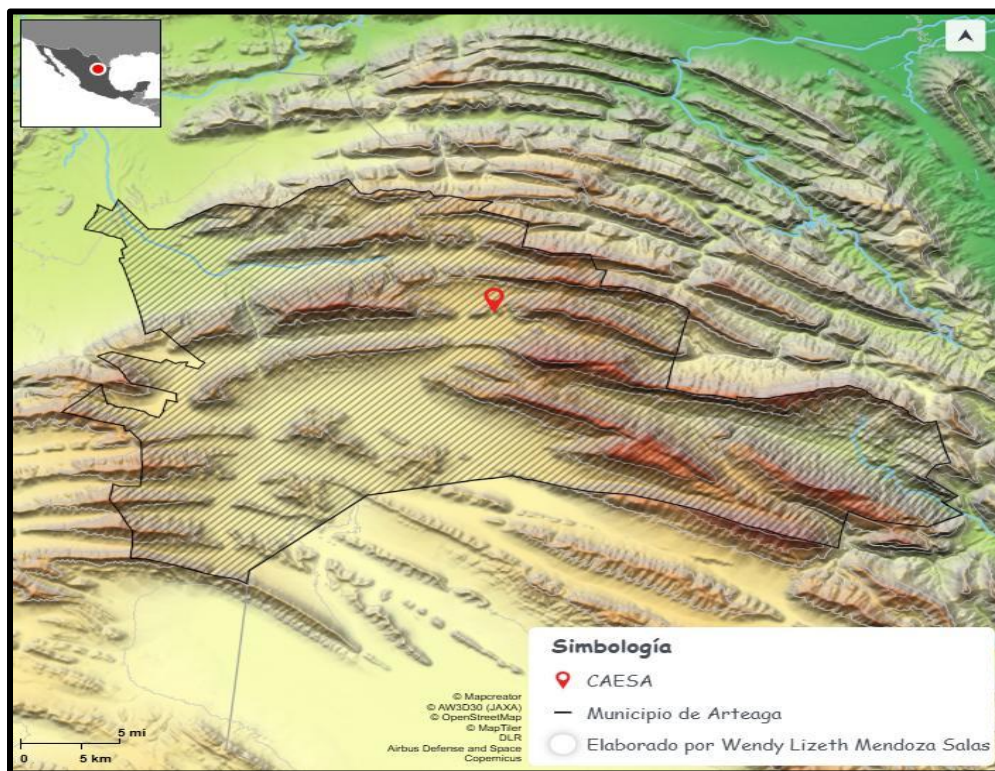


Figura 2. Mapa del área de estudio

## **5.2. Fisiografía**

El municipio de Arteaga forma parte de la sub-provincia de la Gran Sierra Plegada, que a su vez se encuentra en la provincia de la Sierra Madre Oriental. La altitud de la cabecera municipal es de 1 680 m s. n. m. y el punto más alto del territorio es el Cerro de San Rafael, a 3 715 m s. n. m. Su sistema de topo-formas corresponde al de sierras bajas (Aragón, 2020).

## **5.3. Hidrología**

El municipio de Arteaga pertenece a las regiones hidrológicas Bravo-Conchos (RH24) y El Salado (RH37). En su territorio se encuentran pequeñas corrientes de agua permanente, localizadas en los Cañones de la Roja y La Carbonera. También existen afluentes menores en áreas cercanas a la Sierra Agua del Toro y entre la Sierra San Lucas y la de Arteaga. Además, cuenta con un afluente tributario del Arroyo Casillas, localizado en el Cañón Potrero de Abrego (Bada, 2014).

## **5.4. Suelo**

El tipo de suelo presente en la plantación estudiada cuenta con las características edafológicas descritas como tipos de suelo Litosol, Rendzina y Regosol calcárico, con fase lítica (INEGI, 1983).

## **5.5. Clima**

El clima presente en la región se describe como un semiseco templado durante la mayor parte del año representado por  $Cb(w_0)(x')(e)g$  (García, 1964).

## 5.6. Vegetación

La vegetación dominante de la región se ubica como bosque y matorral (Aragón, 2020). El área de estudio se encuentra dentro del tipo de vegetación de agricultura de temporal (INEGI, 2010).

## 5.7. Características de la plantación

Dicha plantación se estableció con propósitos de estudio dentro de los terrenos del Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro utilizando la especie *Pinus greggii* Engelm se dispusieron en forma de terrazas para su manejo, contando con una edad de 34 años al momento de la corta en su cuarto aclareo.

## 5.8. Generalidades de la especie

*Pinus greggii* es una especie arbórea del oriente de México de importancia económica y ecológica, esta especie cuenta con dos variedades identificadas, las poblaciones de la especie del norte, se reconocen como *P. greggii* var. *greggii* y a las del sur como *P. greggii* Engelm. var. *australis* (Ramírez-Herrera et al. 2005).

*Pinus greggii* es una especie arbórea de valor económico para las poblaciones humanas que habitan en zonas aledañas a los bosques, se aprovecha para la obtención de madera para la industria del aserrío, y localmente en la obtención de postes para cerca y leña combustible. Además, *P. greggii* ha mostrado altas tasas de crecimiento en altura y diámetro en ensayos de plantaciones (Ramírez-Herrera et al., 2005).

La especie ha demostrado tener un crecimiento de volumen de bueno a muy bueno en comparación con las especies comerciales habituales de pino y también

un potencial de mejora considerable, además de mostrar una resistencia a plagas de insectos (Darrow y Coetzee, 1983).

La vegetación típica donde se desarrolla esta especie es de bosque de pino y bosque de pino-encino (Vázquez-Cisneros et al., 2018), en suelos volcánicos y entre mesetas altas y pendientes bajas, así mismo se pueden encontrar en zonas áridas o secas (Aguilera, 2001).

### **5.9. Importancia económica de la especie**

*Pinus greggii* es uno de los árboles de mayor valor económico para las poblaciones humanas que habitan en zonas aledañas a los bosques. Se aprovecha para la obtención de madera para la industria del aserrío, y localmente en la obtención de postes para cerca y leña combustible. Además, *P greggii* ha mostrado altas tasas de crecimiento en altura y diámetro en ensayos de plantaciones (Ramírez-Herrera et al. 2005)

### **5.10. Área de colecta de la muestra de trozas**

De acuerdo a lo especificado en el protocolo de este trabajo, presentado previamente, el área de colecta corresponde al sitio de una plantación que se encuentra en el poblado de Los lirios, Arteaga, Coahuila, ubicada en las coordenadas 25° 24' 27.00" N, 100° 36' 24.25" W, a una altura de 2346 msnm, que se encuentra dentro del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.



*Figura 3. Mapa de localización de los individuos muestreados*

#### **5.11. Selección de los árboles**

Los árboles de la plantación en cuestión, presentan un desarrollo aproximadamente uniforme y cuentan, al momento, con una edad de 32 años. Dentro de esa población de árboles, se marcó a un grupo de ellos como los árboles posibles a derribar para propósitos de aclareo de la plantación. Dentro de este grupo de árboles, se eligieron de forma aleatoria 5 árboles para utilizar en el presente estudio. Una vez definidos se marcaron con una señalización de color naranja.



*Figura 4. Señalización de los árboles seleccionados*

### **5.12. Derribo y troceo**

Para el derribo de los árboles se utilizó una técnica de derribo direccionado, esto para evitar el daño a individuos cercanos. El derribo se realizó con motosierra marca STIHL modelo MSA 160C a la altura de la base. Una vez derribados se les quitaron las ramas y se marcaron tres alturas del fuste: de la base (0.1 m) a 0.8 m, de 0.8 m a 1.50 m y de 1.50 m a 2.20 m. Se realizaron cortes en dichas alturas y se obtuvieron tres trozas por árbol. Cada troza se señaló con una clave indicando el árbol y la altura, estas trozas fueron trasladadas a el laboratorio de Ingeniería Forestal del Departamento Forestal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.





*Figura 5. Derribo direccionado de los árboles*

*Figura 6. Seccionado de los árboles*

### **5.13. Traslado**

Para llevar a cabo el traslado de las trozas a los laboratorios de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo se sometieron a un proceso de aserrado para quitar parte de la corteza de los árboles, dicho procedimiento se realizó en un aserradero portátil marca Wood-Mizer modelo LT28 SAWMILL. Una vez realizado lo anterior, se procedió a sellar las testas de las trozas para evitar la pérdida de humedad durante el traslado. Posteriormente, se procedió a asegurar y empaquetar para el envío, por paquetería comercial, de las trozas.



*Figura 7. Sellado de las testas de las trozas*



*Figura 8. Trozas en la UMSNH*

#### 5.14. Acondicionamiento de material para el trabajo de laboratorio

Para llevar a cabo el proceso de dimensionado se tomaron en cuenta las características descritas en las normas ISO 3349 e ISO 3787. Para el proceso de habilitado se comenzó con el trazó de un diagrama de corte en las cabezas de las trozas, una vez hecho esto, se procedió a realizar los cortes en una sierra cinta marca MECAMICH, el aserrado de los cinco árboles se estableció de tal forma que se obtuvieran probetas completamente orientadas radialmente, durante este proceso, se procuró mantener el orden de los árboles marcando cada tabla con una clave de árbol y altura.



*Figura 9. Sierra cinta MECAMICH*

Una vez obtenidas las tablas de una pulgada de los árboles, se procedió a llevar a cabo el secado, esto se realizó en una estufa de secado marca Hildebrand modelo HD74; para poder llevarlo a cabo, se utilizó una secuela de secado previamente establecida, el secado duró un aproximado de 6 días, procurando el monitoreo de la humedad y la temperatura de la estufa el mayor tiempo posible, para poder lograr llegar a un contenido de humedad del 10% para las tablas.



*Figura 10. Estufa de secado Hildebrand*

Una vez seca la madera se continuo con el maquinado de la misma, para llevar a cabo esta transformación se sometieron las trozas a los procesos que se describen a continuación.

I. Se comenzó por el cepillado, la maquina cepilladora que se utilizó cuenta con un cabezal con espacio para colocar 3 cuchillas de 12" de acero templado. La potencia del motor de los rodillos de arrastre es de 5 caballos de fuerza. Se inició con las especies ajustando el cepillo para desbastar 2 mm de material por tabla, todas las probetas fueron cepilladas a favor del grano.



*Figura 11. Cepillo*

II. Una vez teniendo las tablas cepilladas se procedió a regular los cantos de las tablas para eso se utilizó la máquina canteadora, la maquina empleada para este procedimiento fue de la marca SILVERLINE modelo DC-WJ12-1 con un motor de 3 caballos de fuerza y un ancho máximo de desbaste de 12", con 3 cuchillas de acero templado para el corte.



*Figura 12. Canteadora SILVERLINE*



III. Una vez que las tablas se encontraban en las medidas establecidas, se procedió a cortar listones de aproximadamente 22 mm de espesor, dicho procedimiento se realizó con una sierra circular marca SILVERLINE modelo DC-MBS300 con un diámetro de disco de corte de 12" hecho de carburo de tungsteno. Con una potencia de motor de 5 caballos de fuerza.



*Figura 13. Sierra circular SILVERLINE*

IV. De acuerdo a las normas consultadas, las probetas deben tener una sección transversal cuadrada, con 20 mm por lado. Para quitar lo sobrante de los listones cortados se pasaron nuevamente por un cepillo. En este caso, fue un cepillo de banco marca DeWalt modelo DW734 de 12-1/2" con tres cuchillas de acero templado con un motor de 10000 RPM.



