



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

1

Comparación de la transición microestructural del duramen en *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa* en función de la edad y sus efectos en las propiedades físico – mecánicas de la madera

Velín Tamayo, Anahí Dayanara

Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería en Biotecnología

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Biotecnología

Debut, Alexis Patrice Martial Ph.D

Agosto 2020



Urkund Analysis Result

Analysed Document: TESIS URKUND - VELIN ANAHI.docx (D77875593)
Submitted: 8/17/2020 10:51:00 PM
Submitted By: apdebut@espe.edu.ec
Significance: 3 %

Sources included in the report:

Article-Eucalypto-Globulus-Mejia-y-Barrigas.docx (D25275402)
Article-Eucalypto-Globulus-Mejia-y-Barrigas.docx (D25254309)
TESIS - corregida.docx (D26674090)
Paper-Chanul.docx (D25256318)
<https://core.ac.uk/download/pdf/250103579.pdf>
<https://carlostorralvo.blogspot.com/2015/>

Instances where selected sources appear:

8

Firma:



Debut, Alexis Patrice Martial Ph.D

C.C. 1725238297



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Comparación de la transición microestructural del duramen en *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa* en función de la edad y sus efectos en las propiedades físico – mecánicas de la madera**” fue realizado por la señorita **Velín Tamayo, Anahí Dayanara** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de agosto de 2020

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**ALEXIS
PATRICE
MARTIAL DEBUT**

Debut, Alexis Patrice Martial Ph.D

C.C. 1725238297



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

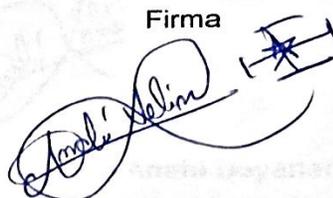
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Velín Tamayo, Anahí Dayanara**, con cédula de ciudadanía n° 1600387201, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Comparación de la transición microestructural del duramen en *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa* en función de la edad y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas de la madera”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 18 de agosto de 2020

Firma



Firma

Velín Tamayo, Anahí Dayanara

C.C.: 1600387201



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Velin Tamayo, Anahí Dayanara**, con cédula de ciudadanía n° 1600387201, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Comparación de la transición microestructural del duramen en *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa* en función de la edad y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas de la madera”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 18 de agosto de 2020

Firma

Velin Tamayo, Anahí Dayanara

C.C.: 1600387201

Dedicatoria

Para ti mi pequeña ciudadana.

Siempre estarás en mi memoria y mi corazón,

Gracias, por tanto.

Agradecimientos

A ti madre querida, que siempre has estado a mi lado a pesar de la distancia, gracias por creer en mí y enseñarme, que puedo lograr lo que sea que me proponga. Soy todo lo que soy gracias a tu entrega y dedicación, eres la mejor madre que la vida me pudo dar, espero que te sientas orgullosa.

Gracias a ti pequeñita, por darme fortaleza en cada momento de mi vida y por mostrarme siempre con tu ejemplo que una mujer fuerte nunca se deja vencer por nada.

A ti Christopher que eres mi complemento en cada sentido, gracias por cada detalle y cada palabra de aliento y por obligarme a encontrar la motivación cuando ya no podía más. Gracias por tu amor incondicional.

A mis mejores amigos: Kelito, Matty, Alex y Pancho son la mejor familia con la que me ha premiado el destino; gracias por permanecer junto a mí, escuchando mis berrinches y mis quejas, pero, sobre todo, ayudándome a encontrar el camino de vuelta cuando sentía que perdía el norte. Son mi brújula en la adversidad.

A ti morenita, por ser la mejor compañía en esas largas noches y amanecidas, gracias por darle luz a mis días.

A usted doc Alexis, gracias por la confianza y la paciencia; por permitirme formar parte de su laboratorio y guiarme en cada duda y experiencia.

A ti Karlita, por tu amistad y tus enseñanzas, gracias por ayudarme a cambiar de perspectiva y mostrarme que el mundo es mejor de lo que yo creía.

A usted doctor Mauricio, por ser un ejemplo de vida, gracias por su iniciativa para iniciar este proyecto y por ser siempre el mejor guía. Hua Lun, Andy y Carlos gracias por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

Índice de contenidos

Dedicatoria	6
Agradecimientos.....	7
Índice de contenidos.....	8
Índice de tablas	11
Índice de figuras	12
Listado de abreviaturas	14
Resumen.....	15
Abstract	16
Capítulo I.....	17
Introducción.....	17
Antecedentes.....	17
Justificación del problema.....	17
Objetivos de la investigación.....	18
Objetivo General	18
Objetivos Específicos	18
Hipótesis	19
Capítulo II.....	20
Revisión bibliográfica.....	20
Plantas leñosas	20
Angiospermas	20

Gimnospermas	20
Madera	21
Planos de la madera.....	21
Albura.....	21
Duramen	22
Componentes relevantes.....	22
Caracterización microscópica	23
Propiedades mecánicas	24
Capítulo III.....	27
Materiales y métodos	27
Selección de árboles y muestreo	27
Ablandamiento de muestras de madera.....	30
Ablandamiento de muestras de Eucalyptus globulus.....	31
Ablandamiento de muestras de Cupressus macrocarpa.....	31
Preparación de muestras para observación en SEM	32
Análisis microestructural	33
Caracterización Físico – Mecánica	35
Densidad y contenido de humedad.....	35
Rigidez y resistencia a la compresión	36
Rigidez y resistencia a la flexión	38
Análisis estadístico	40

	10
Capítulo IV	41
Resultados	41
Caracterización microscópica	41
Vasos	42
Células de parénquima longitudinal y traqueidas longitudinales	44
Células de parénquima radial	47
Densidad y contenido de humedad.....	49
Rigidez y Resistencia a la compresión.....	51
Rigidez y Resistencia a la flexión.....	52
Capítulo V	55
Discusión.....	55
Análisis microscópico.....	55
Propiedades mecánicas.....	56
Capítulo VI	59
Conclusiones y recomendaciones	59
Conclusiones	59
Recomendaciones	61
Bibliografía	62
Anexos	66

Índice de tablas

Tabla 1. Estimación de edad según la relación altura-perímetro de los árboles	28
Tabla 2. Comparación de redondez y esfericidad de las células de parénquima longitudinal y traqueidas longitudinales de <i>Eucalyptus globulus</i> y <i>Cupressus macrocarpa</i> por grupo de edad.....	47
Tabla 3. Comparación de esfericidad y redondez de las células de parénquima radial y traqueidas radiales de <i>Eucalyptus globulus</i> y <i>Cupressus macrocarpa</i> por grupo de edad.....	49
Tabla 4. Densidades básicas y contenidos de humedad por grupo de edad de <i>Eucalyptus globulus</i> y <i>Cupressus macrocarpa</i>	50
Tabla 5. MOR y MOE promedio por grupo de edad de las muestras de <i>Eucalyptus globulus</i> y <i>Cupressus macrocarpa</i> ensayadas en el modo de compresión. ...	51
Tabla 6. MOR y MOE promedio por grupo de edad de las muestras de <i>Eucalyptus globulus</i> y <i>Cupressus macrocarpa</i> ensayadas en el modo de flexión.	53

Índice de figuras

Figura 1. Comparación visual entre redondez y esfericidad.....	24
Figura 2. Obtención de muestras in situ.....	27
Figura 3. Muestras de <i>Eucalyptus globulus</i> para los ensayos de caracterización	29
Figura 4. Muestras de <i>Cupressus macrocarpa</i> para los ensayos de caracterización ..	29
Figura 5. Proceso de ablandamiento de muestras de madera	32
Figura 6. Preparación de muestras para observación en SEM.	33
Figura 7. Análisis microestructural de una muestra de <i>Cupressus macrocarpa</i>	34
Figura 8. Equipos para ensayo de densidad básica y contenido de humedad	36
Figura 9. Ensayo de compresión	37
Figura 10. Ensayo de flexión	39
Figura 11. Esquema microestructural de la madera.....	41
Figura 12. Cortes transversales, tangenciales y radiales de <i>Eucalyptus globulus</i> y <i>Cupressus macrocarpa</i>	42
Figura 13. Transición microestructural de los vasos en cortes transversales de <i>Eucalyptus globulus</i>	43
Figura 14. Análisis estadístico de la transición microestructural de los vasos en muestras de <i>Eucalyptus globulus</i>	44
Figura 15. Transición microestructural del parénquima longitudinal y las traqueidas longitudinales en cortes transversales de <i>Eucalyptus globulus</i> y <i>Cupressus macrocarpa</i>	45
Figura 16. Análisis estadístico de densidad y área en base a la transición microestructural del parénquima longitudinal y traqueidas longitudinales en muestras de <i>Eucalyptus globulus</i> y <i>Cupressus macrocarpa</i>	46

Figura 17. Transición microestructural del parénquima radial y las traqueidas radiales en cortes tangenciales de <i>Eucalyptus globulus</i> y <i>Cupressus macrocarpa</i> .48	
Figura 18. Densidad básica vs. contenido de humedad por grupo de edad50	
Figura 19. Muestras verdes ensayadas bajo el modo de compresión52	
Figura 20. Muestras verdes ensayadas bajo el modo de flexión54	
Figura 21. Incremento en el espesor de la pared celular de los vasos y su influencia en la resistencia del tejido de <i>Eucalyptus globulus</i>58	

Listado de abreviaturas

SEM: Scanning Electron Microscopy (Microscopía electrónica de barrido)

MOE: Modulus of Elasticity (Módulo de elasticidad)

MOR: Modulus of Rupture (Módulo de ruptura)

COMP: Compresión

FLEX: Flexión

UTM: Universal Test Machine

CH: Contenido de humedad

J: juvenil

M: maduro

S: senil

Db: densidad básica

Dv: densidad verde

Pv: peso verde

Ps: peso seco

Vv: volumen verde

R: redondez

E: esfericidad

Requiv: radio equivalente

Rcicuns: radio circunscrito

Resumen

La madera es un recurso ampliamente conocido y explotado por la humanidad. Es una de las materias primas de mayor preferencia por sus notables ventajas, ya que es un material: sostenible, versátil, renovable, resistente y reciclable. El uso extendido de este elemento en los más variados ámbitos, hace necesario que se profundice en el conocimiento de sus propiedades para optimizar su rendimiento. El objetivo de este estudio es identificar las características anatómicas y mecánicas de dos tipos de madera representativas (madera dura y madera blanda) de interés industrial, para establecer la relación entre la microestructura del tejido en cada grupo de edad y su influencia en el desempeño mecánico. Se muestrearon y analizaron 6 árboles (3 por especie) de *Eucalyptus globulus* (madera dura) y *Cupressus macrocarpa* (madera blanda) para determinar las transiciones del tejido por grupo de edad (juvenil, maduro y senil) en términos de densidad, área, redondez y esfericidad de las microestructuras presentes. Los resultados del análisis microscópico se contrastaron con las propiedades físico-mecánicas correspondientes: densidad verde, contenido de humedad, módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) de cada especie. A partir de los datos analizados se concluyó que los tejidos se vuelven más rígidos y mecánicamente resistentes con la edad lo que se encuentra relacionado con el incremento progresivo de las paredes celulares a medida que el tejido envejece; además de esto, la madera de eucalipto presentó mayor resistencia mecánica que el ciprés lo que es una consecuencia intrínseca de la configuración microestructural de cada especie.

Palabras clave

- **EUCALYPTUS GLOBULUS (EUCALIPTO);**
- **CUPRESUS MACROCARPA (CIPRÉS);**
- **MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO**

Abstract

Wood is a widely known and exploited by humanity resource. It is one of the most preferred raw materials for its notable advantages, since it is a: sustainable, versatile, renewable, resistant and recyclable material. The extended use of this element in the most varied areas, makes it necessary to deepen the knowledge of its properties to optimize its performance. The objective of this study is to identify the anatomical and mechanical characteristics of two representative types of wood (hardwood and softwood) of industrial interest, to establish the relationship between the microstructure of the tissue in each age group and its influence on mechanical performance. Six trees (3 per species) of *Eucalyptus globulus* (hardwood) and *Cupressus macrocarpa* (softwood) were sampled and analyzed to determine tissue transitions by age group (juvenile, mature and senile) in terms of density, area, roundness and sphericity of the microstructures. The results of the microscopic analysis were contrasted with the corresponding physical-mechanical properties: green density, moisture content, modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of each species. From the analyzed data, it was concluded that the tissues become more rigid and mechanically resistant with age, which is related to the progressive increase in cell walls as the tissue ages; In addition to this, eucalyptus wood presented greater mechanical resistance than cypress, which is an intrinsic consequence of the microstructural configuration of each species.

Keywords

- **EUCALYPTUS GLOBULUS (EUCALYPTUS);**
- **CUPRESUS MACROCARPA (CYPRESS);**
- **SCANNIN ELECTRON MICROSCOPY (SEM)**

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

La madera es un material de alta complejidad formado por diversos tipos de células especializadas que forman tejidos; sus propiedades y características dependen directamente de su composición y constitución. El estudio de las particularidades que presenten estos elementos en cuanto a forma y distribución nos permite comprender el comportamiento de este valioso recurso (Nutsch, 2000).

Cabe resaltar que la madera no es un material de construcción preconcebido por el hombre; al ser de origen vegetal cumple el objetivo de facilitar el crecimiento y supervivencia de la planta, sin embargo, debido a sus ilimitadas aplicaciones y valioso desempeño, ha venido siendo utilizada como material estructural desde hace miles de años. En el campo de la construcción, la madera requiere de poco gasto energético, transporte y puesta en obra; es ligera, posee alta resistencia, tiene un comportamiento predecible, y además constituye un recurso renovable por lo que se sigue utilizando como un componente importante en el diseño de estructuras (Osorio, Garzon, & Jimenez, 2014).