*Figura 14. Cepillo DeWalt*

V. Una vez obtenidos los espesores, se procedió a dimensionar las probetas en longitud para ambas pruebas de acuerdo con las normas ISO que se muestran en la siguiente tabla. Se realizaron los cortes utilizando una sierra ingleteadora marca DeWalt modelo DWS780 con un disco de 12" de carburo de tungsteno con un motor de 3800 RPM.



*Figura 15. Ingleteadora DeWalt*

### **5.15. Máquina Universal para las pruebas mecánicas**

Una maquina universal de ensayos, también conocida como máquina de ensayos de tracción-compresión (T/C), es un instrumento de laboratorio para realizar pruebas mecánicas en materiales, componentes y productos. Se le llama universal por que puede realizar una gran variedad de ensayos.

Este tipo de máquinas generalmente tiene un diseño modular lo que permite realizar ensayos de forma flexible con diferentes fuerzas y velocidades, esto para adaptar a cada forma individual a cada caso de aplicación.

La máquina utilizada para estos ensayos es una Máquina Universal UTM 300kN se encuentra instalada en la Unidad Profesional de Ciudad Hidalgo, se muestra en la figura 16, la cual cuenta con las siguientes características:

- Objeto: Máquina de ensayos tracción/compresión (T/C)
- Marca: CONTROLS
- Modelo: HM-S 300 KN
- N° de serie: 15M12188
- Capacidad de la maquina: 300 KN

#### Calibración de la máquina

- Fecha de calibración: 21/10/2015
- Calibración realizada en: HOYTOM  
Avda. Iparragirre, 96  
48940 Leiroa (Bizkaia)



*Figura 16. Máquina Universal UTM 300kN*

### 5.16. Selección de Probetas

Las normas internacionales ISO para ensayos mecánicos que se utilizaron para definir las medidas de las probetas fueron la norma ISO 3787 para compresión y la norma ISO 3349 para flexión.

*Tabla 1. Normas ISO para Ensayos mecánicos*

| <b>Norma</b> | <b>Ensayo</b>                  | <b>Área de sección transversal de las probetas (mm<sup>2</sup>)</b> | <b>Longitud de las probetas (mm)</b> |
|--------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| ISO 3349     | Flexión estática               | 20x20                                                               | 360                                  |
| ISO 3787     | Compresión paralela a la fibra | 20x20                                                               | 60                                   |

Para llevar a cabo la selección de las probetas se utilizó un muestreo aleatorio de acuerdo a la norma ISO 3129 para la determinación del número de piezas a utilizar en cada ensayo.

Para las pruebas de compresión y de acuerdo a lo anterior se distribuyeron de la siguiente manera, dando un total de 20 probetas seleccionadas para cada altura.



*Tabla 2. Selección de probetas de compresión por altura*

| <b>Altura 1</b> |         |         |         |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|
| Árbol 1         | Árbol 2 | Árbol 3 | Árbol 4 | Árbol 5 |
| 4               | 4       | 4       | 4       | 4       |
| <b>Altura 2</b> |         |         |         |         |
| Árbol 1         | Árbol 2 | Árbol 3 | Árbol 4 | Árbol 5 |
| 4               | 4       | 4       | 4       | 4       |
| <b>Altura 3</b> |         |         |         |         |
| Árbol 1         | Árbol 2 | Árbol 3 | Árbol 4 | Árbol 5 |
| 4               | 4       | 4       | 4       | 4       |

Para las pruebas de flexión se llevó a cabo una distribución similar a la que se utilizó en las pruebas de compresión con un total de 10 probetas seleccionadas para cada altura

*Tabla 3. Selección de probetas de flexión por altura*

| <b>Altura 1</b> |         |         |         |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|
| Árbol 1         | Árbol 2 | Árbol 3 | Árbol 4 | Árbol 5 |
| 2               | 2       | 2       | 2       | 2       |
| <b>Altura 2</b> |         |         |         |         |
| Árbol 1         | Árbol 2 | Árbol 3 | Árbol 4 | Árbol 5 |
| 2               | 2       | 2       | 2       | 2       |
| <b>Altura 3</b> |         |         |         |         |
| Árbol 1         | Árbol 2 | Árbol 3 | Árbol 4 | Árbol 5 |
| 2               | 2       | 2       | 2       | 2       |



*Figura 17 probetas de compresión*



*Figura 18 Probetas de flexión*

### 5.17. Pruebas de compresión

Para las pruebas de compresión se siguió la metodología establecida por la norma ISO 3787 utilizando 20 probetas para cada altura, obteniendo una gráfica de esfuerzo-deformación para cada probeta.

Para las pruebas de compresión se aseguró de que las probetas estuvieran identificadas para dar comienzo al ensayo ubicándolas al centro de los platillos. La prueba se hizo aplicando una fuerza a una velocidad constante de 6 mm/s hasta el fallo, según indica la norma previamente señalada. En la ilustración 15, se presenta un ejemplo de ensayo de compresión.



*Figura 19. Pruebas de compresión*



*Figura 20. Compresión paralela a la fibra*

En la siguiente figura, se muestra la gráfica respectiva generada por la máquina universal para una de las pruebas de compresión

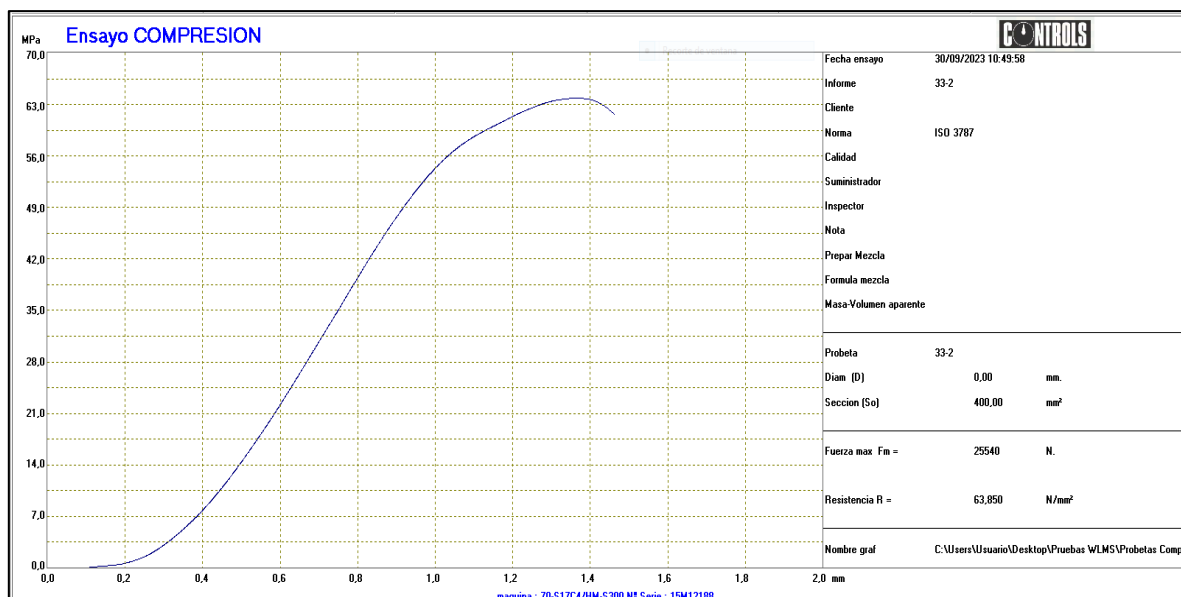
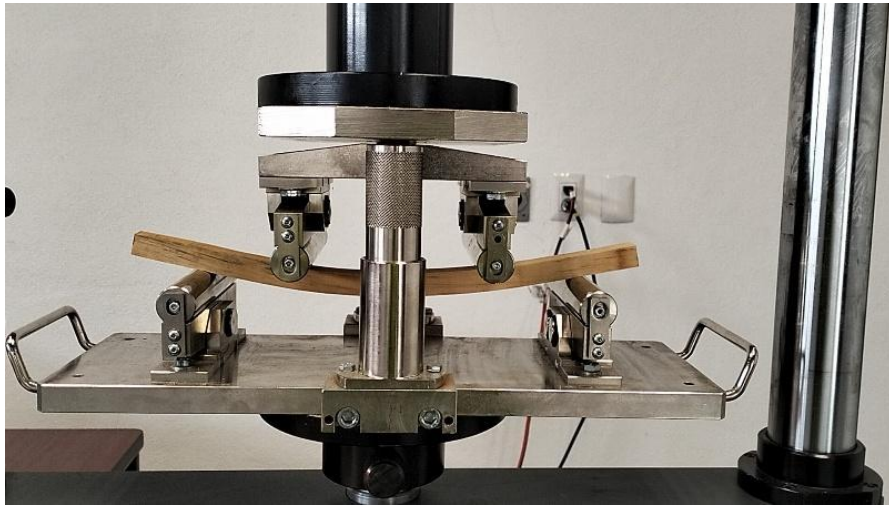


Figura 21. gráfica esfuerzo-deformación de la compresión

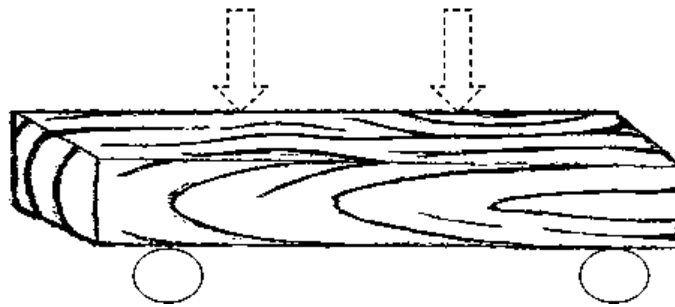
## 5.18. Pruebas de flexión

Para las pruebas de compresión se siguió la metodología establecida por la norma ISO 3349 utilizando 10 probetas para cada altura, obteniendo una gráfica de esfuerzo-deformación para cada probeta.

En las pruebas de flexión se aseguraron que estuvieran correctamente identificadas para ubicarlas entre los rodillos del accesorio de forma que estuvieran alineadas al centro, aplicando una fuerza a una velocidad constante de 2 mm/s, de acuerdo a la norma respectiva.



*Figura 22. Pruebas de flexión*



*Figura 23. Flexión estática*

A continuación, se muestra una de las gráficas obtenidas de las pruebas de flexión generada por la maquina universal.

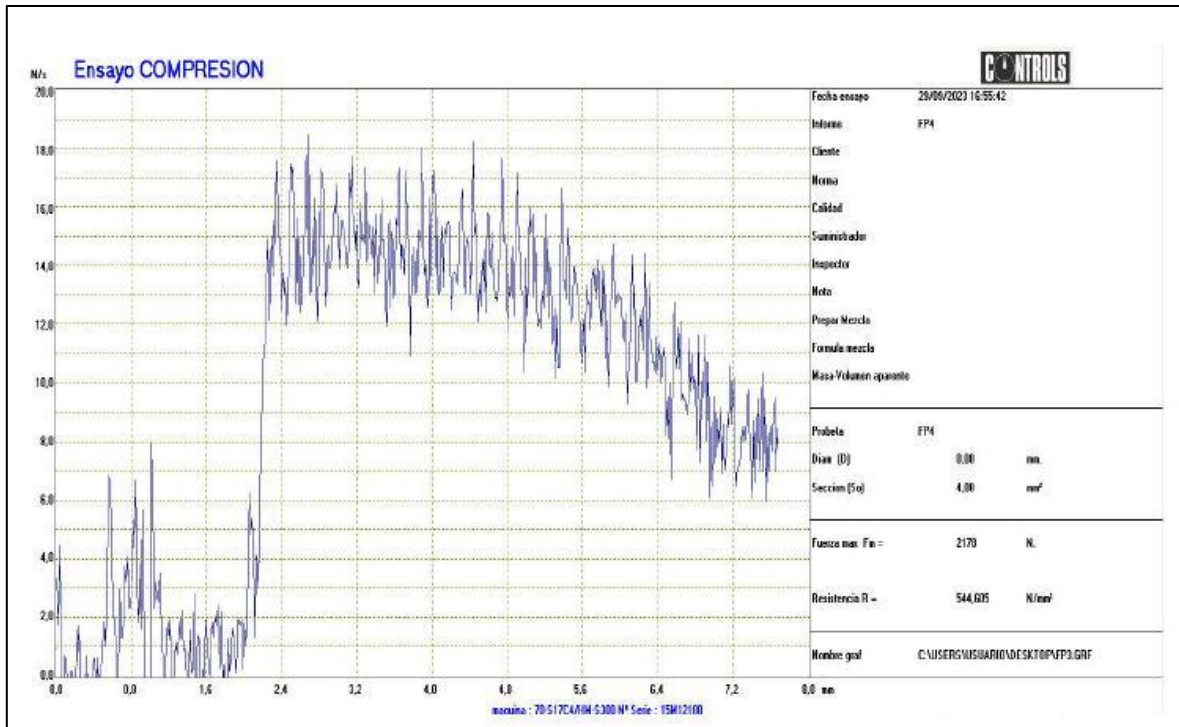


Figura 24. grafica de esfuerzo-deformación de flexión

Como puede observarse, las gráficas de flexión presentan considerables irregularidades, por lo que existe una anomalía en estas pruebas y no fue posible realizarlas. Ver apéndice B.