Justificación del problema

Las transiciones a nivel microscópico que sufre la madera están directamente relacionadas con su comportamiento mecánico por lo que se vuelve indispensable para su utilización, la caracterización de estas propiedades de manera que se logre optimizar su uso mediante el conocimiento exacto del rendimiento en cada etapa de desarrollo según la aplicación deseada. Además, puede constituirse como el punto de partida para

el desarrollo de nuevos materiales sintéticos utilizando herramientas de biomimética (Speck & Burgert, 2011).

La relación forma-estructura-función de diferentes especies de madera ha sido ampliamente estudiada, sin embargo, tales estudios no logran determinar completamente la influencia de cada nivel de estructura jerárquica en las propiedades y potenciales aplicaciones de estos materiales biológicos. El conocimiento detrás de estas características puede conducir a un enorme conjunto de inventos y soluciones fascinantes que revolucionarán las tendencias industriales y comerciales (Knippers & Speck, 2012).

Los resultados de esta investigación permitirán comprender mejor la influencia de la microestructura del tejido de la madera en el rendimiento biomecánico de las especies estudiadas; además, proporciona generadores de conceptos para posibles aplicaciones de ingeniería.

Objetivos de la investigación

Objetivo General

Comparar la transición microestructural del duramen en *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa* en función de la edad e identificar sus efectos en las propiedades físico -mecánicas de la madera.

Objetivos Específicos

- Establecer un protocolo de preparación aplicable en microscopía electrónica de barrido para muestras de madera de *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa*.

- Identificar las microestructuras relevantes presentes en el duramen de *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa* mediante microscopía electrónica de barrido.
- Estudiar las transiciones microestructurales del duramen de *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa* mediante la medición microscópica de sus componentes más relevantes.
- Determinar las propiedades físico – mecánicas de la madera de *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa* mediante ensayos de compresión y flexión.

Hipótesis

Las diferencias microestructurales del duramen en *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa* relacionadas con la edad influyen en las propiedades físico – mecánicas de la madera.

Capítulo II

Revisión bibliográfica

Plantas leñosas

Las plantas leñosas son aquellas que contienen lignina, un compuesto orgánico que impregna y une las células y las fibras de ciertas plantas y cuyos tejidos están organizados de manera que toman las características de la madera. Con raras excepciones, las plantas leñosas son perennes. Los árboles, arbustos y algunas plantas trepadoras constituyen las principales leñosas (Jímenez & Muschler, 1999).

Angiospermas

Son plantas con flores cuyas semillas están encerradas en una estructura llamada ovario, y presentan hojas anchas, la madera de estas especies es altamente porosa por la presencia de gran cantidad de vasos y se las conoce como maderas duras. Tienen mayor diversidad celular en cuanto a tamaño, proporción y orientación que se debe a las grandes diferencias entre especies. Como consecuencia de estas variaciones pueden encontrarse maderas fuertes y pesadas como el eucalipto, en contraste con las suaves y ligeras como la balsa (Maquívar, 2018).

Gimnospermas

Son plantas sin flores cuya semilla nace sin protección en las superficies desnudas de las escamas de los conos o de estructuras semejantes; se las conoce como coníferas ya que sus hojas tienen forma acicular, esto es, delgadas como agujas. La madera de estas plantas es no porosa y presenta una estructura homogénea, ya que sus células están dispuestas longitudinalmente y son llamadas comúnmente maderas blandas. Debido a esta característica tienen menor probabilidad de distorsión, de ahí que

el pino, el cedro, el ciprés y otras coníferas sean preferidas, por sobre otras maderas, para tallar objetos de uso comercial (Maquívar, 2018) .

Madera

La madera es la porción dura de los árboles localizada bajo la corteza y que, desde el punto de vista biológico, es un tejido casi muerto constituido por más de un tipo de células, las cuales están dispuestas vertical y horizontalmente en relación con el tallo. No todos los vegetales están constituidos por madera; esta solo se presenta en aquellas especies que tienen la posibilidad de crecer en altura y grosor y comúnmente se distingue entre especies de maderas duras y maderas blandas. La diferenciación de dura y blanda no refleja el grado de densidad ni dureza; se refiere a las diferencias en la disposición de las células (Nutsch, 2000).

Planos de la madera

- Transversal: se da cuando el tronco se corta perpendicular a su eje principal
- Longitudinal tangencial: se origina cuando se hacen cortes paralelos a lo largo del tronco
- Longitudinal radial: es el que surge al efectuar un corte a lo largo del tronco desde la parte exterior (corteza) hasta el centro mismo del tronco (Gimenez, Moglia, Hernandez, & Gerez, 2005).

Albura

Constituye la parte más externa del tallo o ramas de un árbol justo bajo la corteza, una porción de tejido biológicamente activo, que es considerada como “madera viva” y tiene como principal función la conducción de agua de las raíces al follaje. Generalmente la albura es la parte de la madera más suave, más ligera y siempre de color muy claro. Es un conjunto de células parenquimatosas que combina células vivas y muertas con

características de baja densidad y alta permeabilidad. Cuando las células de parénquima mueren, la albura se convierte en duramen, quedando en la zona central del tronco (Hernández, 2016).

Duramen

Es la parte más interna del tallo de los árboles, formada a partir de la albura, siempre presenta un color más oscuro, ya que es un tejido con células muertas, sin actividad conductora. Debido al color que éste puede presentar, se le conoce como “el corazón de la madera”. Su principal función es proporcionar una estructura interna fuerte y resistente, como apoyo para sostener todo el peso de las ramas y la copa de los árboles. El duramen es mucho más duro, pesado y resistente que la albura, además de resistir el ataque de hongos e insectos (Hernández, 2016).

Componentes relevantes

- ***Traqueidas axiales o longitudinales:*** son células alargadas y estrechas que ocupan el 95 % del volumen de madera en las gimnospermas y una porción menor en las angiospermas. Una vez diferenciadas pierden su contenido celular, transformándose en tubos huecos de paredes lignificadas que desempeñan la función de conducción y sustentación del leño en el duramen. Para que se produzca la circulación de sustancias en el leño, desde las raíces a las hojas, por las partes periféricas de la albura, las paredes de estas células presentan puntuaciones areoladas, a través de las cuales los líquidos pasan de una célula a otra.
- ***Traqueidas radiales:*** tienen la misma naturaleza que las traqueidas axiales con diferente orientación. Presentan puntuaciones areoladas en sus paredes, son generalmente de menor tamaño, y se encuentran asociadas a los radios. Su

función es la conducción transversal de los nutrientes del leño y el sostén del vegetal.

- **Vasos:** son elementos que aparecen únicamente en las angiospermas y constituyen por ello el principal elemento de diferenciación entre éstas y las gimnospermas. Son células del xilema cuyas paredes finales (contacto entre un elemento de vaso y otro) carecen de membranas y se encuentran perforadas. Un vaso es un conjunto axial (vertical) de células superpuestas, llamadas miembros de vasos, formando una estructura tubiforme continua de largo indeterminado, su función es la conducción de líquidos en la madera. En sección transversal, los vasos reciben el nombre de poros, y su distribución, disposición, abundancia, tamaño y agrupamiento son características importantes en la identificación de especies y calidad de la madera (Gimenez, Moglia, Hernandez, & Gerez, 2005)

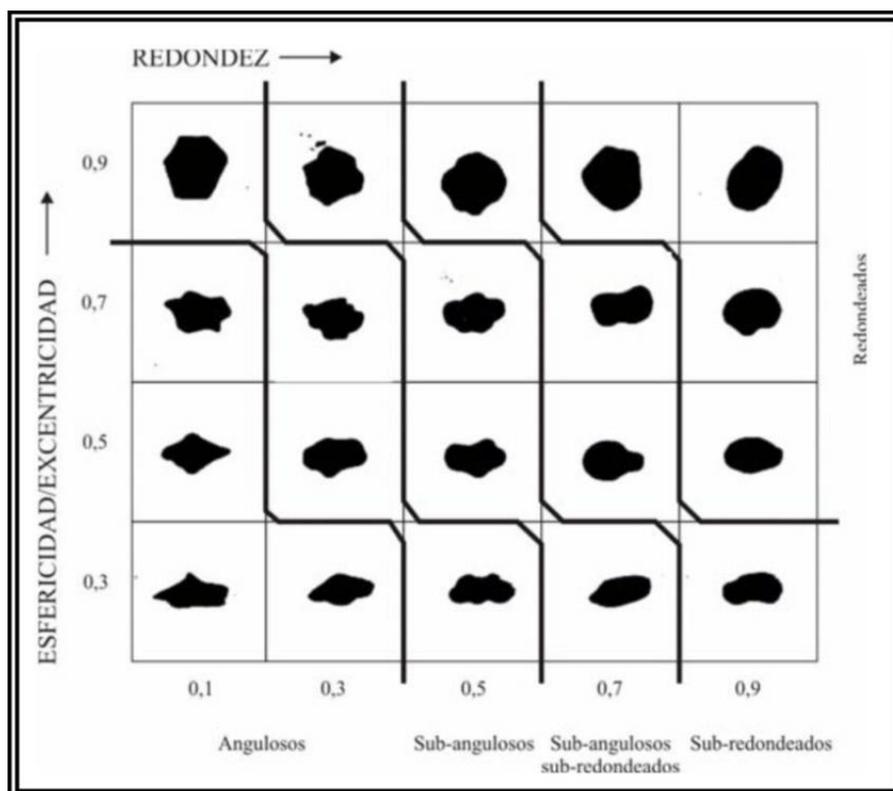
Caracterización microscópica

- **Esfericidad:** es la relación que existe entre el área superficial de una esfera que tiene el mismo volumen que el de la partícula analizada. Por la dificultad que conlleva la determinación de este valor de forma tridimensional, se ha definido también como grado de esfericidad a la relación entre el diámetro de un círculo inscrito en la partícula, entre el diámetro del círculo más pequeño circunscrito. Una partícula con una proyección circular tendría un valor de esfericidad igual a 1 y a medida que la forma se distancia del círculo su valor se aproxima a cero (Wadell, Volume, shape, and roundness of quartz particles, 1935).

- **Redondez:** es independiente de la esfericidad y cuantifica la agudeza de las esquinas de la partícula (Wadell, Volume, shape and roundness of rock particles, 1932). Se estima de forma bidimensional usando la proyección de la partícula. Se expresa como la relación entre el promedio de los radios de curvatura de las esquinas entre el radio del máximo círculo inscrito. Cabe destacar que los valores de redondez y esfericidad son adimensionales (Fernández & Ovando, 2018).

Figura 1.

Comparación visual entre redondez y esfericidad



Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la madera son aquellas que definen la aptitud y capacidad para resistir cargas externas, excluyendo los esfuerzos debidos a las tensiones internas producto de los cambios de humedad.

- **Contenido de Humedad (CH):** es la cantidad de agua contenida dentro de una muestra. Se define como la relación entre el peso del agua que se encuentra en el espécimen y su peso seco al horno como se muestra en la ecuación (1).

$$CH = \frac{P_v - P_s}{P_s} * 100 \quad (1)$$

Donde CH es el contenido de humedad expresado en porcentaje, Ph es el peso inicial de la madera o peso húmedo (g) y Ps es el peso de la madera seca en el horno (g) (INEN, 2015).

- **Densidad básica (Db):** es la relación entre el peso de la madera seca y el volumen en estado verde o saturado. Se calcula como se indica en la ecuación (2):

$$Db = \frac{P_s}{V_v} \quad (2)$$

Donde Db es la densidad básica (g/cm³), Ps el peso de la muestra seca, y Vv es el volumen de la muestra saturada (INEN, 2015).

- **Densidad verde (Dv):** es la que presenta la madera en la planta viva, cuando se halla en su máximo volumen. Se puede simular saturando las muestras de madera por inmersión en agua y está determinada por la ecuación (3):

$$Dv = \frac{P_v}{V_v} \quad (3)$$

Donde Dv es la densidad verde (g/cm³), Pv es el peso de la muestra saturada y Vv es el volumen de la muestra saturada (Spavento, Keil, & Monteoliva, 2008).

- **Flexión estática:** mide la resistencia que ofrece una viga a una carga puntual aplicada en el centro de luz o distancia entre apoyos, en la cara tangencial más cercana a la médula de la probeta. Los parámetros por determinar en este ensayo son:

- **Módulo de Rotura (MOR):** corresponde a la tensión unitaria máxima en flexión que soporta un material antes de que se produzca la falla, expresado en N/mm^2 o MPa.
 - **Módulo de Elasticidad en Flexión (MOE):** es la medida de rigidez del material. Se basa en la razón entre el esfuerzo por unidad de superficie y la deformación por unidad de longitud experimentada por la probeta expuesta a flexión, expresado en N/mm^2 o MPa.
- **Compresión paralela a las fibras:** es la resistencia que ofrece una columna a una carga aplicada en el mismo sentido de la dirección de las fibras. Permite determinar el módulo de rotura (MOR) y el módulo de elasticidad en compresión paralela (MOE) (Spavento, Keil, & Monteoliva, Propiedades mecánicas de la madera, 2008).

Capítulo III

Materiales y métodos

Selección de árboles y muestreo

Un total de 6 árboles de eucalipto y ciprés (tres por especie) de diferentes grupos de edad (juvenil, maduro y senil) fueron muestreados en Sangolquí, Ecuador ($0^{\circ}18'53''S$ $78^{\circ}26'36''O$) con una altitud, temperatura y precipitación anual promedio de 2535 msnm, $18^{\circ}C$ y 1421mm, respectivamente. El rango de edad y grupo de cada árbol investigado fue estimado según la clasificación dada por (Gatzuk, 1980), que diferencia los árboles según sus características de desarrollo y función reproductiva como se observa en la tabla 1. Para cada especie se seleccionarán árboles de tres edades estimadas a partir de la relación perímetro – altura (Thinley, Palmer, Vanclay, & Henson, 2005) (Montoya, 1995)

Figura 2.

Obtención de muestras de madera in situ



Tabla 1.

Estimación de edad según la relación altura-perímetro de los árboles

Especie	Altura total del tronco (m)	Perímetro del tronco a 2 metros de la base (m)	Aproximación del rango de edad (años)	Grupo de edad
<i>Cupressus macrocarpa</i>	15,7	0,6	10 - 30	Juvenil
	23,8	2,1	30 - 50	Maduro
	38,9	3,0	> 60	Senil
<i>Eucalyptus globulus</i>	16,2	0,8	10 - 30	Juvenil
	25,7	2,4	30 - 50	Maduro
	43,4	3,5	> 60	Senil

Muestras prismáticas (235 mm x 235 mm x 240 mm) de cada especie y grupo de edad fueron extraídas a una altura nominal de 2 m medidos desde la base del tronco de cada árbol, posteriormente después de remover la corteza (grosor promedio de 35 mm), cada muestra fue preservada en fundas plásticas selladas con toallas de papel húmedas hasta su traslado al laboratorio. Las muestras iniciales fueron cortadas hasta obtener muestras prismáticas de los siguientes tamaños para los ensayos posteriores:

- 10 mm x 10 mm x 5 mm (ablandamiento y preparación de muestras para observación en SEM)
- 20 mm x 20 mm x 20 mm (densidad, contenido de humedad y ensayo de compresión)
- 15 mm x 15 mm x 220 mm (ensayos de flexión) como se puede observar en las figuras 3 y 4.

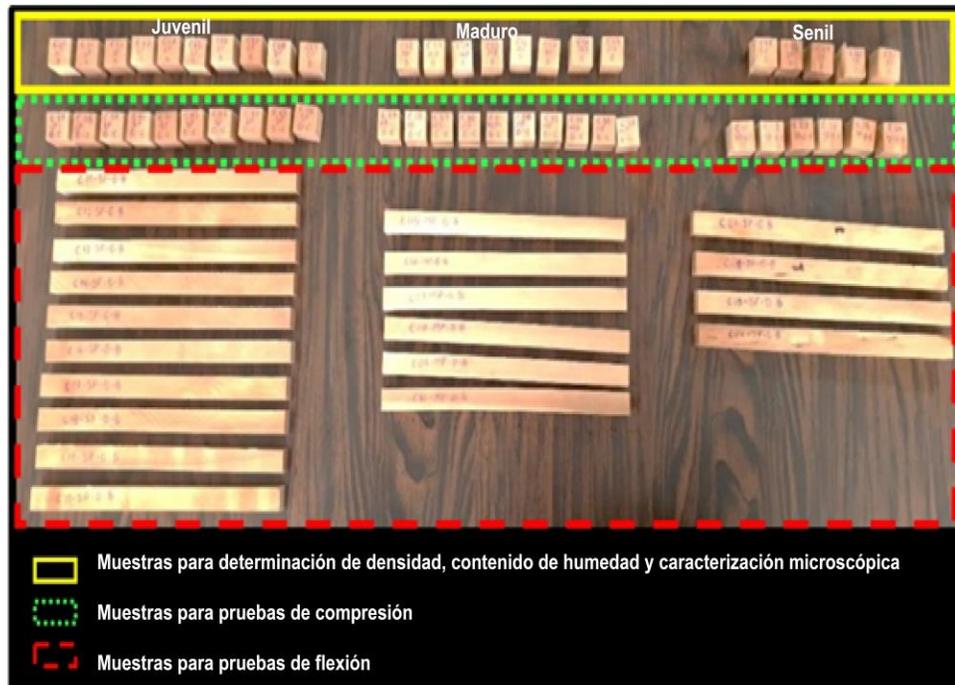
Figura 3.

Muestras de *Eucalyptus globulus* para los ensayos de caracterización



Figura 4.

Muestras de *Cupressus macrocarpa* para los ensayos de caracterización



Ablandamiento de muestras de madera

Para la obtención de los cortes transversal, tangencial y radial, requeridos para el análisis microscópico, fue necesario someter las muestras (10 mm x 10 mm x 5 mm) a un proceso de ablandamiento ya que, en las imágenes obtenidas directamente del corte con sierra, bisturí y hoja de afeitar, no fue posible diferenciar las microestructuras de interés. Los tratamientos de ablandamiento exploratorios que se aplicaron en muestras de eucalipto se describen a continuación:

1. Inmersión en agua a temperatura de ebullición (24 – 84 horas) (Samuel, Shellhorn, & Robert, 1957) (Schoch, Heller, Schweingruber, & Kienast, 2004) (Guridi, 1977).
2. Inmersión en glicerina (42 – 84 horas) (Schoch, Heller, Schweingruber, & Kienast, 2004).
3. Inmersión en solución de alcohol 96%, agua destilada y glicerina en proporción 1:1:3 (42 – 84 horas) (Schoch, Heller, Schweingruber, & Kienast, 2004).
4. Inmersión en solución de alcohol 96% y glicerina en proporción 1:1 (42 - 84 horas) (Guridi, 1977).
5. Inmersión en solución ablandadora conformada por peróxido de hidrógeno, ácido acético glacial y agua destilada en proporción 2:1:1 a temperatura de ebullición (6 horas) y luego a 60°C (24 - 42 horas) (Guridi, 1977).
6. Inmersión en agua a temperatura de ebullición (42 – 84 horas), inmersión en solución ablandadora a temperatura de ebullición (6 horas) y luego a 60°C (24 - 42 horas), inmersión en solución de alcohol 96% y glicerina en proporción 1:1 (42 horas) (Guridi, 1977).

El método más efectivo para el ablandamiento y obtención de cortes de madera de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) fue el tratamiento 6, sin embargo, se observó que al aplicar la solución de alcohol 96% y glicerina el tejido se endurecía nuevamente, por lo

tanto, este paso fue evadido. El tratamiento modificado para cada especie se describe a continuación:

Ablandamiento de muestras de *Eucalyptus globulus*

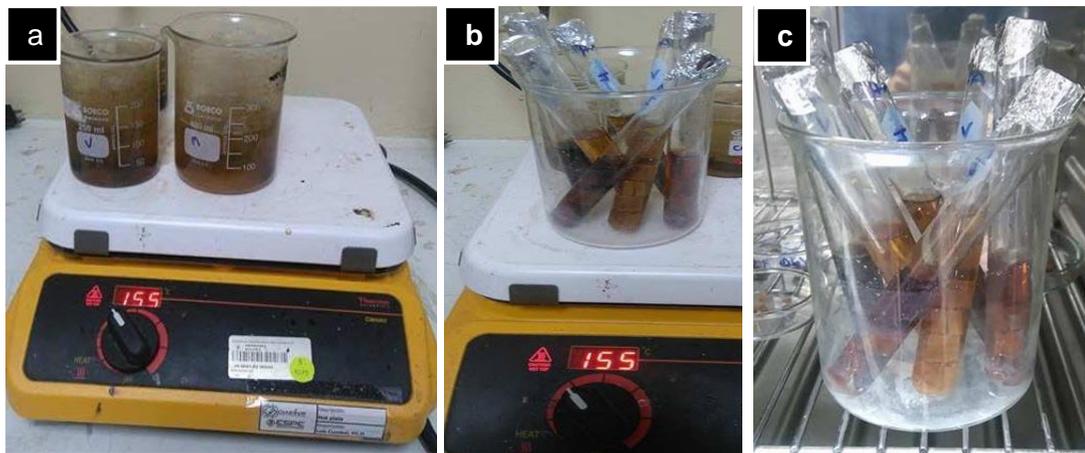
Un total de 60 muestras (10 mm x 10 mm x 5 mm) de albura de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) correspondientes a cada grupo de edad, se colocaron por separado en recipientes resistentes al calor con agua corriente y se llevaron a temperatura de ebullición en una plancha de calentamiento durante 84 horas procurando una renovación constante del agua al observar cambio de coloración. Se preparó la solución ablandadora conformada por peróxido de hidrógeno, ácido acético glacial y agua destilada en proporción 2:1:1 donde se realizó la inmersión de las muestras y se llevó a temperatura de ebullición mediante baño maría durante 6 horas, finalmente las muestras se conservaron en la solución ablandadora durante 168 horas a 60°C en una estufa. La solución ablandadora fue preparada de forma continua para la renovación en cada fase del proceso al observar cambio de coloración (Guridi, 1977).

Ablandamiento de muestras de *Cupressus macrocarpa*

El mismo número de muestras de albura de ciprés (*Cupressus macrocarpa*), fueron sometidas al procedimiento descrito para las muestras de eucalipto variando únicamente los tiempos de cada fase. La ebullición en agua tuvo una duración de 42 horas, la inmersión en solución ablandadora a baño maría en ebullición se mantuvo en 6 horas y la conservación final en solución ablandadora a 60°C en la estufa se redujo a 72 horas.

Figura 5.

Proceso de ablandamiento de muestras de madera.



Nota: (a) muestras a temperatura de ebullición en plancha de calentamiento, (b) muestras en solución ablandadora colocadas en baño maría, (c) muestras en solución ablandadora dentro de la estufa.

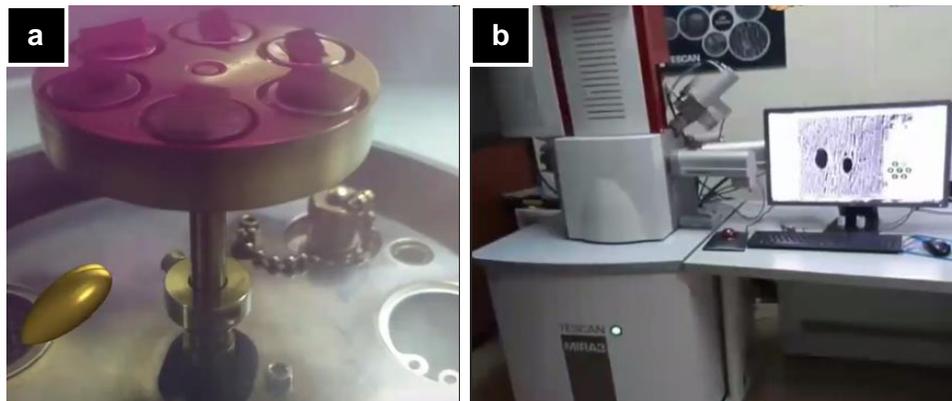
Preparación de muestras para observación en SEM

Al finalizar el proceso de ablandamiento se realizaron los cortes transversales, tangenciales y radiales de las muestras con hojas de afeitar nuevas para cada corte de 0,05 mm de espesor, observando constantemente en el estereomicroscopio para obtener la misma cantidad de secciones de cada tipo de corte. Las dimensiones de las muestras resultantes fueron 5x5x2 mm aproximadamente, mismas que se mantuvieron a 60 ° C en la estufa durante al menos 48 horas previo a la observación microscópica, para garantizar la deshidratación.

Las muestras secas se adhirieron a portamuestras de aluminio utilizando cinta de carbono de doble cara y se evaporó con oro (99,99% de pureza Quorum Q150R ES) durante 20 segundos hasta obtener una película de 20 nm. Para cada muestra se tomaron microfotografías a diferentes magnificaciones utilizando el microscopio electrónico de barrido con pistola de emisión de campo TESCAN MIRA3, con una resolución de 1,2 nm a 30 kV.

Figura 6.

Preparación de muestras para observación en SEM.



Nota: (a) Evaporación con oro y (b) observación en el microscopio TESCAN MIRA3.

Análisis microestructural

Un total de 416 microfotografías (89 imágenes de *Cupressus macrocarpa* y 327 de *Eucalyptus globulus*) se usaron para determinar las características microestructurales de las muestras. La microestructura tisular de las maderas blandas es menos compleja que la de las maderas duras esta es la razón por la cual se analizó una mayor cantidad de imágenes de eucalipto que de ciprés.

Los parámetros que se analizaron a partir de las microfotografías obtenidas fueron: densidad, área, redondez y esfericidad de cada una de las microestructuras identificadas.

- *Eucalyptus globulus*: vasos, parénquima longitudinal y parénquima radial.
- *Cupressus macrocarpa*: traqueidas longitudinales y radiales.

Para el análisis de las imágenes se utilizó un algoritmo de MATLAB desarrollado por (Arroyo, y otros, 2016) que permitió: la importación y procesamiento de las imágenes y el almacenamiento de los datos. Una vez importada la imagen, las partes vacías (vasos, traqueidas y parénquima) se muestran como áreas oscuras lo que permite la medición;

las microestructuras incompletas que aparecen en los bordes de cada imagen no fueron tomadas en cuenta para el análisis. La densidad de cada microestructura se cuantificó por micrómetro cuadrado (número de células/ μm^2). Para cada uno de los tipos celulares se determinó el área y forma correspondiente en términos de a) redondez y b) esfericidad como se indica a continuación:

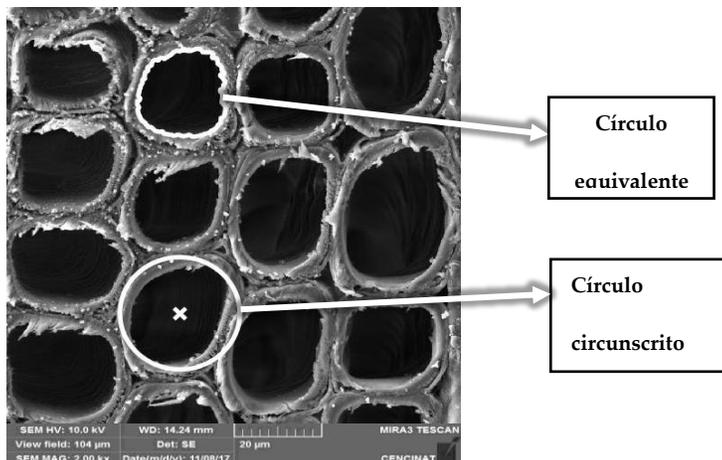
$$R = \frac{R_{Equiv}}{R_{circuns}} \quad (\text{Wadell, 1932}) \quad (4)$$

$$E = \frac{(4\pi A)}{p^2} \quad (\text{Cox, 1927}) \quad (5)$$

Donde R_{Equiv} es el radio de un círculo equivalente que tiene la misma área que la microestructura analizada. $R_{circuns}$ es el radio del círculo circunscrito que es el círculo más pequeño representado por el contorno completo de cada microestructura como se muestra en la figura 7. A y P son el área y el perímetro de cada microestructura respectivamente, considerando la parte vacía o de tonalidad oscura. R y E son medidas adimensionales con valores que van de 0 a 1, ambas reflejan la geometría de las microestructuras dada por la relación de semejanza entre el círculo circunscrito y el equivalente.