### 5.19. Diseño experimental

Las pruebas de hipótesis correspondientes al problema del presente trabajo son:

$H_{1,0}$  : Los valores medios de compresión, para tres diferentes alturas en el fuste, de madera de *pinus greggii* obtenida de una plantación forestal experimental del estado de Coahuila, son iguales.

$H_{1,a}$  : Al menos uno de los valores medios de compresión es diferente.

$H_{2,0}$  : Los valores medios de flexión, para tres diferentes alturas en el fuste, de madera de *pinus greggii* obtenida de una plantación forestal experimental del estado de Coahuila, son iguales.

$H_{2,a}$  : Al menos uno de los valores medios de flexión es diferente.

Una vez que se obtengan los resultados de las propiedades mecánicas de interés, se procesarán con el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS) versión 9.4.

## 5.20. Determinación de contenido de humedad

Se utilizó la norma ISO 3130 para determinar contenido de humedad de probetas de madera. También, se requirió la determinación de la densidad normal, al 12%, de la madera utilizada, de acuerdo a la norma 3131.

En base a la metodología de la norma, se determinó el contenido de humedad en las probetas para las pruebas mecánicas, dicho procedimiento se determina mediante pesada, la pérdida de la masa de la probeta al secado hasta volverse constante. Para poder llevar a cabo este procedimiento se realizaron pesajes de las probetas a evaluar en una báscula granataria de precisión marca ADAM modelo PGL 4001.

En la determinación del contenido de humedad se realizó un pesaje inicial de las probetas antes de estufar, una vez cada hora durante el estufado y al sacarlo de la estufa, ya estando a peso constante. Para el secado se utilizó una estufa de secado marca FARA modelo FE143 a una temperatura de 103°C (±) 2.

Se utilizó la formula

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100$$

Donde:

- $w$  es el contenido de humedad
- $m_1$  es la masa (gr) de la probeta antes del secado
- $m_2$  es la masa (gr) de la probeta después del secado

Las normas ISO 3787 e ISO 3349, para medir las propiedades mecánicas de compresión y flexión, respectivamente, también requieren la medición de la densidad ya sea la densidad normal o la densidad básica, según se describe enseguida.



### 5.21. Determinación de densidad normal y densidad básica

Se determinó la densidad normal, al 12% de humedad, de las muestras estudiadas siguiendo la metodología de la norma ISO 3131 para pruebas físicas y mecánicas siguiendo la fórmula:

$$\rho_{12\%} = \frac{m_{12\%}}{a_{12\%} \times b_{12\%} \times l_{12\%}} = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}}$$

Donde:

- $\rho_{12\%}$  es la densidad normal
- $m_{12\%}$  es la masa (gr) de la probeta en estado seco
- $V_{12\%}$  es el volumen (cm<sup>3</sup>) de la probeta en estado seco

La única norma que se encontró para determinar la densidad básica específicamente, fue la ASTM 2395-02-200ASTM 2395-02, 2002. Se cortaron probetas de 20x20x20 mm en una sierra marca DeWalt modelo DW8001, Se pesaron en una báscula granataria marca ADAM modelo PFW 603e y se midieron los tres planos de la madera en cada probeta con ayuda de un vernier marca Steren modelo HER-411. Una vez que se pesaron y midieron las probetas, se procedió a saturar la madera manteniéndolas sumergidas en agua destilada por 13 días. Finalmente, se determinó el peso verde y el volumen verde.

Posteriormente se secaron las muestras en utilizando una estufa de secado marca felisa modelo FE-293D a 100°C ± 2°C hasta peso constante según la norma citada en el párrafo previo. Una vez secadas las muestras se registró el peso seco y se obtuvo el volumen seco midiendo los planos tangencial, axial y longitudinal con ayuda de un vernier.

Para determinar la densidad básica de las probetas seleccionadas se utilizó la siguiente fórmula:

$$\rho_b = \frac{P_0}{V_v}$$

Donde:

- $\rho_b$  es la densidad básica
- $P_0$  es la masa (gr) de las probetas en estado seco
- $V_v$  es el volumen (cm<sup>3</sup>) de las probetas en estado saturado

## 5.22. Determinación de otras propiedades físicas

En relación con el material de la sección previa, también se realizaron pruebas físicas para la determinación de las propiedades de contracción, expansión volumétrica de las probetas y el punto de saturación de la fibra. Los resultados respectivos, se incluyen en el apéndice C.

## 5.23. Determinación del MOR y MOE

Para el cálculo del módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) en compresión paralela a la fibra de la madera, se utilizaron las siguientes formulas.

El MOR, que indica la resistencia máxima de la madera en la compresión axial, fue calculado mediante la fórmula:

$$MOR = \frac{Q}{A}$$

Donde:

- Q es la carga máxima de ruptura (N)
- A es el área de la sección transversal de la probeta (mm<sup>2</sup>)

El MOE, que mide la rigidez de la madera bajo carga axial, se calculó con la siguiente fórmula:

$$MOE = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P L}{A \Delta L}$$

Donde:

- $P$  es la carga máxima aplicada (N)
- $L$  es la longitud total de la probeta (mm)
- $A$  es el área de la sección transversal de la probeta ( $\text{mm}^2$ )
- $\Delta L$  es el desplazamiento en la compresión de la probeta (mm)
- $\sigma$  es el esfuerzo
- $\epsilon$  es la deformación

En las pruebas de compresión, la máquina universal utilizada en este trabajo, no proporciona directamente la gráfica esfuerzo-deformación, sino la gráfica esfuerzo-desplazamiento. La deformación se obtiene dividiendo el desplazamiento entre la longitud inicial de la probeta, y de esta forma se obtiene la gráfica esfuerzo-deformación. Analizando la zona lineal inicial de esta gráfica, se puede obtener el MOE, mediante una regresión lineal, como la pendiente de dicha recta.

## CAPÍTULO 6. RESULTADOS

A continuación, se muestran tablas con los resultados obtenidos de las pruebas de compresión por la maquina universal, dichos resultados muestran la carga máxima y la resistencia.

### 6.1. Resultados de carga máxima en pruebas de compresión

*Tabla 4. Resultados de carga máxima en Newtons*

| Fuerza máxima (N) |          |          |         |
|-------------------|----------|----------|---------|
| Probeta           | Altura 1 | Altura 2 | Altura3 |
| 1                 | 23619    | 26462    | 21118   |
| 2                 | 23504    | 26633    | 24467   |
| 3                 | 22022    | 20567    | 20121   |
| 4                 | 18485    | 18400    | 20092   |
| 5                 | 20300    | 21984    | 22074   |
| 6                 | 23567    | 20530    | 22417   |
| 7                 | 17707    | 22212    | 20150   |
| 8                 | 19014    | 20157    | 23524   |
| 9                 | 29933    | 25593    | 25540   |
| 10                | 24095    | 23420    | 27333   |
| 11                | 25723    | 25851    | 23418   |
| 12                | 29732    | 24998    | 25422   |

|           |          |         |          |
|-----------|----------|---------|----------|
| 13        | 25723    | 17071   | 25511    |
| 14        | 19262    | 16703   | 25569    |
| 15        | 19375    | 27930   | 23955    |
| 16        | 19907    | 16624   | 25662    |
| 17        | 21286    | 24054   | 20111    |
| 18        | 18530    | 24753   | 27703    |
| 19        | 22092    | 20982   | 20383    |
| 20        | 19815    | 26498   | 25763    |
| $\bar{X}$ | 22184.55 | 22571.1 | 23516.65 |

## 6.2. Resultados de resistencia máxima a la compresión

La resistencia máxima a compresión del material ayudará a determinar el uso potencial que va tener. Su valor, indicará la capacidad máxima de soporte en donde ocurre un fallo mecánico o rotura.

*Tabla 5. Resistencia máxima a la compresión en MPa*

| Resistencia Máxima (Mpa) |          |          |         |
|--------------------------|----------|----------|---------|
| Probeta                  | Altura 1 | Altura 2 | Altura3 |
| 1                        | 59.0472  | 66.1552  | 52.795  |
| 2                        | 58.7595  | 66.583   | 61.1674 |
| 3                        | 55.0554  | 51.4173  | 47.9072 |
| 4                        | 46.213   | 45.9991  | 50.2311 |
| 5                        | 50.7508  | 54.9594  | 55.1858 |
| 6                        | 58.918   | 51.3252  | 56.0435 |

|           |          |          |          |
|-----------|----------|----------|----------|
| 7         | 44.2687  | 55.5312  | 50.3746  |
| 8         | 47.535   | 50.3929  | 58.8094  |
| 9         | 74.8313  | 63.9829  | 63.85    |
| 10        | 60.2383  | 58.5495  | 68.3327  |
| 11        | 64.308   | 64.6272  | 58.5442  |
| 12        | 74.3299  | 62.4943  | 63.5551  |
| 13        | 64.308   | 42.6783  | 63.7775  |
| 14        | 48.1559  | 41.7587  | 36.9225  |
| 15        | 48.4372  | 69.8261  | 59.8881  |
| 16        | 49.7684  | 41.5606  | 64.1546  |
| 17        | 53.2141  | 60.1354  | 50.2779  |
| 18        | 46.3247  | 61.8824  | 69.2572  |
| 19        | 55.2294  | 52.4561  | 50.9575  |
| 20        | 49.537   | 66.2446  | 64.4081  |
| $\bar{X}$ | 55.46149 | 56.42797 | 57.32197 |
| s         | 8.89     | 8.95     | 8.04     |

En el cuadro anterior se presentan los valores de la resistencia en  $N/m^2$  de cada una de las alturas en donde se puede observar que la tercera altura es la que presenta una mayor resistencia a la compresión de acuerdo con los datos, y de acuerdo a lo obtenido de la desviación estándar podemos deducir que la tercera altura es más homogénea en cuanto a las características de sus probetas por ello se su promedio en resistencia es más alto que las alturas uno y dos.

### 6.3. Resultados obtenidos para densidad normal y densidad básica

En las tablas 6 y 7, se muestran los resultados obtenidos en este trabajo, para la densidad normal y densidad básica respectivamente.