Figura 7.

Análisis microestructural de una muestra de Cupressus macrocarpa



Caracterización Físico – Mecánica

Un total de 159 muestras (90 de *Eucalyptus globulus* y 69 de *Cupressus macrocarpa*) se analizaron para determinar la densidad y contenido de humedad de las dos especies así como la rigidez y fuerza de compresión (módulo de elasticidad MOEcomp y módulo de ruptura MORcomp) y la rigidez y fuerza de flexión (MOEflex y MORflex). Estas pruebas mecánicas se llevaron a cabo en una máquina de pruebas universal (UTM AGS-X Shimadzu) de 300 kN de capacidad equipado con un extensómetro de video digital sin contacto para medir deformaciones que, a su vez, también se verificaron dos veces utilizando medidores de deformación de un solo elemento de 5 mm de largo pegados en cada muestra usando un éster de cianoacrilato adhesivo y recubiertos con reparación instantánea resina epoxi / amina terciaria. Todas las pruebas experimentales se ejecutaron a temperatura ambiente y humedad relativa aproximada de 20°C (+/- 1°C) y 42% (+/- 1%) respectivamente.

Densidad y contenido de humedad

Para la determinación de la densidad se usaron muestras de madera de 20 mm x 20 mm x 20 mm de ambas especies siguiendo la norma DIN 52182 "Prueba de madera - Determinación de la densidad" (DIN, 52182: "Testing of wood: determination of density", 2013). Un total de 53 muestras (30 de *Eucalyptus globulus* y 23 de *Cupressus macrocarpa*) fueron puestas a prueba para determinar la densidad verde (relación del peso verde Pv y volumen verde Vv), la densidad básica (relación del peso secado al horno Ps y volumen verde Vv), y el contenido de humedad correspondiente (CH) de cada muestra. De las 30 muestras de eucalipto se tomaron 10 de cada grupo de edad (joven, maduro y senil) de la misma forma de las 23 muestras de ciprés (5 juveniles, 8 maduras y 10 seniles) (Ross, y otros, 2010).

Figura 8.

Equipos para ensayo de densidad básica y contenido de humedad



Nota: (a) Balanza electrónica, (b) horno para secado de muestras y (c) calibrador electrónico de 0,01 mm de precisión.

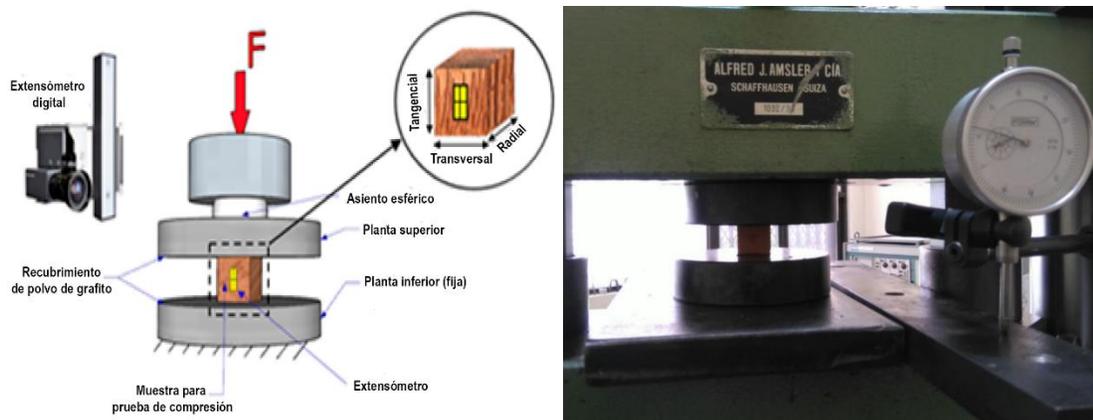
Rigidez y resistencia a la compresión

Un total de 56 pruebas de compresión se llevaron a cabo en muestras de 20 mm × 20 mm × 20 mm; 30 muestras correspondientes a eucalipto (10 de cada grupo de edad) y 26 de ciprés (6 juveniles, 10 maduros y 6 seniles). Como preparación previa a los ensayos se puso especial atención en colocar las muestras con las fibras en posición paralela al eje longitudinal (dirección axial), con una tolerancia de $\pm 5^\circ$. Las muestras seleccionadas se lijaron para garantizar superficies planas y, por lo tanto, contacto total durante la prueba. Para reproducir las condiciones verdes como en la naturaleza (método de reconstrucción), las muestras se saturaron con agua utilizando un sistema de tratamiento de recipientes a presión de vacío (González, 2018). Todas las pruebas mecánicas se llevaron a cabo en una máquina de prueba universal (UTM) AGS-X Shimadzu, con capacidad de 300 kN equipada con un extensómetro de video digital sin contacto para medir deformaciones. Según la norma DIN 52185 "Prueba de madera - Prueba de compresión paralela al grano" cada ensayo se llevó a cabo en muestras de 20 mm × 20 mm × 20 mm; la platina inferior del UTM fue fijada, mientras que la platina superior se montó en un rodamiento de media esfera con capacidad para girar, esto

proporciona un contacto completo entre la platina y las muestras. Se usó un recubrimiento de polvo de grafito seco entre las muestras y las placas de prueba para minimizar la fricción. Cada muestra se cargó en la dirección longitudinal (es decir, paralela a las fibras de la muestra de madera) hasta el fallo a una velocidad de cruceta de 0,3 mm / min para alcanzar el fallo entre 3 y 4 minutos (DIN, 2013).

Figura 9.

Ensayo de compresión



La rigidez de compresión (MOE_{comp}) y la resistencia a la compresión (MOR_{comp}) se determinaron a partir de este ensayo mecánico. La MOE_{comp} específicamente, fue calculada a partir de la relación tensión (σ) y la deformación (ϵ) dada por la ley de Hooke:

$$\sigma = MOE * \epsilon \quad (6)$$

La rigidez de compresión se calculó posteriormente, realizando una regresión lineal en el rango elástico lineal (límite proporcional) de las curvas de tensión-deformación producidas para cada muestra analizada, donde la pendiente de la curva proporciona el MOE_{comp} correspondiente.

La resistencia a la compresión que refleja la capacidad máxima de carga (F_{max}) de las muestras de madera en la dirección L de la carga aplicada se calculó de la siguiente manera:

$$MOR_{comp} = \frac{F_{max}}{A} \quad (7)$$

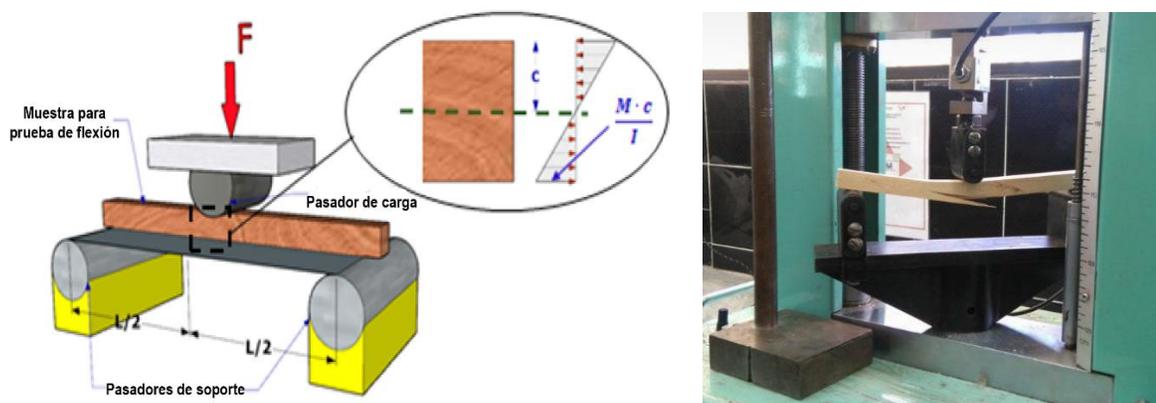
Donde A es el área de la sección transversal medida en la cara de la muestra perpendicular a la carga aplicada F, como se observa en la figura 9 (Ugural, 2008).

Rigidez y resistencia a la flexión

Se llevaron a cabo un total de 50 pruebas de flexión en muestras prismáticas de madera verde sin defectos; 30 muestras de eucalipto (10 de cada grupo de edad) y 20 muestras de ciprés (4 juveniles, 6 maduras y 10 seniles). La preparación del material de muestreo siguió el mismo proceso que en las pruebas de compresión en términos de lijado, etiquetado y reproducción de condiciones verdes de la muestra. Se realizó una prueba de flexión de 3 puntos como se indica en la figura 10 que refleja la configuración de la prueba de flexión. De acuerdo con la DIN 52186 "Prueba de madera - Prueba de flexión", cada muestra de 15 mm × 15 mm × 220 mm se colocó en dos pasadores de soporte inferiores a 200 mm uno con respecto al otro. La platina superior de la UTM se montó en un pasador de carga colocado justo en el punto medio del sistema. Se usaron almohadillas de presión de goma de 3 mm de espesor para minimizar la fricción y evitar daños locales entre los revestimientos de muestra y el conjunto de pasadores superior / inferior. Cada muestra de madera se cargó hasta el fallo a una velocidad de cruceta de 2 mm / min para alcanzar el fallo entre 4 y 6 minutos (DIN, 2013).

Figura 10.

Ensayo de flexión



La rigidez de flexión (MOE_{flex}) y la resistencia a la flexión (MOR_{flex}) se determinaron a partir de este ensayo mecánico. El MOE_{flex} se calculó siguiendo el mismo procedimiento que el MOE_{comp} , es decir, a partir de la ecuación 4 y de la regresión lineal realizada en el rango elástico lineal de la curva de tensión-deformación para cada muestra analizada en modo de flexión. La resistencia a la flexión (es decir, la tensión más alta experimentada por toda la sección transversal de la muestra de madera en su momento de rendimiento) se calculó aplicando la ecuación 8;

$$MOR_{flex} = \frac{(M \cdot c)}{I} \quad (8)$$

Donde M es el momento de flexión ($N \cdot mm$) producido por la carga aplicada F (figura 10) que a su vez se calcula mediante la ecuación 7, c (mm) es la distancia desde el eje neutro de la muestra de madera hasta la fibra externa de la madera que soporta la presión más alta en el punto de carga, I es el momento de inercia de la sección transversal de la muestra (mm^4) y L es la longitud entre los pasadores de soporte donde se coloca la muestra de madera es decir, 200 mm para este caso específico (Ugural, 2008).

$$M = \frac{(F \cdot L)}{4} \quad (9)$$

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos en la investigación fueron evaluados mediante pruebas estadísticas para confirmar el comportamiento de las variables estudiadas. Se inició verificando la normalidad de los datos a través del Test de Shapiro Wilk (Gutiérrez & de la Vara, 2012), en todos los casos se obtuvo un p-valor (probabilidad de que un valor estadístico calculado sea posible) superior al nivel de significancia de 0,05 (el total de los datos de cada variable presentó una distribución normal), paso necesario para realizar el Análisis de varianzas (ANOVA) que permitió identificar las diferencias significativas de cada variable ($p\text{-valor} < 0,05$) entre edades y especies estudiadas.

Capítulo IV

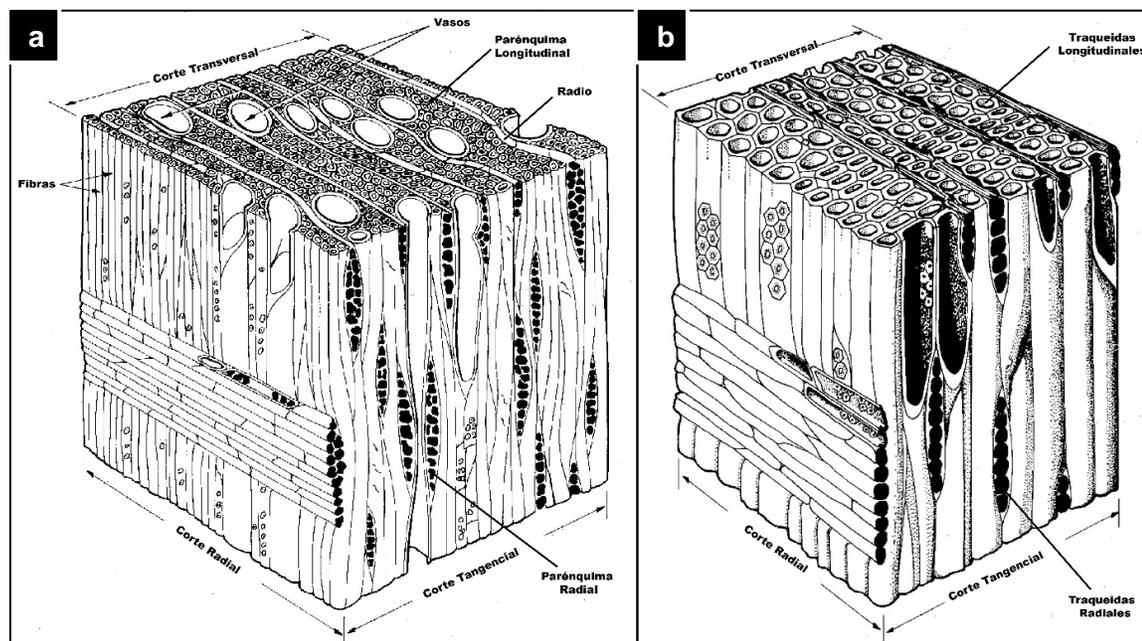
Resultados

Caracterización microscópica

Las microfotografías muestran un sistema vascular poroso para el caso de las muestras de eucalipto (madera dura) que comprende tres tipos principales de células (i) fibras longitudinales, (ii) vasos, (iii) células de parénquima longitudinal y radial. Para el caso del ciprés (madera blanda) las microfotografías muestran una estructura más simple con dos tipos de células (i) traqueidas longitudinales y (ii) células de parénquima longitudinal y radial. Las fibras y los vasos se presentan únicamente en el eucalipto.

Figura 11.

Esquema microestructural y composición de la madera



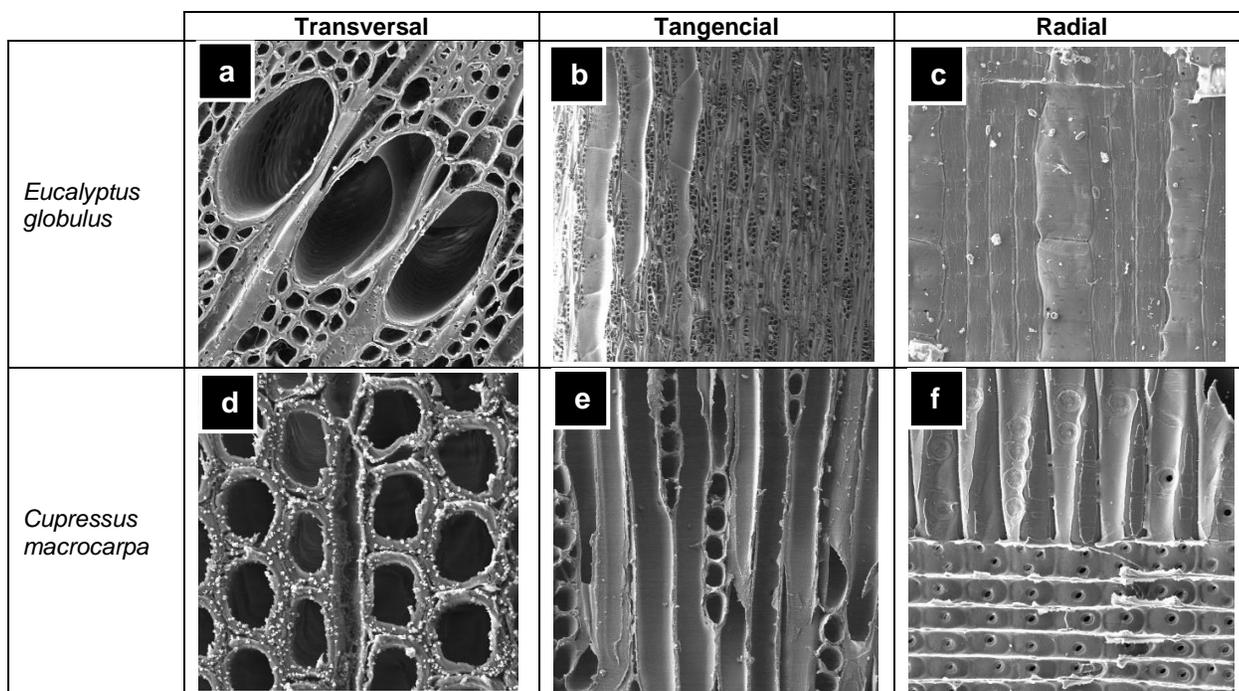
Nota: en la figura a) se muestra la composición microestructural de una especie de madera dura y la figura b) de una especie de madera blanda

La Figura 12 muestra las microfotografías capturadas en SEM de cada tipo de corte (transversal, tangencial y radial) para el análisis de la composición microestructural

de los dos tipos de madera estudiados. Las figuras a, b y c corresponden a las muestras de *Eucalyptus globulus* que coinciden con el esquema general de maderas duras presentado en la figura 11a mientras que los elementos d, e y f corresponden a las muestras de *Cupressus macrocarpa* que de igual forma coinciden con el esquema establecido de maderas blandas ilustrado en la figura 11b.

Figura 12.

Cortes transversales, tangenciales y radiales de Eucalyptus globulus y Cupressus macrocarpa



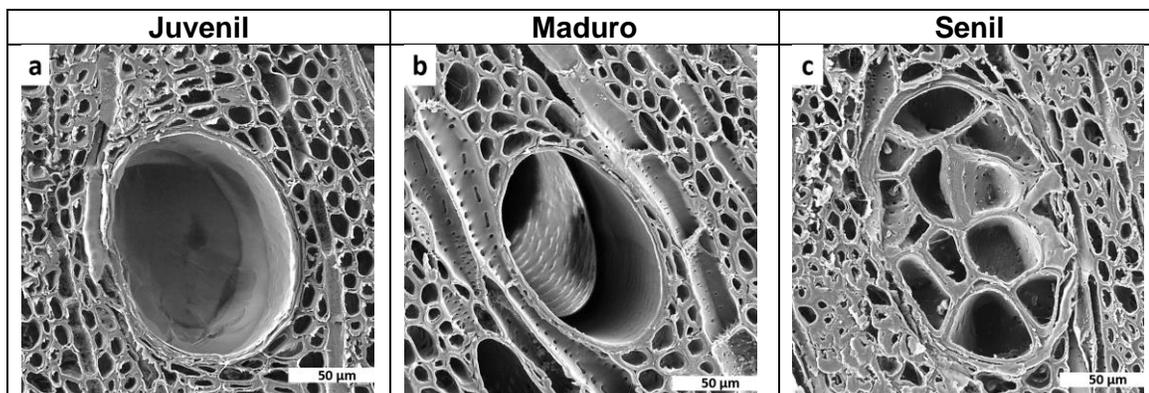
Vasos

Se midió un total de 131 vasos (65 juveniles, 32 maduros y 34 seniles) a partir de las microfotografías obtenidas de las muestras de eucalipto. La inspección rigurosa de las imágenes desveló que los vasos adquieren una mayor área y sufren un cambio de forma significativa de cuasi-circular a elíptico a medida que el tejido envejece. En algunos de los vasos analizados de las muestras seniles se observó la presencia de tilosis una condición inducida por la inclusión de las células de parénquima dentro de los vasos

adyacentes. La figura 13 ilustra los cambios microestructurales que experimentan los vasos presentes en las muestras de *Eucalyptus globulus* a medida que el tejido envejece en muestras correspondientes a las edades a) juvenil, b) maduro y c) senil.

Figura 13.

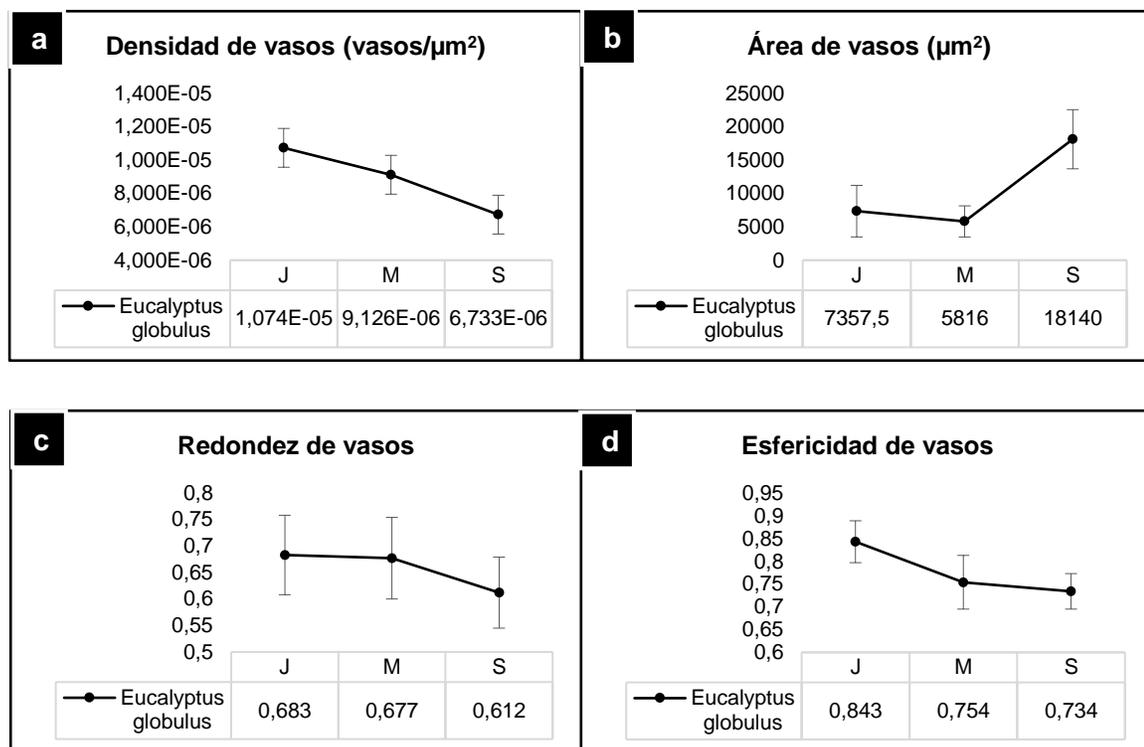
Transición microestructural de los vasos en cortes transversales de Eucalyptus globulus



El análisis microestructural de densidad, área, redondez y esfericidad de los vasos identificados en las muestras estudiadas determinó que: (i) decrecen casi linealmente en densidad desde el tejido juvenil al senil ($p\text{-valor} = 2,647 \times 10^{-6}$) como se observa en la figura 14a. (ii) El área no cambia significativamente entre los tejidos juvenil y maduro ($p\text{-valor} = 3,667 \times 10^{-1}$) pero sí se evidencia un incremento significativo entre los tejidos maduro y senil ($p\text{-valor} = 7,059 \times 10^{-10}$) como se puede observar en la figura 14b; (iii) la forma de los vasos presenta cambios significativos en términos de redondez ($p\text{-valor} = 3,752 \times 10^{-5}$) y esfericidad ($p\text{-value} = 9,414 \times 10^{-22}$) de las muestras juveniles a las seniles (figuras 14c y 14d respectivamente).

Figura 14.

Análisis estadístico de la transición microestructural de los vasos en muestras de *Eucalyptus globulus*

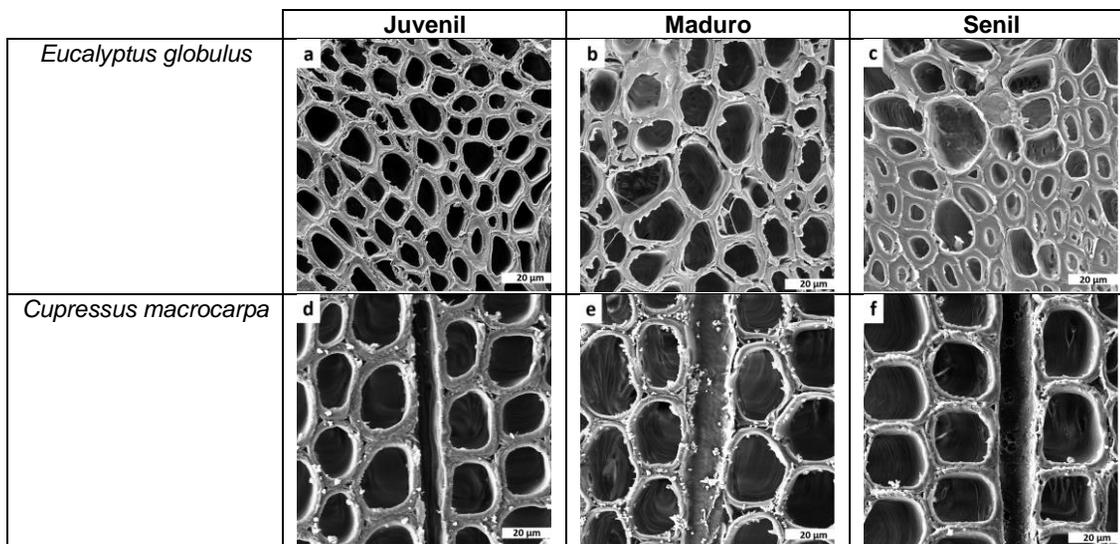


Células de parénquima longitudinal y traqueidas longitudinales

La figura 15 muestra las microfotografías de los cortes transversales obtenidos en SEM para la comparación de la transición microestructural del parénquima longitudinal en *Eucalyptus globulus* (Figura 15a – 15c) y las traqueidas longitudinales en *Cupressus macrocarpa* (Figura 15d – 15f) por grupo de edad

Figura 15.