*Tabla 6. Densidad normal para cada probeta de las tres alturas*

| Densidad normal 12% (gr/cm <sup>3</sup> ) |          |          |          |
|-------------------------------------------|----------|----------|----------|
| Probeta                                   | Altura 1 | Altura 2 | Altura 3 |
| 1                                         | 0.4958   | 0.4041   | 0.4666   |
| 2                                         | 0.5250   | 0.5125   | 0.4625   |
| 3                                         | 0.5875   | 0.4958   | 0.5250   |
| 4                                         | 0.5041   | 0.5333   | 0.4541   |
| 5                                         | 0.5041   | 0.5000   | 0.4833   |
| 6                                         | 0.5166   | 0.4791   | 0.5041   |
| 7                                         | 0.4958   | 0.4708   | 0.4708   |
| 8                                         | 0.5333   | 0.4208   | 0.5083   |
| $\bar{X}$                                 | 0.5203   | 0.4770   | 0.4843   |
| s                                         | 0.0303   | 0.0444   | 0.0253   |

*Tabla 7. Densidad básica para cada probeta de las tres diferentes alturas*

| <b>Densidad básica (g/cm<sup>3</sup>)</b> |                 |                 |                 |
|-------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Probeta</b>                            | <b>Altura 1</b> | <b>Altura 2</b> | <b>Altura 3</b> |
| 1                                         | 0.4292          | 0.4559          | 0.4239          |
| 2                                         | 0.4594          | 0.4140          | 0.4400          |
| 3                                         | 0.4249          | 0.4230          | 0.4383          |
| 4                                         | 0.4376          | 0.4291          | 0.4019          |
| 5                                         | 0.4037          | 0.4072          | 0.4315          |
| 6                                         | 0.4167          | 0.4162          | 0.4046          |
| 7                                         | 0.4603          | 0.4320          | 0.4107          |
| 8                                         | 0.4615          | 0.4280          | 0.4057          |
| 9                                         | 0.5289          | 0.4298          | 0.4172          |
| 10                                        | 0.4339          | 0.4520          | 0.3884          |
| 11                                        | 0.3825          | 0.4431          | 0.4111          |
| 12                                        | 0.3931          | 0.4606          | 0.4729          |
| 13                                        | 0.4745          | 0.4279          | 0.4480          |
| 14                                        | 0.4489          | 0.4666          | 0.4323          |
| 15                                        | 0.4379          | 0.4982          | 0.4551          |
| x                                         | 0.4395          | 0.4389          | 0.4254          |
| s                                         | 0.03604         | 0.0241          | 0.0229          |



#### 6.4. Resultados obtenidos para el MOR y MOE.

El módulo de ruptura (MOR) en compresión paralela a la fibra es una propiedad mecánica que se utiliza principalmente en el análisis de maderas u otros materiales fibrosos. Evalúa la resistencia máxima que puede soportar un material antes de fallar por compresión a lo largo del eje de las fibras.

El MOR en compresión paralela es la resistencia máxima que tiene un material para soportar las fuerzas de compresión en la misma dirección que las fibras, antes de romperse.

En la tabla 8, se muestran los resultados del MOR obtenidos para cada altura.

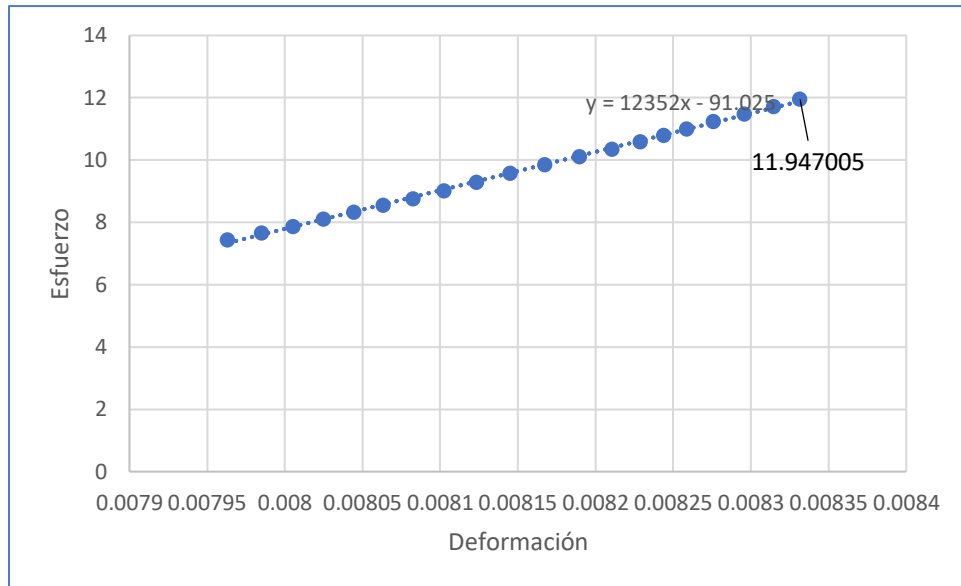
*Tabla 8 Resultados obtenidos en este trabajo para MOR*

| MOR     |          |         |         |
|---------|----------|---------|---------|
| Probeta | Altura 1 | Altura2 | Altura3 |
| 1       | 59.0475  | 66.155  | 52.795  |
| 2       | 58.76    | 66.5825 | 61.1675 |
| 3       | 55.055   | 51.4175 | 50.3025 |
| 4       | 46.2125  | 46      | 50.23   |
| 5       | 50.75    | 54.96   | 55.185  |
| 6       | 58.9175  | 51.325  | 56.0425 |
| 7       | 44.2675  | 55.53   | 50.375  |
| 8       | 47.535   | 50.3925 | 58.81   |
| 9       | 74.8325  | 63.9825 | 63.85   |
| 10      | 60.2375  | 58.55   | 68.3325 |
| 11      | 64.3075  | 64.6275 | 58.545  |
| 12      | 74.33    | 62.495  | 63.555  |
| 13      | 64.3075  | 42.6775 | 63.7775 |
| 14      | 48.155   | 41.7575 | 63.9225 |
| 15      | 48.4375  | 69.825  | 59.8875 |
| 16      | 49.7675  | 41.56   | 64.155  |

|    |            |            |            |
|----|------------|------------|------------|
| 17 | 53.215     | 60.135     | 50.2775    |
| 18 | 46.325     | 61.8825    | 69.2575    |
| 19 | 55.23      | 52.455     | 50.9575    |
| 20 | 49.5375    | 66.245     | 64.4075    |
| x  | 55.461375  | 56.42775   | 58.791625  |
| s  | 8.88851538 | 8.95341195 | 6.38184232 |

El módulo de elasticidad (MOE), también conocido como módulo de Young, es una propiedad mecánica de los materiales que mide su rigidez. Indica qué tan resistente es un material a deformarse elásticamente (es decir, temporalmente) cuando se le aplica una fuerza. Cuanto mayor sea el módulo de elasticidad, más rígido es el material.

En las pruebas de compresión realizadas en este trabajo, no todas las gráficas experimentales de esfuerzo-deformación, para las diferentes probetas, presentan claramente una zona lineal inicial, que permita la determinación del MOE aplicando una regresión lineal a los resultados correspondientes. Para cada altura fueron seleccionadas las que si presentan dicho comportamiento. A continuación, se muestra un ejemplo de una de dichas zonas, con su respectivo ajuste.



*Figura 25. Grafica de la zona lineal de una probeta de compresión*

En la gráfica anterior, la recta no inicia en el origen, porque la maquina empieza su movimiento antes de hacer contacto con la probeta, pero eso no afecta la determinación de su pendiente, cuyo valor, en este caso 12352 MPa, corresponde al MOE.

En la tabla 9, se muestran los resultados del MOE obtenidos para las probetas que presentan una zona lineal inicial, para cada altura.

*Tabla 9. Resultados obtenidos en este trabajo para MOE*

| MOE<br>(MPa) |          |         |         |
|--------------|----------|---------|---------|
| Probeta      | Altura 1 | Altura2 | Altura3 |
| 1            | 9904.9   | 18180   | 4446.6  |
| 2            | 12613    | 19102   | 13885   |
| 3            | 25839    | 11084   | 11784   |
| 4            | 14771    | 26257   | 10402   |
| 5            | 18598    | 3248.9  | 8605.5  |

|   |            |            |            |
|---|------------|------------|------------|
| 6 | 12352      | 9520.3     | 7036       |
| 7 | 10721      | 9415.3     | 2759.7     |
| 8 | 25513      | 5477.5     | 7334.4     |
| x | 16288.9875 | 12785.625  | 8281.65    |
| s | 6377.33467 | 7743.64808 | 3701.60615 |

### 6.5. Resumen de resultados.

En la tabla 10, se muestran, en resumen, los datos promedio de densidad normal, densidad básica, MOE y MOR, obtenidos para cada una de las alturas estudiadas.

*Tabla 10. Contenido de humedad, densidad normal, densidad básica, módulos de elasticidad y ruptura.*

| <b>Altura</b> | <b><math>\rho_n</math><br/>(gr/cm<sup>3</sup>)</b> | <b><math>\rho_b</math><br/>(gr/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>MOE<br/>(MPa)</b> | <b>MOR<br/>(MPa)</b> |
|---------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1             | 0.5203                                             | 0.4395                                             | 18575.7              | 55.4613              |
| 2             | 0.4770                                             | 0.4389                                             | 12736.44             | 56.4277              |
| 3             | 0.4843                                             | 0.4254                                             | 8281.65              | 58.7916              |
| $\bar{X}$     | 0.4939                                             | 0.4346                                             | 13197.9              | 56.8935              |
| S             | 0.0014                                             | 0.0080                                             | 8419.63              | 66.3637              |

## CAPÍTULO 7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Una vez obtenidos los resultados de las propiedades físicas descritas en el capítulo previo, se procedió a realizar los respectivos análisis de varianza, para determinar, en su caso, la existencia de diferencias significativas dentro o entre los grupos de las alturas evaluadas.

### 7.1. Análisis de varianza para la resistencia a la compresión, como función de la altura.

Para poder establecer la comparación de las medias de los grupos y determinar las diferencias entre los mismos, se realizó un análisis de varianza utilizando un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ . Los resultados se presentan en la tabla 11.

*Tabla 11. Análisis de varianza para la resistencia a la compresión  
como función de la altura*

| <b>Origen de las variaciones</b> | <b>Suma de cuadrados</b> | <b>Grados de libertad</b> | <b>Promedio de los cuadrados</b> | <b>F</b>   | <b>Probabilidad</b> | <b>Valor crítico para F</b> |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|------------|---------------------|-----------------------------|
| Entre grupos                     | 34.6313695               | 2                         | 17.3156847                       | 0.23206774 | 0.79363787          | 3.15884272                  |
| Dentro de los grupos             | 4253.04274               | 57                        | 74.6147849                       |            |                     |                             |
| Total                            | 4287.67411               | 59                        |                                  |            |                     |                             |

Como puede observarse en la tabla ANOVA anterior, el valor  $p$ , es considerablemente mayor que el nivel de significancia, por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula. Entonces, a un nivel de significancia de 0.05, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre la resistencia media a la compresión paralela a la fibra para las tres diferentes alturas analizadas.

De acuerdo a los resultados anteriores, la zona del árbol cuya madera fue estudiada presenta una homogeneidad en cuanto a las propiedades mecánicas de compresión estudiadas se refiere, se deduce que la uniformidad que se presenta en esta primera troza se traduce en que la madera es de buena calidad.