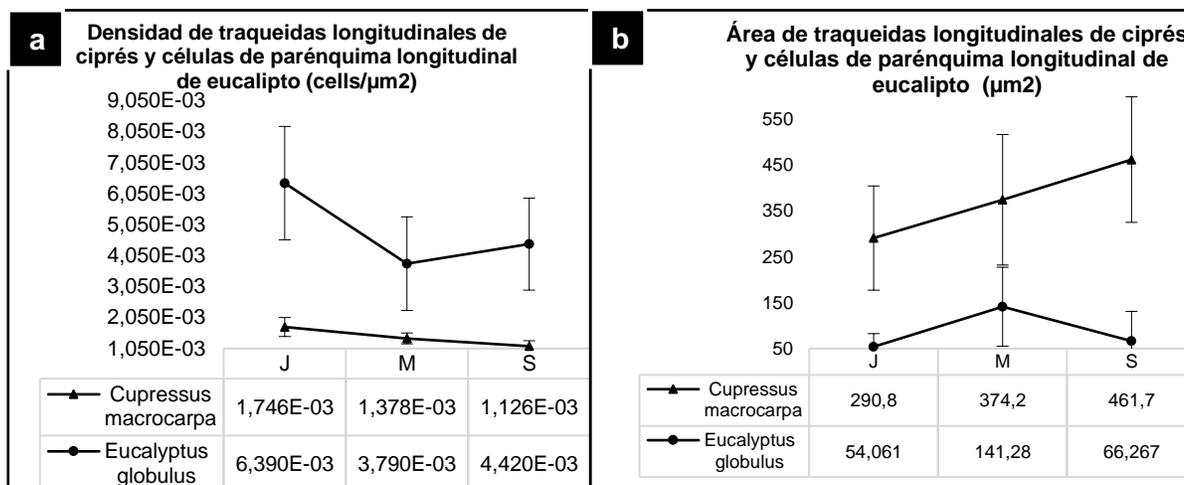
Transición microestructural del parénquima longitudinal y las traqueidas longitudinales en cortes transversales de Eucalyptus globulus y Cupressus macrocarpa respectivamente.



Fueron analizadas un total de 385 células de parénquima longitudinal (98 juveniles, 131 maduros y 156 seniles) de las muestras de *Eucalyptus globulus* y 658 traqueidas longitudinales (233 juveniles, 250 maduras y 175 seniles) de las muestras de *Cupressus macrocarpa*. Los resultados del análisis en el caso de las traqueidas longitudinales del ciprés muestran un decrecimiento casi lineal en densidad (p -valor= $2,820 \times 10^{-10}$), que se relaciona directamente con un incremento de área (p -valor= $1,998 \times 10^{-15}$) esto significa que las traqueidas aumentan de tamaño a medida que el tejido envejece para transportar mayor cantidad de nutrientes por lo tanto hay una menor cantidad de traqueidas por μm^2 en las muestras seniles (Figuras 16a y 16b, respectivamente). Los análisis de la densidad y área para las células de parénquima longitudinal de las muestras de *Eucalyptus globulus* no presentan una tendencia clara, sin embargo, se puede inferir que la variación de los dos parámetros tendrá una tendencia similar que las estudiadas en las muestras de ciprés.

Figura 16.

Análisis estadístico de densidad y área en base a la transición microestructural del parénquima longitudinal y traqueidas longitudinales en muestras de *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa* respectivamente.



Las figuras 15a, 15b y 15c muestran un incremento progresivo en el grosor de las células de parénquima longitudinal de las muestras juveniles a las seniles del tejido del eucalipto, este proceso contribuye al incremento progresivo de la resistencia mecánica a medida que el tejido de madera dura envejece. Las diferencias en densidad ($p\text{-valor}=3,362 \times 10^{-2}$) y área ($p\text{-valor}=3,279 \times 10^{-2}$) entre las dos especies es significativa lo que evidencia que las células de parénquima longitudinal del eucalipto tienen una mayor densidad y menor área que las traqueidas longitudinales del ciprés como se puede observar en las líneas de tendencia y medias de las figuras 16a y 16b respectivamente.

La tabla 2 muestra que los resultados de la transición de forma en términos de redondez y esfericidad de las células de parénquima longitudinal para eucalipto y traqueidas longitudinales de ciprés ($p\text{-valor}=8,758 \times 10^{-1}$ y $p\text{-valor}=7,590 \times 10^{-1}$, respectivamente) permanecen constantes con la edad. Lo mismo ocurre al comparar la redondez de las dos especies; con un $p\text{-valor}=9,609 \times 10^{-1}$ se confirma que no existe diferencia significativa, por lo que eucalipto y ciprés tienen valores de redondez similares mientras que, en términos de esfericidad, sí se observa diferencia significativa (p -

valor=1,718E-02) lo que indica, que al contrario de las células de parénquima longitudinal del eucalipto, la forma de las traqueidas longitudinales presentes en el ciprés es más circular.

Tabla 2.

Comparación de redondez y esfericidad de las células de parénquima longitudinal y traqueidas longitudinales de Eucalyptus globulus y Cupressus macrocarpa por grupo de edad.

<i>Eucalyptus globulus</i>			<i>Cupressus macrocarpa</i>		
Grupo de edad	Promedio (μm^2)	Desviación estándar (μm^2)	Grupo de edad	Promedio (μm^2)	Desviación estándar (μm^2)
Redondez					
J	0,775	0,089	J	0,722	0,079
M	0,737	0,104	M	0,807	0,074
S	0,767	0,127	S	0,756	0,050
Esfericidad					
J	0,786	0,082	J	0,829	0,055
M	0,771	0,083	M	0,833	0,048
S	0,781	0,073	S	0,823	0,051

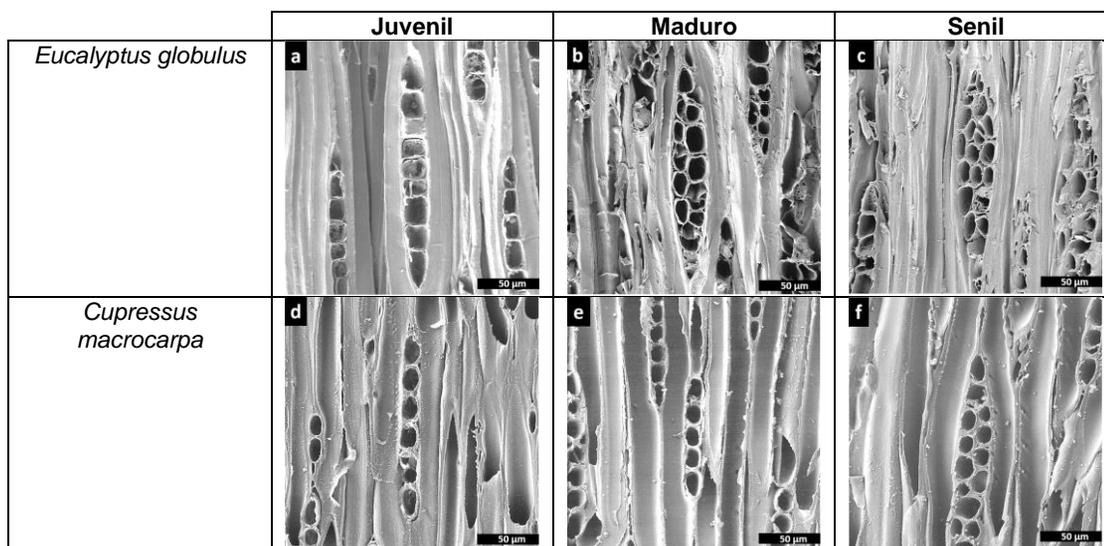
Células de parénquima radial

Se analizaron y midieron 453 células de parénquima radial (163 juveniles, 159 maduras y 131 seniles) de las muestras de *Eucalyptus globulus* y 332 traqueidas longitudinales (105 juveniles, 131 maduras y 96 seniles) de las muestras de *Cupressus macrocarpa*. La figura 17 muestra las microfotografías de los cortes tangenciales obtenidos en SEM para la comparación de la transición microestructural del parénquima radial en *Eucalyptus globulus* (Figura 17a – 17c) y las traqueidas radiales en *Cupressus macrocarpa* (Figura 17d – 17f) por grupo de edad. En el caso del eucalipto se observa un incremento de densidad y reducción de área mientras que el ciprés presenta un incremento de densidad y área. A pesar de las diferencias identificadas mediante las

microfotografías, las pruebas estadísticas indican que no existe diferencia significativa entre especies ni grupos de edad para estos dos parámetros ya que el p -valor $> 0,05$ en todos los casos

Figura 17.

Transición microestructural del parénquima radial y las traqueidas radiales en cortes tangenciales de Eucalyptus globulus y Cupressus macrocarpa respectivamente.



La tabla 3 muestra los resultados de la transición de forma en términos de redondez y esfericidad de las células de parénquima radial del eucalipto y las traqueidas radiales del ciprés. A partir de las pruebas estadísticas al comparar las medias se obtuvo un p -valor de $1,662E-01$ y $1,250E-01$ respectivamente, por lo que se confirma que similar a lo que sucede con el parénquima y traqueidas longitudinales, la forma de estas microestructuras, también permanecen constantes con la edad. De igual manera, la redondez de las dos especies (p -valor= $6,476E-02$) no presenta diferencia significativa, mientras que, la esfericidad sí (p -valor= $4,938E-02$) indicando que, como en el caso anterior, las traqueidas radiales del ciprés son más circulares que las células de parénquima radial del eucalipto.

Tabla 3.

Comparación de esfericidad y redondez de las células de parénquima radial y traqueidas radiales de *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa* por grupo de edad.

<i>Eucalyptus globulus</i>			<i>Cupressus macrocarpa</i>		
Grupo de edad	Promedio (μm^2)	Desviación estándar (μm^2)	Grupo de edad	Promedio (μm^2)	Desviación estándar (μm^2)
Redondez					
J	0,734	0,094	J	0,782	0,059
M	0,781	0,067	M	0,799	0,066
S	0,770	0,070	S	0,820	0,031
Esfericidad					
J	0,778	0,058	J	0,800	0,058
M	0,802	0,062	M	0,829	0,049
S	0,797	0,070	S	0,843	0,042

Densidad y contenido de humedad

Los resultados de las densidades básicas y sus correspondientes contenidos de humedad saturada para las 53 muestras de madera (30 de eucalipto y 23 de ciprés) se muestran en la tabla 4. La Figura 18 ilustra la densidad básica frente al contenido de humedad de todas las muestras por grupo de edad. Estos resultados muestran que la densidad básica calculada promedio para las muestras de eucalipto senil es 1,04 y 1,12 veces mayor que las correspondientes para muestras maduras y juveniles, respectivamente; y para las muestras de ciprés es 1,15 y 1,37 veces mayor que las maduras y juveniles. Por el contrario, el contenido promedio de humedad de las muestras de eucalipto juvenil es 1,12 y 1,17 veces mayor que las correspondientes para muestras maduras y seniles, respectivamente; y 1,06 y 1,09 veces mayor, respectivamente, en las muestras de ciprés; lo que denota que el contenido de humedad en especies de madera es inversamente proporcional a la densidad básica. Esto resulta lógico tomando en cuenta que si la muestra contiene una menor cantidad de agua el volumen verde será menor por

lo que la densidad básica aumenta. Sin embargo, ambas propiedades están bien correlacionadas entre sí por las funciones de potencia que se muestran en la Figura 18.

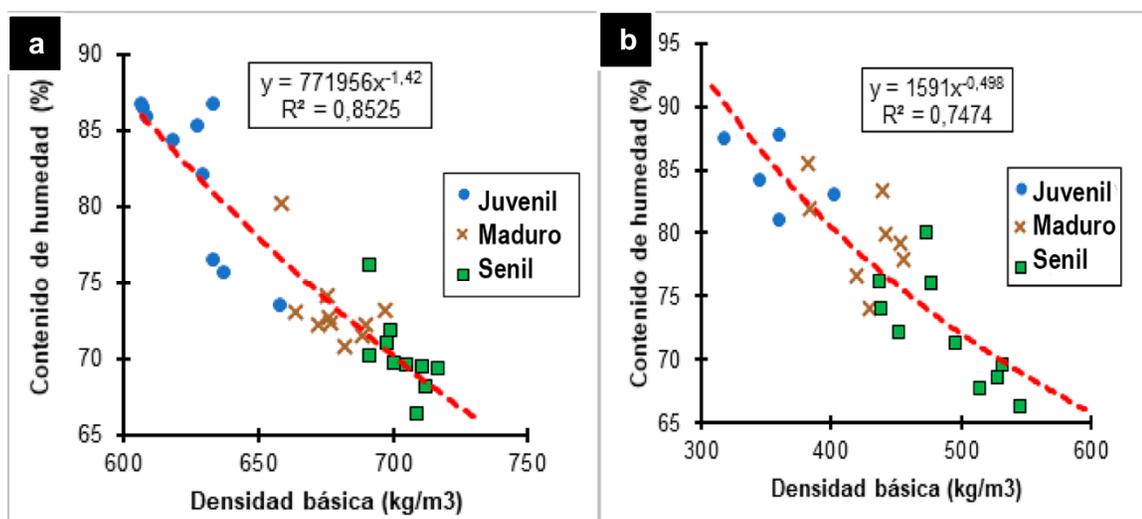
Tabla 4.

Densidades básicas y contenidos de humedad por grupo de edad de Eucalyptus globulus y Cupressus macrocarpa.

<i>Eucalyptus globulus</i>			<i>Cupressus macrocarpa</i>		
Grupo de edad	Densidad básica promedio (kg/m ³)	Contenido de humedad (%)	Grupo de edad	Densidad básica promedio (kg/m ³)	Contenido de humedad (%)
J	626	82,3	J	358	84,7
M	678	73,2	M	426	79,8
S	703	70,2	S	489	72,2
Media	669	75,2	Media	439	77,5
Desviación estándar	35,00	6,31	Desviación estándar	61,55	6,35
Coefficiente de variación	0,05	0,08	Coefficiente de variación	0,14	0,08

Figura 18.

Densidad básica vs. contenido de humedad por grupo de edad para



Nota: (a) *Eucalyptus globulus* y (b) *Cupressus macrocarpa*

De forma general, la densidad básica promedio de las muestras de eucalipto es 1,53 veces mayor que la correspondiente a las muestras de ciprés lo que indica que el tejido en la madera de eucalipto (madera dura) es más resistente que el tejido en la madera de ciprés (madera blanda).