## 7.2. Análisis de varianza para la densidad normal

*Tabla 12. Análisis de varianza de la densidad normal en función de la altura*

| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F          | Probabilidad | Valor crítico para F |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|------------|--------------|----------------------|
| Entre grupos              | 0.00856803        | 2                  | 0.00428402                | 3.63017157 | 0.04425268   | 3.46680011           |
| Dentro de los grupos      | 0.02478239        | 21                 | 0.00118011                |            |              |                      |
| Total                     | 0.03335043        | 23                 |                           |            |              |                      |

Como puede verse en la tabla 12, el valor  $p$ , en este caso, es menor que el nivel de significancia, por lo que se rechaza la hipótesis nula. De esta forma, la densidad media de la madera de *Pinus greggii* Engelm si presenta una diferencia estadística significativa al variar la altura. Se requiere realizar comparaciones múltiples para determinar dichas diferencias.

### 7.3. Comparaciones múltiples para la densidad normal

#### Prueba de Tukey

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| Alfa                              | 0.05       |
| Grados de libertad del error      | 21         |
| Cuadrado medio del error          | 0.00117921 |
| Valor crítico del rango estudiado | 3.46680011 |
| Diferencia mínima significativa   | 0.00050631 |

*Tabla 13. Prueba de Tukey para densidad normal*

| Las comparaciones significativas al nivel de 0.05 se indican con *** |                          |            |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------|
| Comparación de métodos                                               | Diferencias entre medias |            |
| 1-2                                                                  | 0.04322917               | Diferentes |
| 1-3                                                                  | 0.0359375                | Diferentes |
| 2-3                                                                  | 0.00729167               | Diferentes |

#### Prueba de Fisher

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| Alfa                              | 0.05       |
| Grados de libertad del error      | 21         |
| Cuadrado medio del error          | 0.00117921 |
| Valor crítico del rango estudiado | 3.46680011 |
| Diferencia mínima significativa   | 0.00050631 |

*Tabla 14. Prueba de Fisher para densidad normal*

|                                                                      |                          |            |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------|
| Las comparaciones significativas al nivel de 0.05 se indican con *** |                          |            |
| Comparación de métodos                                               | Diferencias entre medias |            |
| 1-2                                                                  | 0.04322917               | Diferentes |
| 1-3                                                                  | 0.0359375                | Diferentes |
| 2-3                                                                  | 0.00729167               | Diferentes |

Tanto el método de Tukey como el método de Fisher, indican que los calores medios de la densidad normal son todos diferentes entre si, para las tres alturas en estudio.

#### 7.4. Análisis de varianza para la densidad básica

*Tabla 15. Análisis de varianza para densidad básica en función de la altura*

| <b>Origen de las variaciones</b> | <b>Suma de cuadrados</b> | <b>Grados de libertad</b> | <b>Promedio de los cuadrados</b> | <b>F</b>   | <b>Probabilidad</b> | <b>Valor crítico para F</b> |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|------------|---------------------|-----------------------------|
| Entre grupos                     | 0.00190183               | 2                         | 0.00095091                       | 1.18806773 | 0.31484445          | 3.21994229                  |
| Dentro de los grupos             | 0.03361628               | 42                        | 0.00080039                       |            |                     |                             |
| Total                            | 0.03551811               | 44                        |                                  |            |                     |                             |

Como se puede observar en la tabla anterior, el valor de  $p$  es significativamente más alto que el nivel de significancia de 0.05 por lo tanto no se observan



diferencias estadísticamente significativas para la densidad básica para las tres alturas analizadas.

## 7.5. Análisis de varianza para el MOR

Tabla 16. Análisis de varianza para el módulo de ruptura en función de la altura

| <b>Origen de las variaciones</b> | <b>Suma de cuadrados</b> | <b>Grados de libertad</b> | <b>Promedio de los cuadrados</b> | <b>F</b> | <b>Probabilidad</b> | <b>Valor crítico para F</b> |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------|---------------------|-----------------------------|
| Entre grupos                     | 117.415671               | 2                         | 58.707835                        | 0.881070 | 0.41990546          | 3.1588427                   |
|                                  |                          |                           | 7                                | 4        |                     | 2                           |
| Dentro de los grupos             | 3798.04685               | 57                        | 66.632400                        |          |                     |                             |
|                                  |                          |                           | 8                                |          |                     |                             |
| Total                            | 3915.46252               | 59                        |                                  |          |                     |                             |

El análisis de varianza mostrado en el cuadro anterior nos indica que el valor de  $p$  es significativamente mayor al nivel de significancia establecido de 0.05 por ello se puede deducir que no existen diferencias significativas para el módulo de ruptura entre las tres alturas estudiadas.

## 7.6. Análisis de varianza para el MOE

Tabla 17. Análisis de varianza para el módulo de elasticidad en función de la altura

| <b>Origen de las variaciones</b> | <b>Suma de cuadrados</b> | <b>Grados de libertad</b> | <b>Promedio de los cuadrados</b> | <b>F</b>  | <b>Probabilidad</b> | <b>Valor crítico para F</b> |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------|---------------------|-----------------------------|
| Entre grupos                     | 257804783                | 2                         | 128902391                        | 3.3821886 | 0.05329412          | 3.4668001                   |
|                                  |                          |                           |                                  | 2         |                     | 1                           |
| Dentro de los grupos             | 800354599                | 21                        | 38112123.                        |           |                     |                             |
|                                  |                          |                           | 8                                |           |                     |                             |
| Total                            | 105815938                | 23                        |                                  |           |                     |                             |
|                                  | 1                        |                           |                                  |           |                     |                             |

En la tabla 17, se puede apreciar que el valor de  $p$  es mayor que el nivel de significancia, 0.05. Por lo tanto, formalmente, el valor medio del MOE, no muestra diferencias significativas para las tres alturas analizadas. Sin embargo,  $p$  es casi igual a 0.05, en cuyo caso se rechazaría la hipótesis nula. De cualquier forma, se decidió realizar pruebas de comparaciones múltiples.

## 7.7. Comparaciones múltiples para el MOE

### Prueba de Tukey

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| Alfa                              | 0.05       |
| Grados de libertad del error      | 21         |
| Cuadrado medio del error          | 38112123.8 |
| Valor crítico del rango estudiado | 3.46680011 |
| Diferencia mínima significativa   | 7809.56633 |

*Tabla 18. Prueba de Tukey para MOE*

| Las comparaciones significativas al nivel de 0.05 |                          |                 |
|---------------------------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Comparación entre alturas                         | Diferencias entre medias | Comparación MOE |
| 1-2                                               | 3503.3625                | Igual           |
| 1-3                                               | 8007.3375                | Diferente       |
| 2-3                                               | 4503.975                 | Igual           |

## Prueba de Fisher

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| Alfa                              | 0.05       |
| Grados de libertad del error      | 21         |
| Cuadrado medio del error          | 38112123.8 |
| Valor crítico del rango estudiado | 3.46680011 |
| Diferencia mínima significativa   | 6419.24985 |

*Tabla 19. Prueba de Fisher para MOE*

| Las comparaciones significativas al nivel de 0.05 |                          |                 |
|---------------------------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Comparación entre alturas                         | Diferencias entre medias | Comparación MOE |
| 1-2                                               | 3503.3625                | Igual           |
| 1-3                                               | 8007.3375                | Diferente       |
| 2-3                                               | 4503.975                 | Igual           |

Los métodos de Tukey y de Fisher proporcionan los mismos resultados para la comparación de pares de medias del MOE, lo que garantiza un análisis estadístico confiable. Como puede observarse en las tablas anteriores, solamente existe una diferencia estadística significativa del MOE entre las alturas 1 y 3.

## CAPÍTULO 8. DISCUSIÓN

### 8.1 Usos potenciales de la madera de *Pinus greggii*

El uso de cada madera varía dependiendo de la especie, densidad o su estructura interna. Estas variables determinan su idoneidad para las diferentes ocupaciones ya sea construcción, carpintería, etc. En el caso de la madera de pino, se describe como una madera blanda generalmente con una resistencia moderada. Para madera de coníferas, de uso estructural, se han reportado resistencias máximas en compresión paralela que van, aproximadamente de 27 a 55 MPa (Forest Products Laboratory, 2010).

Las maderas de coníferas ofrecen una resistencia mecánica que es suficiente para estructuras ligeras, las cuales, también se ven influenciadas por su contenido de humedad, densidad, posición radial y el tipo de madera, estas características convierten a las maderas de coníferas en maderas estructurales comunes en construcción, carpintería y desarrollo de productos.

De acuerdo a la bibliografía consultada el *P. patula* es una especie de alta resistencia cuyo uso principal es en la construcción o en la fabricación de durmientes, *P. pseudostrobus* es un pino de amplio empleo en donde su uso principal es en la elaboración de vigas, postes o aserrado, *P. ayacahuite* es de un uso versátil cuyo principal uso es para la elaboración de tableros y molduras.

Estas tres especies destacan como las principales coníferas empleadas para madera aserrada de México, sin embargo *P. patula* y *P. pseudostrobus* dominan el mercado estructural con madera de buena calidad y densidad además de resistencia.

Chicaiza (2022) menciona que *Pinus patula* es el que más se utiliza, ya que es una especie de amplia distribución en México. Sáenz *et al* (2011) reporta la aplicación del *Pinus pseudostrobus* para estructuras y materiales para construcción ligera, Musalem *et al* (2003) describe el uso del *Pinus ayacahuite* como un recurso multifuncional, destacando la madera aserrada.

Según Mendizabal-Hernandez *et al*, (2020) la madera de *pinus greggii* es usada localmente como madera para construcción o postes por su disponibilidad en algunas áreas y, aunque su madera es menos comercializada que otros pinos, es especialmente apreciada en los programas de restauración de suelos, por su buena adaptación a suelos con pocos nutrientes.

La madera de pino, también se utiliza para la fabricación de tarimas, en donde los elementos que están sometidos a cargas de compresión son los tacones de las mismas (Cruz de León, 2025). En tarimas estándar de 800 y 1000 kg, se utilizan 9 tacones por tarima (DICOTA, 2025).

En la tabla 20, se identifican los usos más comunes de las maderas de pino para cada una de las 4 especies mencionadas previamente, según la literatura.

Tabla 20. Usos de la madera de las tres especies de pino de la tabla 7,  
incluyendo *Pinus greggii*.

| <b>Uso</b>                   | <b><i>Pinus<br/>patula</i></b><br>(Pino llorón) | <b><i>Pinus<br/>pseudostrobus</i></b><br>(Pino lacio) | <b><i>Pinus<br/>ayacahuite</i></b><br>(Pino ayacahuite) | <b><i>Pinus<br/>greggii</i></b><br>(Pino prieto) |
|------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Construcción<br>general      | X                                               | X                                                     | X                                                       | X                                                |
| Muebles                      |                                                 | X                                                     | X                                                       |                                                  |
| Cajas,<br>cajones,<br>techos | X                                               |                                                       | X                                                       | X                                                |
| Tacones para<br>tarimas      | X                                               | X                                                     | X                                                       | X                                                |
| Aglomerado                   | X                                               | X                                                     |                                                         |                                                  |
| Postes, cercas               | X                                               | X                                                     | X                                                       | X                                                |
| Puertas                      |                                                 |                                                       | X                                                       |                                                  |
| Estructuras                  | X                                               | X                                                     |                                                         |                                                  |
| Durmientes                   | X                                               | X                                                     |                                                         |                                                  |
| Papel kraft                  | X                                               |                                                       |                                                         | X                                                |
| Tableros                     | X                                               | X                                                     | X                                                       | X                                                |
| Mango de<br>herramientas     |                                                 |                                                       |                                                         |                                                  |
| Carpintería                  |                                                 | X                                                     | X                                                       | X                                                |
| Artesanías                   | X                                               | X                                                     | X                                                       |                                                  |

## 8.2 Densidad básica y resistencia a la compresión

Como referencia, en la siguiente tabla, se muestran los valores de densidad básica y módulo de ruptura en compresión paralela a la fibra, de tres de las especies que se utilizan con mayor frecuencia para obtener madera aserrada en México, características de interés para este trabajo. En la presente tesis, se obtuvo una densidad básica promedio de 0.4346 gr/cm<sup>3</sup>.

Tabla 21. Densidad básica y módulo de ruptura paralela para la madera de tres especies de pino

| Propiedad                               | <i>Pinus patula</i><br>(Pino Ilorón)<br>(Yoza et al 2015) | <i>Pinus pseudostrobus</i><br>(Pino lacio)<br>(Sotomayor et al 2023) | <i>Pinus ayacahuite</i><br>(Pino ayacahuite)<br>(NOM-007-2003) | ESTA TESIS<br><i>Pinus greggii</i><br>(Pino Prieto)<br>(Coahuila, México) |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Densidad básica<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 0.50                                                      | 0.54                                                                 | 0.40                                                           | 0.4346                                                                    |
| MOR (MPa)                               | 46.1                                                      | 30.3                                                                 | 45.1                                                           | 56.4                                                                      |

### 8.3 Densidad y resistencia a la compresión para la madera de *Pinus greggii*.

En la literatura, se han reportado valores para la densidad y la resistencia a la compresión, específicamente para madera de *Pinus greggii* de diferentes edades.

Brown *et al.* (1952) reporta las propiedades mecánicas de *Pinus greggii* con valores de densidad de 0.48 g/cm<sup>3</sup> y esfuerzo máximo a la compresión paralela, MOR, de 258.83 kg/cm<sup>2</sup> (25.36 MPa). Sigala-Cerros *et al.* (2023) en ensayos de una plantación de *Pinus greggii* var *Australis* en el estado de Hidalgo con muestras de 19 años muestra densidades de 0.47 g/cm<sup>2</sup>, con un MOR en compresión paralela de 174 Kg/cm<sup>2</sup> (17.05 MPa). Para una plantación del estado de Durango, Moreno *et al* (2021) reportan dicho MOR, de 431.57 kgf/cm<sup>2</sup> (42.29 MPa).

La densidad, es una propiedad muy importante de la madera relacionada con el valor y utilidad de la misma (Gutiérrez *et al.*, 2010); depende directamente de la cantidad y tipo de elementos celulares que la constituyen (Martínez, 2005). El valor promedio de la densidad básica de la especie de *P. greggii* estudiada en este trabajo es de 0.4346 gr/cm<sup>3</sup>, sin embargo, Alba-Landa en el 2005 en un ensayo de genético de *P. greggii* del estado de Veracruz reportó una densidad básica, aproximada, de 0.33 a 0.42 g/cm<sup>3</sup>, Mendoza-Salas (2023), reportó una densidad básica para madera de dos plantaciones comerciales de *P. greggii* de Durango de 0.5059 gr/cm<sup>3</sup> y 0.3997 gr/cm<sup>3</sup>, de 11 y 7 años, respectivamente.

En la tabla 22, se muestran los valores mostrados previamente, incluyendo nuevamente, para propósito de comparación, los valores obtenidos en este trabajo para la madera de *Pinus greggii* del estado de Coahuila.



Tabla 22. Densidad básica y compresión paralela para madera de *Pinus greggii*

| Propiedad                                                       | Edad         | Densidad básica (g/cm <sup>3</sup> ) | Compresión paralela (MPa) |
|-----------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Brown et al 1952<br>(EEUU)                                      | No reportada | 0.48                                 | 25.36                     |
| Mendoza-Salas, 2023<br>(Durango, México)                        | 11 años      | 0.43                                 | <i>No reportada</i>       |
| Sigala-Cerros et al 2023<br>(Hidalgo, México)                   | 19 años      | 0.47                                 | 17.05                     |
| Alba-Landa et al. 2005<br>(Veracruz, México)                    | No reportada | 0.33-0.42                            | No reportada              |
| López-Locía y Valencia-Manzo<br>(Coahuila y Nuevo León, México) | No reportada | 0.47                                 | No reportada              |
| Moreno et al. 2021<br>(Durango, México)                         | 25 años      | <i>No reportada</i>                  | 42.29                     |
| Gómez-Ruiz. 2022<br>(Coahuila, México)                          | 29 años      | 0.42                                 | No reportada              |
| ESTA TESIS<br>(Coahuila, México)                                | 34 años      | 0.43                                 | 56.4                      |

## CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, no se cumple la hipótesis de investigación, es decir, el módulo de ruptura en compresión paralela no es función de la altura, para las alturas consideradas, Esto significa que la madera de la primer troza comercial en la base del fuste de *Pinus greggii* estudiado, que corresponde a esas tres alturas, presenta homogeneidad en cuanto a la propiedad mecánica en cuestión, encontrándose un valor medio de resistencia máxima a la ruptura, de 56.40 MPa.

El valor anterior del módulo de ruptura en compresión es mayor que el reportado en la literatura para *P. patula* y *P. pseudostrobus*, que tienen uso estructural, de tal forma, que la madera analizada en este trabajo puede tener, al menos, usos similares, como lo indica la tabla 20. Un valor de resistencia a la ruptura mayor a 49.03 MPa se clasifica como de muy alta resistencia (Rivero, 2004). Como se mencionó previamente, resistencias máximas en compresión paralela para madera de coníferas, de uso estructural, van aproximadamente de 27 a 55 MPa (Forest Products Laboratory, 2010).

En la literatura se reportan valores menores de resistencia a la ruptura en pruebas de compresión para madera de *Pinus greggii* que los obtenidos en este trabajo, de tal forma que solo se consideraba apta para construcciones ligeras. Lo anterior, contradice a lo obtenido en esta tesis. De esta forma, se puede recomendar extender el uso de la especie de estudio en este trabajo, también para uso estructural, al igual que las otras especies de pinos utilizados para tal fin.

Por otro lado, la norma que se utilizó para determinar la compresión paralela, también pide determinar la densidad, ya sea la densidad normal o la densidad básica. En este trabajo, se obtuvieron ambas. La densidad normal promedio

resultó de 0.4939 g/cm<sup>3</sup> y la densidad básica promedio, 0.4346 g/cm<sup>3</sup>. La densidad básica promedio reportada previamente para la misma plantación que se utilizó en este trabajo, había sido de 0.42 g/cm<sup>3</sup> (Gómez-Ruiz, 2022), por lo que el resultado obtenido en esta tesis es consistente con el obtenido en ese trabajo. En el análisis estadístico, se encontró una diferencia estadística significativa en la densidad normal promedio, para las tres diferentes alturas analizadas. En cambio, para la densidad básica no se encontraron dichas diferencias, lo cual también indica que se tiene una densidad uniforme en la zona de la primera troza comercial, en la base del fuste. Por su parte, no se observa una variación sistemática de la densidad de la madera de *Pinus greggii* como función de la edad.

En particular, los resultados obtenidos en este trabajo para el promedio del módulo de elasticidad en compresión paralela, muestran una variación considerable como función de la altura: en la primera altura fue de 19,035 MPa; en la segunda de 12,736 MPa y en la tercera de 8,282 MPa, lo cual fue confirmado por las pruebas de Tukey y de Fisher. En la literatura, se reporta que el MOE para coníferas se encuentra aproximadamente entre 7,000 y 13,000 MPa (Record, 1914), lo cual concuerda con lo obtenido para la segunda y tercera altura, pero el MOE de la primera altura, que corresponde a la base del fuste después del tocón, es considerablemente mayor. De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, no existe una diferencia estadística significativa entre el MOE de las alturas 1 y 2, ni de 2 y 3, solamente entre las alturas 1 y 3. Los datos anteriores tienen sentido físicamente, ya que la parte baja del fuste, en donde el MOE es mayor, es la que está sometida al mayor esfuerzo de compresión debido a que tiene que resistir el peso total del resto del árbol.

En la revisión específica de bibliografía sobre la compresión y densidad de *Pinus greggii*, se encuentran valores muy diferentes para el módulo de ruptura respectivo. Sin embargo, dichos valores también corresponden a madera obtenida de árboles con edades diferentes. Aparentemente, se observa que conforme aumenta la edad del árbol, aumenta considerablemente el módulo de ruptura en cuestión. Los árboles de mayor edad, son los de este trabajo, con 34 años de

edad, comparado con los otros, que son de 19 y 25 años. La resistencia a la ruptura de los árboles de 25 años es más del doble que la de 19 años y la de 34 años es aproximadamente 25% mayor que la de 25 años. La confirmación o rechazo de esta nueva hipótesis, requiere de mayor investigación.

También, queda pendiente el estudio de la resistencia mecánica a la flexión, que no pudo realizarse en el transcurso de este trabajo, debido a que se desconocía el manejo correcto de la máquina universal, requerido para tal fin. Este fue uno de los graves problemas desde el inicio, ya que la máquina no cuenta con manual de operación, y no se pudo conseguir. Por lo tanto, también uno de los objetivos de este trabajo fue la elaboración de un manual para la operación de la misma, lo que es una contribución adicional de esta tesis, pero se presentará en otro documento aparte de este. Las gráficas que la máquina proporcionaba por default, no eran las curvas típicas de esfuerzo deformación, sino carga contra velocidad. Para la resistencia a la compresión no hubo problema, porque la máquina proporcionaba curvas regulares y la carga máxima soportada por la probeta. Conociendo el área transversal de la misma, se pudo determinar la resistencia máxima soportada en compresión paralela a la fibra. En cambio, las gráficas que se obtenía para pruebas de flexión eran demasiado irregulares y no servían para dicho análisis. Al final de este trabajo se encontró la forma de que la máquina proporcionara curvas esfuerzo-desplazamiento y éstas ya resultaron regulares, tanto para compresión como para pruebas preliminares de flexión, que se realizaron. Se cambiaron todas las curvas previas para el caso de compresión paralela, a este nuevo formato. De esta forma, dividiendo el desplazamiento entre la longitud inicial de la probeta, se tiene la deformación y se pueden obtener las curvas esfuerzo-deformación. Esto permitió identificar en un número considerable de las gráficas, una pequeña zona inicial, claramente lineal lo que permitió determinar el MOE correspondiente reportado en los resultados de esta tesis.

En general, en la literatura se señala que son muy escasas las investigaciones sobre propiedades mecánicas de *Pinus greggii* (Sigala-Cerros et al 2023). La presente tesis hace una aportación al conocimiento sobre el tema.

## APÉNDICE A. MEDICIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD.

Como parte de las normas utilizadas se determinó el contenido de humedad y la densidad para corroborar que las piezas estudiadas se encontraran en las condiciones óptimas descritas según la norma para poder realizar las pruebas.

### Contenido de humedad

La determinación del contenido de humedad de la madera es común en procesos que demandan un control de la humedad, esto para lograr optimizar la calidad de los productos que se elaboran con ella (Zavala *et al.*, 1991). Para este estudio las probetas tuvieron un promedio de CH del 10.87%.

*Tabla 23. Cuadro del contenido de humedad obtenido para cada una de las alturas evaluadas*

| Contenido de humedad (%) |          |          |          |
|--------------------------|----------|----------|----------|
| Probetas                 | Altura 1 | Altura 2 | Altura 3 |
| 1                        | 11.7647  | 11.3402  | 10.7142  |
| 2                        | 11.1111  | 10.5691  | 10.8108  |
| 3                        | 10.6382  | 11.7647  | 11.1111  |
| 4                        | 11.5702  | 10.9375  | 11.0091  |
| 5                        | 10.7438  | 10       | 11.2068  |

|           |         |         |         |
|-----------|---------|---------|---------|
| 6         | 10.4838 | 10.4347 | 9.9173  |
| 7         | 10.9243 | 10.6194 | 10.6194 |
| 8         | 10.1562 | 10.8910 | 11.4754 |
| $\bar{X}$ | 10.9240 | 10.8196 | 10.8580 |
| s         | 0.5420  | 0.5484  | 0.4712  |

## APÉNDICE B. PROBLEMÁTICA EN ENSAYOS DE FLEXIÓN.

Previamente a la realización de las pruebas definitivas para la obtención de los resultados para este trabajo, se obtuvieron graficas anormales por ello se realizaron pruebas preliminares para determinar algún tipo de error o fallo.