Rigidez y Resistencia a la compresión

Los resultados promedio de las pruebas de compresión llevadas a cabo en las 56 muestras de madera (30 de eucalipto y 26 de ciprés) se dan por grupo de edad en la Tabla 5. La Figura 19 traza para ambas especies el MOR y MOE calculados para este modo mecánico contra las densidades verdes correspondientes. Cabe destacar que para todos los ensayos se toma en consideración la densidad verde porque es la que ilustra el comportamiento del material en estado natural.

Tabla 5.

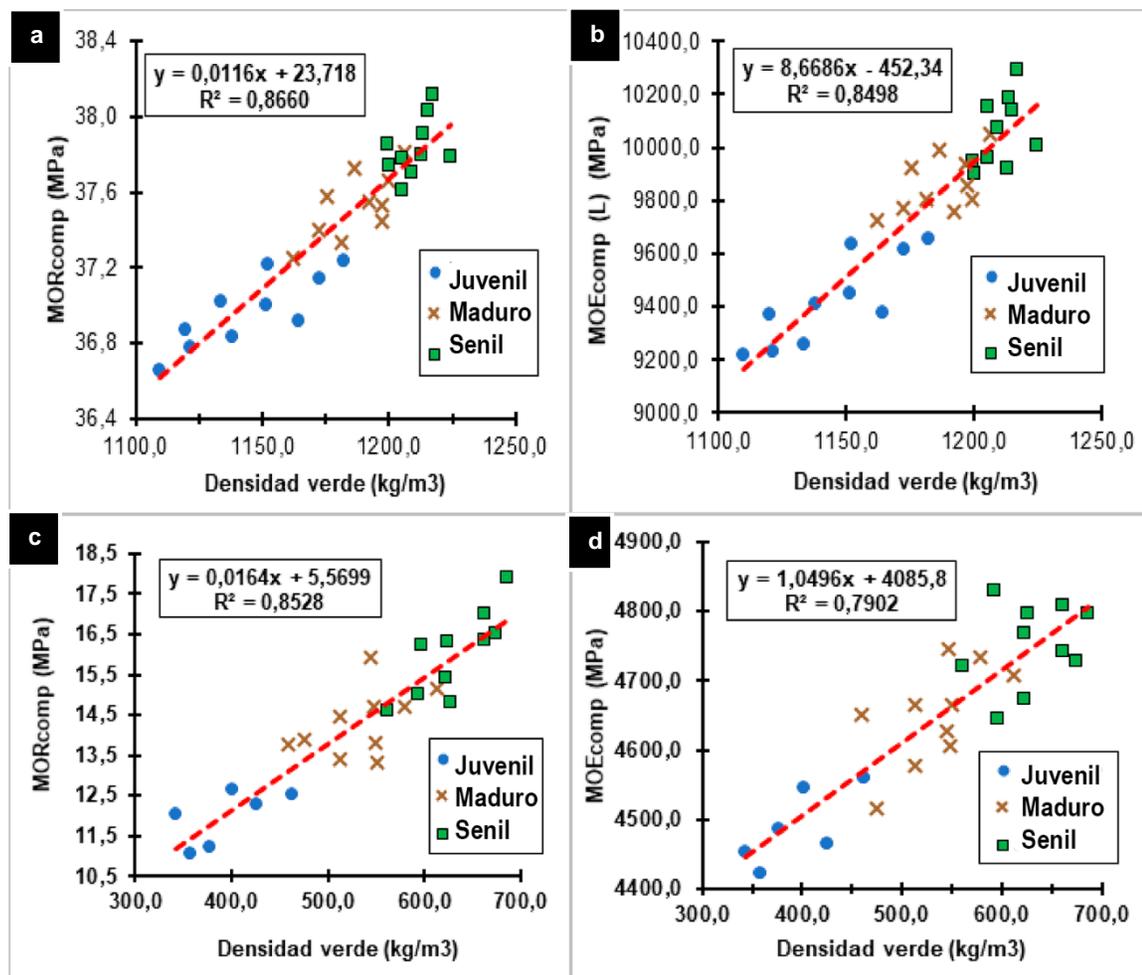
MOR y MOE promedio por grupo de edad de las muestras de Eucalyptus globulus y Cupressus macrocarpa ensayadas en el modo de compresión.

<i>Eucalyptus globulus</i>				<i>Cupressus macrocarpa</i>			
Grupo de edad	Densidad verde promedio (kg/m ³)	MOR _{comp} promedio (MPa)	MOE _{comp} promedio (MPa)	Grupo de edad	Densidad verde promedio (kg/m ³)	MOR _{comp} promedio (MPa)	MOE _{comp} promedio (MPa)
J	1145	36,9	9423	J	395	11,9	4489
M	1187	37,5	9864	M	534	14,3	4650
S	1210	37,8	10059	S	631	16,0	4751
Media	1181	37,4	9782	Media	539	14,4	4652
Desviación estándar	32,05	0,40	301,36	Desviación estándar	100,49	1,79	120,67
Coefficiente de variación	0,03	0,01	0,03	Coefficiente de variación	0,19	0,12	0,03

Los valores promedio para los MOR y MOE de compresión son 2,60 y 2,10 veces mayores en el eucalipto que en el ciprés (p -valor = 1,546E-03 y 4,733E-04, respectivamente), estos datos nos indican que la especie de madera dura en su estado natural (verde) presenta más del doble de resistencia a soportar tensiones de compresión que la especie de madera blanda, lo que consecuentemente significa que el ciprés es dos veces más flexible que el eucalipto bajo la acción de las cargas de compresión.

Figura 19.

Muestras verdes ensayadas bajo el modo de compresión



Nota: relación entre la densidad verde y a) MOR de *Eucalyptus globulus*, b) MOE de *Eucalyptus globulus*, c) MOR de *Cupressus macrocarpa*, y d) MOE de *Cupressus macrocarpa*.

Rigidez y Resistencia a la flexión

Los resultados promedio de las pruebas de flexión llevadas a cabo en las 50 muestras de madera (30 de eucalipto y 20 de ciprés) se dan por grupo de edad en la Tabla 6. En la figura 20 se contrasta para ambas especies el MOR y MOE de flexión calculado contra las densidades verdes correspondientes.

Tabla 6.

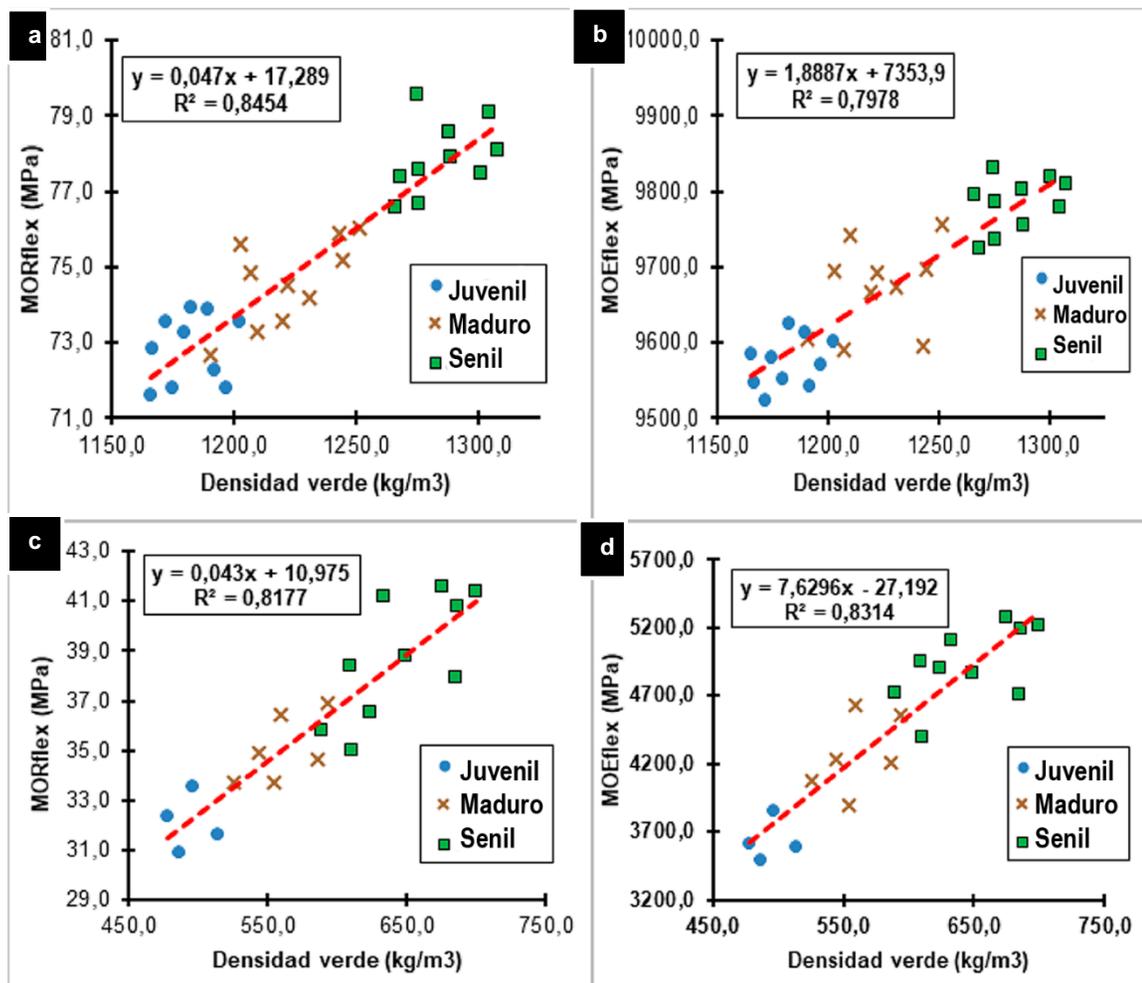
MOR y MOE promedio por grupo de edad de las muestras de *Eucalyptus globulus* y *Cupressus macrocarpa* ensayadas en el modo de flexión.

<i>Eucalyptus globulus</i>				<i>Cupressus macrocarpa</i>			
Grupo de edad	Densidad verde promedio (kg/m ³)	MORflex promedio (MPa)	MOEflex promedio (MPa)	Grupo de edad	Densidad verde promedio (kg/m ³)	MORflex promedio (MPa)	MOEflex promedio (MPa)
J	1182	72,9	9574	J	494	32,1	3635
M	1222	74,6	9671	M	560	35,1	4265
S	1285	77,9	9784	S	646	38,7	4935
Media	1230	75,1	9676	Media	590	41,2	4474
Desviación estándar	45,09	2,31	95,34	Desviación estándar	69,10	3,28	578,18
Coefficiente de variación	0,04	0,01	0,01	Coefficiente de variación	0,12	0,09	0,13

Los resultados obtenidos en este modo mecánico muestran para ambas especies tendencias similares a las obtenidas en el modo de compresión. El MOR y MOE se incrementa a medida que el tejido envejece y los valores promedio de MOR y MOE en las muestras de eucalipto son 1,82 y 2,16 veces mayores a los obtenidos en las muestras de ciprés. Con un p-valor = 1,402E-04 y 3,381E-03, respectivamente, se comprueba que el tejido de las muestras de eucalipto es aproximadamente 2 veces más resistente bajo la influencia de las cargas de flexión que el tejido de las muestras de ciprés.

Figura 20.

Muestras verdes ensayadas bajo el modo de flexión



Nota: relación entre la densidad verde y a) MOR de *Eucalyptus globulus*, b) MOE de *Eucalyptus globulus*, c) MOR de *Cupressus macrocarpa*, y d) MOE de *Cupressus macrocarpa*.

Luego del análisis estadístico se logró comprobar que todas las propiedades mecánicas entre especies y edades presentan diferencias significativas, es decir que su p-valor fue menor al nivel de significancia utilizado de 0,05 por lo que se comprueba cada una de las hipótesis planteadas en base a estudios anteriores.

Capítulo V

Discusión

Análisis microscópico

Las traqueidas longitudinales del ciprés muestran una disminución cuasi lineal de la densidad debido a un aumento cuasi lineal en el área lo que se encuentra estrechamente relacionado con el incremento en la demanda de agua, minerales y nutrientes a medida que el árbol crece. El aumento en la cantidad de traqueidas radiales probablemente se encuentra ligado al crecimiento radial del tronco, que exige un mayor flujo de sustancias nutritivas a través del tejido; mientras que la disminución del número de traqueidas longitudinales está directamente relacionada con el aumento en el área del lumen de estas células (Richter, Grosser, Heinz, & Gasson, 2004).

Las traqueidas en las maderas blandas tienen funciones de transporte y soporte mecánico; mientras que en las maderas duras los responsables de la resistencia mecánica del árbol son las fibras y los vasos (Sperry, Hacke, & Pitterman, 2006). De manera similar a lo que sucede con las traqueidas longitudinales del ciprés, la densidad y área del lumen de los vasos presentes en el eucalipto, disminuyen y aumentan casi linealmente en función del grupo de edad, lo que significa que ambos tipos de células cumplen con la función de transporte de agua y nutrientes cuyo requerimiento aumenta a medida que el tejido envejece.

El área promedio de las traqueidas longitudinales del ciprés es mayor que la de las traqueidas radiales, lo que indica que el transporte predominante de agua y nutrientes se produce en dirección vertical en el árbol. Uno de los cambios más significativos en cuestión de forma se dio en los vasos de las muestras de eucalipto, ya que se observó que sufren una clara transición de cuasi circulares a elípticos a medida que el tejido

envejece. La razón de este cambio probablemente se explica por la acelerada tasa de crecimiento del tejido del tronco del árbol y la consecuente adaptación de estas microestructuras a la nueva área del tejido en la madera cuando la albura se convierte en duramen; además las conexiones de la pared celular entre el parénquima y los vasos pueden ejercer presión estructural dentro de la composición del duramen (Bamber, 1987), (Song, Liu, Jiang, & Yin, 2011).