A continuación, se muestra una de las gráficas obtenidas de las pruebas de flexión generada por la maquina universal.

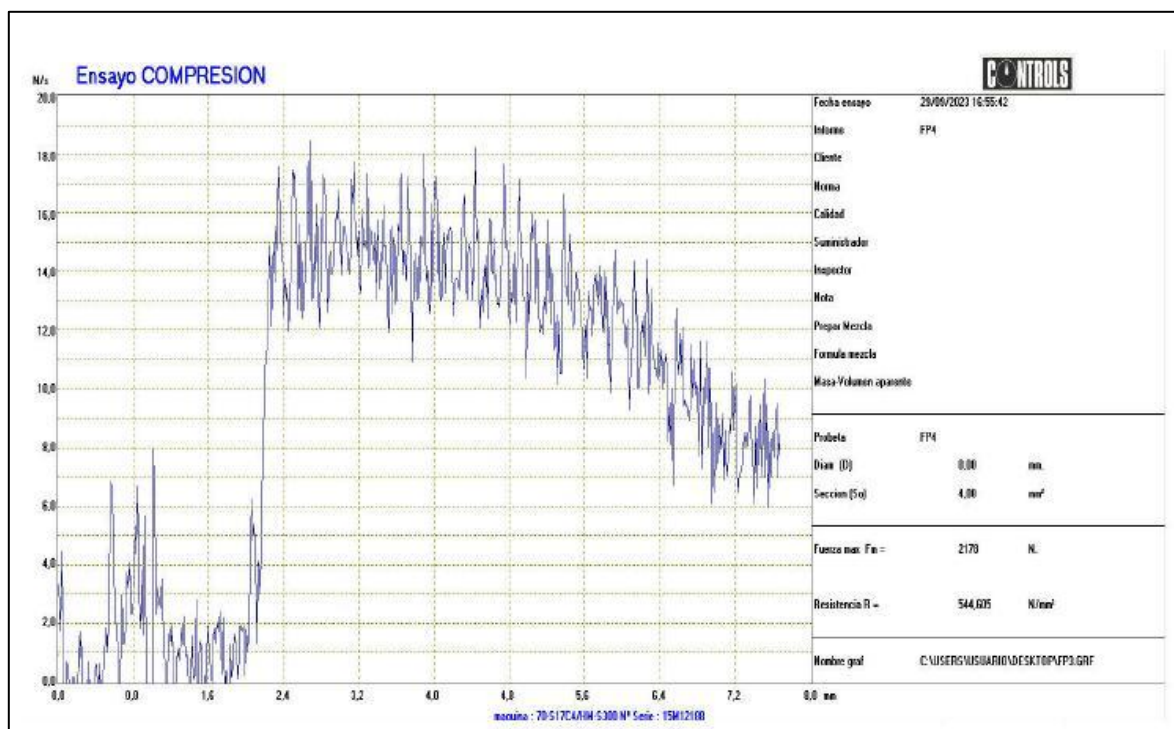


Figura 26. Gráfica de esfuerzo-deformación de flexión

Como puede observarse, las gráficas de flexión presentan considerables irregularidades, por lo que existe una anomalía en estas pruebas. Se ha realizado recientemente también pruebas de compresión diagonal en ensambles tipo L y se

han obtenido buenos resultados, al igual que en las pruebas de compresión aquí reportadas.

Por ello se decidió realizar algunas pruebas preliminares para ayudar a determinar el origen de las irregularidades en los gráficos (figura 26). Se realizaron 6 pruebas en probetas diferentes, sin embargo, en cada una de las gráficas resultaron tener los mismos resultados.

Se pensó, que se trataba de un problema con el accesorio de la máquina para las pruebas de flexión. Debido a eso, no se realizaron las pruebas de flexión establecidas para este trabajo, La máquina universal proporciona, por default, gráficas de carga contra velocidad, no las gráficas estándar de esfuerzo contra deformación. Al final de este trabajo, se encontró la forma en que la máquina proporcione curvas de esfuerzo desplazamiento. La deformación, se puede obtener dividiendo el desplazamiento entre la longitud inicial de la probeta. De esta forma, se pueden obtener las curvas esfuerzo-deformación. Todas las pruebas de resistencia a la compresión y las pruebas preliminares de resistencia a la flexión, se transformaron a este nuevo formato. De esta forma, las primeras curvas resultaron todavía más regulares y en las segundas, se resolvió el problema descrito previamente, resultando también curvas regulares. El estudio de resistencia mecánica a la flexión, para el que se tienen todas las probetas listas, queda pendiente



## APÉNDICE C. OTRAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE *Pinus greggii* Engelm.

Se determinaron también las propiedades físicas de contracción y expansión volumétricas, así como el punto de saturación de la fibra (PSF) para la madera utilizada en este trabajo. Para llevar a cabo el análisis de dichas propiedades se utilizaron las siguientes fórmulas:

### a) Determinación de la contracción volumétrica total de la madera

La contracción es el proceso mediante el cual la madera disminuye sus dimensiones al perder humedad

$$CV = 100 * \left( \frac{V_v - V_o}{V_v} \right)$$

Donde

- CV es la contracción volumétrica (%)
- $V_v$  es el volumen verde (cm<sup>3</sup>)
- $V_o$  es el volumen anhidro (cm<sup>3</sup>)

### b) La expansión volumétrica, o hinchamiento, se determinó mediante la formula

El hinchamiento de la madera es la expansión volumétrica o dimensional que experimenta una pieza de madera cuando absorbe humedad del ambiente

$$EV = \left( \frac{Ls - Lo}{Lo} \right) * 100$$

Donde

- *EV* es la expansión volumétrica (%)
- *Ls* es la longitud en estado saturado (mm)
- *Lo* es la longitud en estado anhidro (mm)

c) El punto de saturación de la fibra se calculó mediante la formula

El punto de Saturación de la fibra (PSF) es el contenido de humedad en el cual las paredes celulares de la madera están completamente saturadas de agua mientras que los lúmenes ya no contienen agua

$$PSF = \frac{\beta v}{0.9 * \rho_b}$$

Donde

- *PSF* es el Punto de saturación de la fibra (%)
- $\beta v$  es a la contracción volumétrica (%)
- $\rho_b$  es la densidad básica (g/cm<sup>3</sup>)

En la siguiente tabla, se muestran las propiedades físicas promedio determinadas para las muestras de madera de *Pinus greggii* de una plantación del estado de Coahuila fueron la Densidad básica, la contracción, expansión y el PSF.

| Propiedades físicas | Media   |
|---------------------|---------|
| CV %                | 10.0851 |
| EV %                | 11.2465 |
| PSF %               | 25.8203 |

Contracción volumétrica (CV), expansión volumétrica (EV) y Punto de Saturación de la Fibra (PSF) para madera de *Pinus greggii* Engelm.

Al conocer los valores de las propiedades físicas anteriormente mostradas se nos permite determinar las características de dicha madera y anticipar cambios dimensionales, como se puede observar en el caso de la compresión e hinchamiento ayudando a predecir las deformaciones y movimientos dimensionales, para la selección de madera y la prevención de fallas mecánicas.

## BIBLIOGRAFÍA

Acevedo M.J. 2019. Ensayo de tracción de probetas metálicas. Tesis de licenciatura. Universidad Tecnológica de Bolívar. Programa de Ingeniería Civil.

Aguilera, R. M. 2001. *Pinus greggii* Engelm. SIRE-Paquetes Tecnológicos *Pinus greggii*. Comisión Nacional Forestal. Obtenido de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/961Pinus%20greggii.pdf>. (2001).

Aguirre C., O., A. 2015. Manejo forestal en el siglo XXI. Revista Madera y Bosques. 21, núm especial. Pp. 17-28.

Alba-Landa, J., Ramírez-García, E.O, & Santos-Salinas, J.A. 2005. Variación de la densidad de la madera de *Pinus greggii* Engelm. de un ensayo genético establecido en Coatepec, Veracruz, México. Foresta Veracruzana, 7 (1), 37 - 40.

Aragón M. 2020. "Arteaga, Coahuila. Mosaico de Lugares y Paisajes" Pueblos Mágicos Una visión interdisciplinaria. Volumen V. p 73-90

Ariete-Merino, N. 2010. Caracterización de madera de *Pinus radiata* D. Don sometido a un proceso de modificación térmica usando un ambiente de inmersión. Tesis de Licenciatura. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales.

ASTM D 2395-02. 2002. Norm American Society for Testing and Materials. Forest Products Laboratory. Forest Service, U.S.

Azamar O., M., J. López U., J. J. Vargas H. y A. Plancarte B. 2000. Evaluación de un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* y su conversión a huerto semillero. Memorias del 1er. Congreso Nacional de Reforestación. Programa Nacional de Reforestación-Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx.7 p.

Bada B. 2014. Análisis de la situación y problemática de la apicultura en el municipio de Arteaga, Coahuila. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Beer F. P., Johnston E., Dewolf J. Y Mazurek D. 2009. Mecánica de Materiales. Quinta edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. De C.V. México.

Brown, H., Panshin, A., & Forsaith, C. 1952. Textbook of Wood Technology, Volume II: The Physical Mechanical and Chemical Properties of the Comercial Woods of the United States (First edition). Mc Graw-Hill Book Company, New York, Toronto, London.

Bruce D. 1982. Butt Log Volume Estimators. Forest Science 28(3):489-503.

Campos A. 1989. Propiedades físico-mecánicas de postes de pino radiata crecidos en Chile. Ciencia e Investigación Forestal. Vol 3. No. 6. Pag 99-108

Castro, G.; Fragnelli, G. 2006. New technologies and alternative uses for poplar wood. Boletín Informativo CIDEU: 27-36.

Chicaiza M. 2022. Comparación de las propiedades físicas y mecánicas entre las especies arbóreas estudiadas: Platuquero, Pino caribe y Pino patula. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Chimborazo. Ecuador.

Cruz de León, J. 2025. Comunicación personal.

Darrow, WK y H. Coetzee. 1983. Potentially valuable Mexican pines for the summer rainfall regions of southern Africa. South African For. Jour. No. 124:23

Dávalos-Sotelo R. 2022. Perspectivas para productos forestales en México. Instituto de Ecología. Portal de Comunicación Veracruzana.

Davel, M. M., Jovanovski, A., & Mohr Bell, D. 2005. Densidad básica de la madera de pino oregon (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) y su relación

con las condiciones de crecimiento en la Patagonia Andina, Argentina. Bosque (Valdivia), 26(3), 55-62

Dicota. 2025. Medidas de Tarimas estándar reciclada. URL: <https://tarimasdicota.com.mx/medidas-de-tarimas-estandar-reciclada/>

Donahue, JK y J. López-Upton. 1996. Variación geográfica en morfología de hojas, conos y semillas de *Pinus greggii* en bosques nativos. Ecol. Gestión. 82: 145-157

Drozдов y Nikulin. 1983. Estudio de Materiales Eléctricos. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba.

Dulos P. 1875. Cours de mécanique à l'usage des écoles d'arts et métiers et de l'enseignement spécial des lycées. Partie I. Francia. Bibliothèque nationale de France, département Sciences et techniques.

Dvorak, WS, JE Kietzka y JK Donahue. 1996. Supervivencia y crecimiento a tres años de procedencias de *Pinus greggii* en los trópicos y subtrópicos. Ecología y Manejo Forestal 83: 123-131.

Dvorak, WS, JE Kietzka, JK Donahue, GR Hodge y TK Stanger. 2000. *Pinus greggii*. Págs. 52-73. Conservación y evaluación de especies arbóreas de bosques tropicales y subtropicales por la Cooperativa CAMCORE. Raleigh, Carolina del Norte: Facultad de Recursos Naturales, NCSU.

Figueroa C., Ordoñez U., Fumero A., Carvajal J. 2019. Comportamiento Mecánico de los Materiales. Monografía. Universidad Tecnológica de la Habana. Cuba.

Fitzgerald R. 2015. Mecánica de materiales. Editorial Alfaomega.

Forest Products Laboratory. 2010. Wood handbook: wood as an engineering material (General Technical Report FPL-GTR-190) U.S. Department of Agriculture, Forest, Service Forest products laboratory.

García E. 1964. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. México DF. p 96.

Gere J., Goodno B. 2016. Mecánica de Materiales. Octava edición. Cengage Learning Editores, SA de CV. México.

Gobierno de la república. 2014. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Programa Nacional Forestal.

Gómez-Ruiz M. L., 2022. Propiedades de la madera de *Pinus greggii* Engelm. de una plantación en el sureste del estado de Coahuila. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Gutiérrez-Vázquez B. N., Gómez-Cárdenas M., Valencia Manzo S., Cornejo Oviedo E. H., Prieto Ruiz J. A., Gutierrez Vazquez M. H. 2010. Variación de la densidad de la madera en poblaciones naturales de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. Del estado de Chiapas, México. Revista Fitotecnica Mexicana 33 (4): 75-78.

Instituto Nacional de Información Estadística y Geografía. 2010. Conjunto de datos vectoriales. Serie V. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx>

Instituto Nacional de Información Estadística y Geografía. 1983. Síntesis geográfica de Coahuila. Disponible en: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220952/702825220952\\_12.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220952/702825220952_12.pdf)

Instituto Nacional de Información Estadística y Geografía. 1995. Atlas agropecuario: Coahuila. Disponible en: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825117054/702825117054\\_12.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825117054/702825117054_12.pdf)

International Organization for Standardization (ISO). 2012. Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens. Second edition. ISO 3129:2012.

International Organization for Standardization (ISO). 1975. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. First edition. ISO 3130:1975.

International Organization for Standardization (ISO). 1975. Determination of density for physical and mechanical test. First edition. ISO 3131:1975.

International Organization for Standardization (ISO). 1975. Determination of modulus of elasticity in static bending. First edition. ISO 3349:1975.

International Organization for Standardization (ISO). 1976. Test methods- Determination of ultimate stress in compression parallel to grain. First edition. ISO 3787:1976.

Jiménez J., Fernández J., Suarez F., Carazo J. 2020. Fundamentos de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Editorial Paraninfo. México.

Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable [L.G.D.F.S.], Actualizada, Diario Oficial de la Federación [DOF] 5 de junio del 2018, México.

López-Locía M., Valencia-Manzo S. 2001. variación de la densidad relativa de la madera de *Pinus greggii* Engelm. del norte de México. Madera y Bosques 7(1):37-46.

Martínez, M. 1948. Los Pinos Mexicanos. Segunda edición. Ediciones Botas. México. Pag 431

Martínez. J., Borja de la Rosa, A. 2005. Características tecnológicas de la madera de palo morado (*Peltogyne mexicana* Martínez) de Tierra Colorada, Guerrero, México. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 11(1):78-82.

Mendizabal-Hernandez L; Alba-Landa J; Márquez J; Ramirez-García E; Cruz H; Martinez N. 2020. Crecimiento vegetativo de *Pinus greggii* Engelm. en cerro de león, villa aldama, Veracruz, México. Foresta Veracruzana. 22.(1): 17-24.



Mendoza-Salas, W. L. 2023. Propiedades Físicas de la Madera de *Pinus greggii* Engelm. Provenientes de Plantaciones Forestales Comerciales en Dos Localidades de Durango. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo Coahuila, México.

Moreno J; Ríos-Saucedo J; Rascón J; Graciano J; Carrillo; Valenzuela L. 2021. Evaluación físico-mecánica y elaboración de pellets. Agrofaz Journal of Enviromental and Agroecological Sciences. 3(1): 35-45

Moya, R. & Arce, V. 2003. Efecto del espaciamiento en plantación sobre dos propiedades físicas de madera de teca a lo largo del fuste. Madera y Bosques, 9(2), 15-27.

Muñoz H., Saenz J., García J., Hernandez E., Anguiano J. 2011. Áreas potenciales para establecer plantaciones forestales comerciales de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus greggii* Engelm en Michoacán. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. Vol 2. Núm 5. p 29-44

Musálem M. A. 2006. Silvicultura de plantaciones forestales comerciales. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. México.

Musálem, M. A., Luis, R. (2003). Monografía de *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* Shaw. México, DF: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Pecuarías.

Norma Oficial Mexicana (NOM) 007-ARTF-2023. 2023. Sistema Ferroviario-Infraestructura-Durmientes de Madera-Suministro, Impregnación e Inspección. Apéndice 3.

Ortega, E.F. 1989. Estructuras Biológicas de la Madera. Manual para el Diseño de Estructuras de Madera. Instituto de Ecología. A.C. Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera. Xalapa, Ver. 27-28 pp.

Pandey D., Brown C., 2002. Una visión general de los recursos mundiales de teca y de los elementos que influyen en sus perspectivas de futuro, Unasylva No. 201, Vol 51: 3-13.

Ramirez-Herrera, C., J. J. Vargas-Hernandez, J. López-Upton. 2005. Distribución conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. Acta botánica mexicana 72: 1-16

Record S. J., 1914. The Mechanical Properties of Wood. Project Gutenberg, firsth edition. USA.

Rocha, M. F. V.; Veiga, T. R. L. A.; Soares, B. C. D.; Araújo, A. C.; Carvalho, A. M.; Hein, P. R. G. 2019. Do the Growing Conditions of Trees Influence the Wood Properties?. Floresta e Ambiente, 26(3).

Roussy, L., Keil, G., Refort, M., Iaconis, A. & Abedini, W. (2013). Propiedades tecnológicas de la madera de *Citharexylum montevidense* (Spreng.) Mol. "Espina de bañado". Quebracho. Revista de Ciencias Forestales, **21**(1-2), 58-66.

Rivera J. G. 2023. Resistencia de Materiales. Libro Interactivo para Ingenieros. Red Educativa Digital Descartes. Córdoba, España.

Rivero, J. 2004 Propiedades Físico-Mecánicas de *Gmelina arborea* Roxb. y *Tectona grandis* Linn. F. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos16/gmelina-arborea/gmelina-arborea.shtml#top>.

Sáenz J; Muñoz H; Rueda A. 2011. Especies promisoras de clima templado para plantaciones forestales comerciales en Michoacán. Instituto Nacional de Investigaciones forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.

Salazar T.J. 2007. Resistencia de Materiales Básica para Estudiantes de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. I.S.B.N 978-958-8280-08-0

Sigala-Cerros, C. L., Suárez-Islas, A., Prieto-Ruíz, J. Ángel., Carrillo-Parra, A., Domínguez-Calleros, P. A., Goche Télles, J. R. (2023). Propiedades físico-

mecánicas de la madera de *Pinus greggii* var. *australis* de una plantación en Hidalgo, México. *Ciencia & Investigación Forestal*, 29(2), 51–62.

Singer F., Pytel A. 1994. *Resistencia de Materiales*. Cuarta edición. Alfaomega. México.

Sotomayor J.R; Macedo I; Zárate J. 2023. Módulo de rigidez de especies de madera de importancia comercial para México: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*. *Manglar*. 20(3): 211-219.

Vazquez-Cisneros I., J. A. Prieto-Ruiz, M. A. López-López, C. Wehenkel, P. A. Dominguez-Calleros, F. E Muñoz-Sáez. 2018. Crecimiento y supervivencia de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. Var. *greggii* bajo diferentes tratamientos de fertilización. *Revista Chapingo Serie de Ciencias Forestales y del Ambiente* Vol XXIV, núm. 2: 251- 264.

Vázquez C. J. Y. 2018. *Pinus greggii*: características, distribución y ciclo de vida. Lifeder. Obtenido de: <https://www.lifeder.com/pinus-greggii/>.

Vela M. R. 2002. *Sobrevivencia, crecimiento y arquitectura de copa en una prueba de progenie de Pinus greggii Engelm en el CAESA, Arteaga Coahuila*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo Coahuila. 64 p.

Young T. 1807. *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*. Londres.

Yoza L; Bradit E; Acevedo M. 2015. Caracterización de las propiedades físico mecánicas de especies, pino (*pinus patula*) y tornillo (*cedrelinga cateniformis*) provenientes del Perú utilizando técnicas no destructivas. *Anales Científicos*. 76 (1): 12-16.

Zavala-Zavala D., Hernández Cortes M. R. 1991. Interrelación de la determinación del contenido de humedad de la madera por desecación y con medidores de humedad. *Revista Ciencia Forestal en México*. 16(70): 109:131

# Wendy Lizeth Mendoza Salas

## Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra, de madera de Pinus greggii Engelm, de una plantación e...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:533853513

Fecha de entrega

28 nov 2025, 1:07 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

28 nov 2025, 1:20 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra, de madera de Pinus greggii Eng....pdf

Tamaño del archivo

2.0 MB

89 páginas

15.500 palabras

87.563 caracteres

# 20% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

## Fuentes principales

- 19%  Fuentes de Internet
- 8%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

# Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

| Datos del manuscrito que se presenta a revisión |                                                                                                                                                           |                                   |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Programa educativo                              | Mestria en Ciencias y Tecnología de la Madera                                                                                                             |                                   |
| Título del trabajo                              | Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra, de madera de Pinus greggii Engelm, de una plantación experimental de Arteaga, Coahuila. |                                   |
|                                                 | Nombre                                                                                                                                                    | Correo electrónico                |
| Autor/es                                        | Wendy Lizeth Mendoza Salas                                                                                                                                | 2348967b@umich.mx                 |
| Director                                        | Dr. Gildardo Cruz de León                                                                                                                                 | gcruzl@umich.mx                   |
| Codirector                                      |                                                                                                                                                           |                                   |
| Coordinador del programa                        | M.C. Abril Munro Rojas                                                                                                                                    | mae.cs.tecnologia.madera@umich.mx |

| Uso de Inteligencia Artificial |             |                                        |
|--------------------------------|-------------|----------------------------------------|
| Rubro                          | Uso (sí/no) | Descripción                            |
| Asistencia en la redacción     | Si          | Ayuda para la búsqueda de bibliografía |

# Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



| Uso de Inteligencia Artificial             |             |                                         |
|--------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------|
| Rubro                                      | Uso (sí/no) | Descripción                             |
| Traducción al español                      | Si          | Traducción de archivos de otros idiomas |
| Traducción a otra lengua                   | No          | No se requirio                          |
| Revisión y corrección de estilo            | No          | No se utilizó                           |
| Análisis de datos                          | No          | Se utilizó un software especializado    |
| Búsqueda y organización de información     | Si          | Busqueda de bibliográfica               |
| Formateo de las referencias bibliográficas | No          | No se utilizó                           |
| Generación de contenido multimedia         | No          | No se utilizó                           |
| Otro                                       | No          | Ninguno                                 |

| Datos del solicitante |                                                                                                                |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nombre y firma        | Wendy Lizeth Mendoza Salas  |
| Lugar y fecha         | Morelia, Michoacan<br>25 de noviembre de 2025                                                                  |