Los resultados de los parámetros de forma (redondez y esfericidad) en las muestras de eucalipto y ciprés demostraron que tanto en el parénquima longitudinal y radial como en las traqueidas longitudinales y radiales los valores se mantuvieron casi constantes en función del grupo de edad, lo que indica que la forma celular juvenil es la geometría óptima para todas las etapas de crecimiento.

Propiedades mecánicas

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de compresión y flexión mecánica, se puede observar que, para las dos especies estudiadas, el MOR y MOE aumentan progresivamente a medida que la madera envejece. Estos resultados coinciden con el contexto general de los materiales biológicos y su versatilidad, ya que, experimentan una variación en las propiedades mecánicas con la edad o como respuesta a la fuerza a la que son expuestos. Las paredes celulares de las plantas juveniles son dúctiles (resisten los cambios de forma sin romperse), mientras que, las paredes celulares de plantas maduras y seniles son más resistentes (recuperan su posición o forma original después de la exposición a cargas externas) (Niklas, 1992).

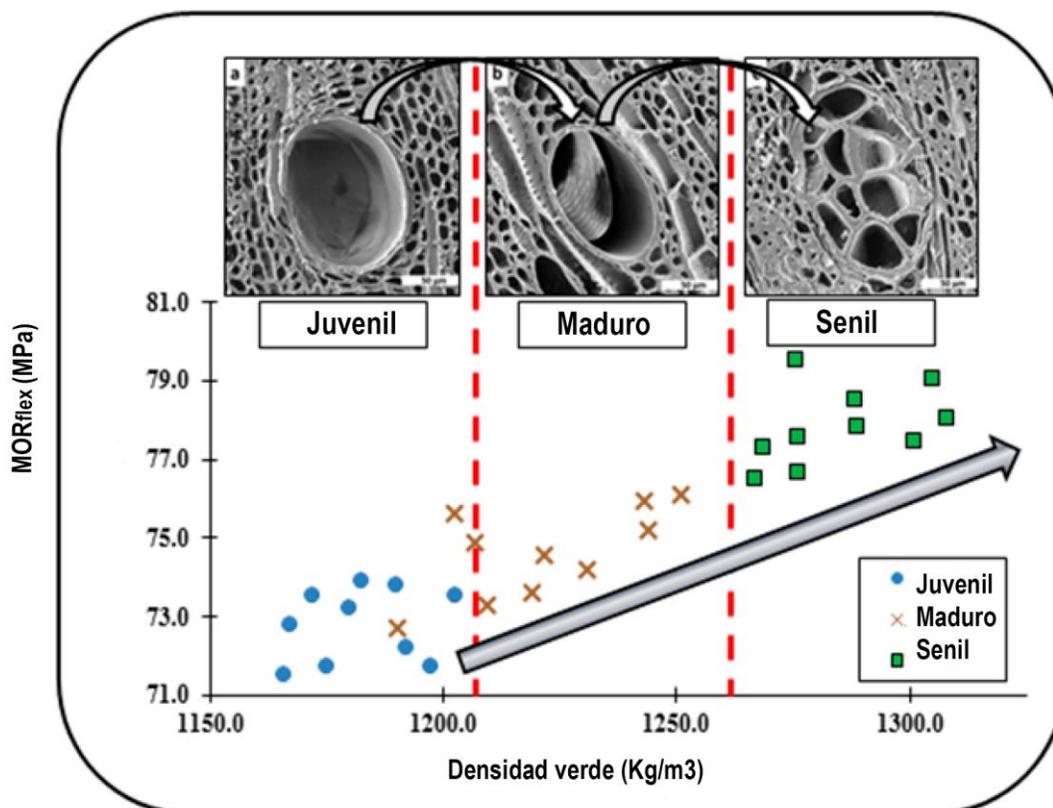
En los tejidos de madera juveniles la celulosa se acumula gradualmente en las paredes celulares del cámbium; la lignina produce un efecto similar en los tejidos maduros y seniles lo que influye claramente en la transición de forma de las fibras y vasos, así como en las traqueidas longitudinales y radiales, como se puede observar en las figuras

13, 15 y 17. Las microfibrillas de celulosa son más flexibles que la lignina que es bastante rígida, esta es la razón por la que los tejidos de madera dura y seniles son más rígidos y mecánicamente resistentes (figura 21) que los tejidos juveniles y también explica la transición de resistencia y flexibilidad por grupo de edad (González & Nguyen, *Senile coconut palms: Functional design and biomechanics of stem green tissue*, 2017).

Como se puede observar en la figura 21 es claramente visible que las paredes celulares de los tejidos juveniles son más delgadas que las que se observan en los tejidos de mayor edad; por lo tanto, se puede inferir, que con el tiempo, a medida que la microestructura del tejido de madera alcanza el estado de madurez, se forman varias capas de pared celular secundaria donde se acumula toda la lignina y le da al tronco del árbol mayor resistencia y rigidez. La lignina es un tipo de polímero orgánico complejo que forma materiales estructurales básicos en el soporte de los tejidos de madera de los árboles. Los árboles se vuelven más rígidos a medida que aumenta la edad y se resisten las cargas externas como la presión del viento, con un material de alta rigidez a la flexión, que se logra mediante dos estrategias posibles (i) la formación permanente de nuevas capas lignificadas de paredes celulares que permiten una mejor acumulación de material, aumentando la densidad del tejido de madera y, por lo tanto, aumentando el módulo de elasticidad; y (ii) al aumentar los diámetros de la pared celular a través del crecimiento secundario, lo que resulta en un aumento considerable en el momento de inercia del tronco del árbol con el consiguiente incremento de su rigidez a la flexión.

Figura 21.

Incremento en el espesor de la pared celular de los vasos y su influencia en la resistencia del tejido de Eucalyptus globulus



Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La composición de las maderas blandas es más simple que la de las maderas duras. Las maderas blandas tienen menos tipos de células (traqueidas longitudinales, parénquima longitudinal y radial), su disposición es más regular y las microestructuras tisulares sufren menos cambios en términos de forma y composición.

Los vasos analizados en las muestras de eucalipto presentaron una disminución de densidad directamente relacionada con el incremento de área; además de esto fue la única microestructura en la que se encontró una diferencia significativa relacionada con la redondez con un cambio visible en la forma de las células que se vuelven más angulares con la edad. La esfericidad también presentó diferencias significativas indicando que los vasos adoptan una forma más elíptica con el paso del tiempo.

Las traqueidas longitudinales presentes en el ciprés, de manera similar a los vasos, sufrieron un incremento de área con una consecuente disminución de densidad a medida que transcurre el tiempo; la redondez y la esfericidad se mantuvieron constante en todas las edades, y solo se observó diferencia significativa al compararlas con el parénquima longitudinal del eucalipto, indicando que las traqueidas longitudinales presentan una forma visiblemente más circular que sus análogas en la especie de madera dura.

El parénquima longitudinal y radial del eucalipto, así como las traqueidas radiales del ciprés no presentaron cambios ni tendencias significativas entre edades ni especies en términos de densidad, área, redondez y esfericidad. La única diferencia relevante se

presentó en la esfericidad de las traqueidas radiales que de forma similar a las traqueidas longitudinales se mostraron más circulares que el parénquima radial del eucalipto.

En cuanto al rendimiento mecánico, se comprobó la hipótesis, de que se encuentra estrechamente relacionado con la composición microestructural de cada especie. El sistema vascular poroso compuesto por fibras, vasos y parénquima, proporcionan la mayor parte del soporte estructural en las maderas duras mientras que en las maderas blandas lo hacen las traqueidas longitudinales.

Los análisis estadísticos determinaron que todas las variables estudiadas para especies y grupos de edad cumplieron con las condiciones de normalidad para realizar los análisis de varianzas, lo que permitió identificar las tendencias y diferencias significativas de los resultados obtenidos.

Cabe destacar que los resultados experimentales presentados son válidos para las condiciones específicas del área en la que se obtuvieron las muestras: región geográfica, altitud, condiciones climáticas, edades, altura del tronco y posiciones periféricas.

Por medio del análisis de las microfotografías se identificó claramente para las dos especies el incremento progresivo del grosor de la pared celular a medida que el tejido de madera envejece, teniendo un mayor impacto en la especie de eucalipto (Figuras 12 y 14).

El comportamiento de la madera de eucalipto con respecto a las fuerzas de compresión y flexión (MORcomp y MORflex) la hace adecuada para aplicaciones estructurales; se puede usar de manera efectiva como vigas, columnas, marcos de pórticos y armaduras en edificios de baja y media altura (edificios residenciales). Por otro lado, la madera de ciprés presenta ventajas de flexibilidad que pueden ser aprovechadas

en productos de madera de ingeniería y biopaneles compuestos, donde el equilibrio entre resistencia y rigidez es de gran relevancia.

Recomendaciones

- Aumentar el tamaño de la muestra obteniendo los datos de una mayor cantidad de especímenes para cada edad y especie.
- Es necesario realizar pruebas en una mayor cantidad de muestras para cada ensayo de caracterización mecánica.
- Para futuros estudios que se realizarán para caracterizar completamente a ambas especies se pueden incluir muestras de madera de otras alturas de tronco, posiciones periféricas e incluso diferentes regiones, altitudes, condiciones climáticas y edades.

Bibliografía

- Arroyo, C., Debut, A., Vaca, A., Stael, C., Guzman, K., & Cumbal, B. (2016). Reliable tools for morphological properties at nanoscale. *Biology and Medicina*, 1.
- Bamber, R. (1987). Sapwood and Heartwood. *Forestry Commission of New South Wales*.
- Cox, E. (1927). A method of assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains. *Journal of Paleontology*, 179-183.
- DIN. (2013). 52182: "Testing of wood: determination of density".
- DIN. (2013). 52185 *Testing of wood: compression test parallel to grain*.
- DIN. (2013). 52186: *Testing of wood: bending test*.
- Fernández, A., & Ovando, E. (2018). Redondez y esfericidad de partículas de relaves mineros, utilizando programas automáticos. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. León: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica A.C.
- Gatzuk, L. (1980). Age states of plants of various growth forms: a review. *Journal of Ecology*, 675-696.
- Gimenez, A., Moglia, J., Hernandez, P., & Gerez, R. (2005). *Anatomía de Madera*. Santiago del Estero: Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- González, O. (2018). *The Ingenious Tree of Life - A Biomechanical Approach to Cocowood Science*. Alemania: Lambert Academic Publishing.
- González, O., & Nguyen, K. (2017). Senile coconut palms: Functional design and biomechanics of stem green tissue. *Wood Material Science & Engineering*, 98-117.

- Guridi, L. (1977). Método de ablandamiento de madera dura y muy dura para la obtención de cortes en xilotomo. *Ciencia forestal*, 2(10), 59-64.
- Gutiérrez, H., & de la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill.
- Hernández, A. (2016). Albura y Duramen. *Saber Más*, 49-50.
- INEN, 2.-7. (2015). *Capítulo 7: Estructuras de madera*. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN.
- Jímenez, F., & Muschler, R. (1999). *Conceptos básicos de agroforestería*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Knippers, J., & Speck, T. (2012). Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspiration & biomimetics*, 7(1), 1-10.
- Maquívar, M. (2018). *El imaginero novohispano y su obra: Las esculturas de Tepotzotlán*. Ciudad de México: Secretaría de Cultura - Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Montoya, J. (1995). *El Eucalipto*. Bilbao: Mundi-Prensa.
- Niklas, K. (1992). *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function*. Chicago: University of Chicago press.
- Nutsch. (2000). *Tecnología de la madera y del mueble*. España: Reverté S.A.
- Osorio, Y., Garzon, K., & Jimenez, J. (2014). *Madera como material de construcción*.
- Richter, H., Grosser, D., Heinz, I., & Gasson, P. (2004). List of Microscopic Features for softwood identification. *IAWA Journal*, 1-70.

- Ross, R., Bergman, R., Cai, Z., Carll, C., Clausen, C., & Dietenberger, M. (2010). Wood handbook; wood as an engineering material. *Forest Products Laboratory*.
- Samuel, L., Shellhorn, W., & Robert, W. (1957). Rapid Method for preparing wood sections. *Stain Technology* , 32(4), 157-160.
- Schoch, W., Heller, I., Schweingruber, F., & Kienast, F. (2004). *Wood anatomy of central European Species*. (WSL) Recuperado el 15 de 02 de 2018, de <http://www.woodanatomy.ch/preparation.html>
- Song, K., Liu, B., Jiang, X., & Yin, Y. (2011). Cellular changes of tracheids and ray parenchyma cells from cambium to heartwood in *Cunninghamia lanceolata*. *Journal of Tropical Forest Science*, 478-487.
- Spavento, E., Keil, G., & Monteoliva, S. (2008). *Propiedades físicas de la madera*. La Plata: Universidad Nacional de la Plata.
- Spavento, E., Keil, G., & Monteoliva, S. (2008). *Propiedades mecánicas de la madera*. La Plata : Universidad Nacional de la Plata.
- Speck, T., & Burgert, I. (2011). Plant stems: functional design and mechanics. *Annual Review of Materials Research*, 41, 169-193.
- Sperry, J., Hacke, U., & Pitterman, J. (2006). Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. *American Journal of Botany*, 1490-1500.
- Thinley, C., Palmer, G., Vanclay, J., & Henson, M. (2005). Spiral and interlocking grain in *Eucalyptus dunnii*. *European Journal of Wood and Wood Products*, 63(5), 372-379.
- Ugural, A. (2008). *Mechanics of Materials*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.

Wadell, H. (1932). Volume, shape and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, 443-451.

Wadell, H. (1935). Volume, shape, and roundness of quartz particles. *Journal of Geology*, 250-280.

Anexos