

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ÁREA INTEGRADA



TRABAJO DE GRADUACIÓN

**DETERMINACIÓN DE DIEZ PROPIEDADES FISICOMECÁNICAS DEL DURAMEN
DEL HÍBRIDO *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* PARA SU
INDUSTRIALIZACIÓN**

CINDY MARIA CAMEY RIVAS

GUATEMALA, MARZO 2026

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ÁREA INTEGRADA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**DETERMINACIÓN DE DIEZ PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS DEL DURAMEN
DEL HÍBRIDO *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* PARA SU
INDUSTRIALIZACIÓN**

PRESENTADO A LA HONORALE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE
AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

POR

CINDY MARIA CAMEY RIVAS

EN EL ACTO DE INVESTIDURA COMO
INGENIERA EN INDUSTRIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES

EN EL GRADO ACADÉMICO DE

LICENCIATURA

GUATEMALA, MARZO 2026

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMÍA



RECTOR

M. A. WALTER MAZARIEGOS BIOLIS

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANO	Dr. Marvin Roberto Salguero Barahona
VOCAL II	Dra. Gricelda Lily Gutiérrez Álvarez
VOCAL III	Ing. Agr. M.A. Jorge Mario Cabrera Madrid
SECRETARIO	Ing. Agr. Edi Noé Quan Barrios

GUATEMALA, MARZO 2026

Guatemala, marzo de 2026

Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala

Honorables miembros:

De conformidad con las normas establecidas por la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someterme a su consideración, el trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE DIEZ PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS DEL DURAMEN DEL HÍBRIDO *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* PARA SU INDUSTRIALIZACIÓN**, como requisito previo a optar al título de **Ingeniera en Industrias Agropecuarias y Forestales** en el grado académico de **Licenciatura**.

Dicho trabajo de graduación se presenta con los requisitos necesarios para su aprobación, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

CINDY MARIA CAMEY RIVAS

TRABAJO QUE DEDICO

A:

DIOS

Por darme fuerzas, por escucharme incluso cuando yo estaba en silencio, guiarme y enseñarme que todo pasa por algo, por estar conmigo en los momentos más difíciles, sin Él no estaría hoy aquí.

MIS PAPÁS

Por apoyarme en todo momento y por ser mi motivación más grande. Por demostrarme que con esfuerzo y perseverancia se alcanzan las metas, por acompañarme en cada etapa de este camino. Gracias por creer en mí, por no dejarme caer, por su paciencia, su amor incondicional, valoro cada sacrificio, cada consejo y cada uno de los abrazos que me daban la fuerza que necesitaba para llegar hasta aquí. Este logro también es suyo.

MI HERMANA

Dianita, por tu apoyo incondicional, por confiar en mí incluso cuando yo dudaba, por ayudarme a ver de lo que era capaz. Gracias por hacerme reír, por escucharme, consolarme y acompañarme no solo en este camino, sino en todos los años que hemos compartido. Gracias por siempre estar para mí, por cada consejo y por cada palabra que me motivó a ser mejor, por ser mi mejor amiga y la excelente hermana que sos.

MIS ABUELOS

Kathy, Jorge, Pedro y Margarita porque han estado conmigo desde siempre, acompañándome en cada etapa de mi vida. Gracias por cuidarme con amor, por su protección y por demostrarme cuánto significo para ustedes. Su cariño ha sido un refugio seguro y bendición en mi camino.

MIS PRIMOS

Dafne, Isabella, Marianita, Nataly, Kenneth, Keyden, Camila, Iann, Emiliano, Jonathan, Antony Paula y Pablo por cada momento compartido, por hacerme feliz incluso en los días más difíciles. Este logro también lleva un pedacito de cada uno de ustedes, porque me recordaron que no estaba sola y que siempre había razones para seguir adelante.

MIS TÍOS

Por compartir momentos alegres, por hacerme sentir querida e importante.

AGRADECIMIENTOS

A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios que me brindó la oportunidad y privilegio de formarme profesionalmente y crecer tanto académica como personalmente
Facultad de Agronomía	Por proporcionarme los conocimientos técnicos y las bases que sustentan mi trabajo, pero también por despertar y fortalecer en mí el compromiso con el sector agroindustrial y forestal, que hoy forma parte de mi identidad profesional.
Escuela Nacional Central de Agricultura	Por abrir las puertas con confianza, por apoyarme y brindarme la oportunidad de seguir aprendiendo durante mi Ejercicio Profesional Supervisado.
Ingeniera Gabriela Tánchez	Por su asesoría, su apoyo constante, la confianza que depositó en mí, el tiempo y atención brindados durante este proceso. Su orientación me dio tranquilidad y confianza en los momentos más importantes.
Ingeniera Mónica Aldana	Por acompañarme y supervisarme durante este proceso, por impulsarme a dar más de lo que creía posible. Su confianza, y reconocimiento han significado mucho para mí, han sido un impulso, validación y motivación para seguir adelante.
Ingeniero Víctor Macario	Por ser mi maestro guía durante el Ejercicio Profesional Supervisado y por abrirme las puertas al mundo forestal, por compartir sus conocimientos, experiencias, por su paciencia y confianza para realizar la investigación.

**Peritos Forestales de la
Escuela Nacional Central
de Agricultura**

Promociones 23-25 y 24-26, por el apoyo, tiempo y cariño brindado durante mi Ejercicio Profesional Supervisado. Su compañía no solo fue fundamental para el desarrollo de mi trabajo, sino que también dejó en mí enseñanzas valiosas, tanto en el ámbito profesional como personal.

Mis amigos

Ricardo Morales, Sofía Paz, Mariana Colón, Magly Juarez, Katia Secaída, Mellany Ambrocio, Mario García, y Carlos Bonilla porque esta etapa no la viví sola, la vivimos juntos. Gracias por cada experiencia compartida, por las noches de desvelo haciendo trabajos, por cada lágrima que no tuve que derramar sola, y por las risas en medio del estrés. Su apoyo, motivación, amistad, paciencia, tiempo y cariño hicieron que este camino fuera mucho más que una meta académica; lo transformaron en una etapa llena de aprendizajes, unión y recuerdos que guardaré siempre en el corazón. Qué bonito ha sido crecer y seguir creciendo acompañada, apoyada y querida por ustedes.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDO	PÁGINA
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xv
GLOSARIO	xvi
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	5
MARCO TEÓRICO.....	7
Marco conceptual	7
Características morfológicas	7
Características físicas	7
Normas ASTM.....	7
Especimen	8
Fuste	8
Tipos de corte de la madera	8
Pruebas físicas de la madera.....	8
Pruebas mecánicas.....	9
Marco referencial	10
Antecedentes	10
Ubicación geográfica.....	10
Extensión territorial	11

Límites y vías de acceso	11
<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis</i>	11
Plantación de <i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis</i>	12
Características taxonómicas de <i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis</i>	12
Ubicación de plantación	12
Suelo	13
Clima	14
Plantaciones de Eucalyptus en Guatemala	14
Plantaciones de <i>E. urophylla x E. grandis</i> en Guatemala	15
Desarrollo de clones de <i>E. urophylla x E. grandis</i> en la costa sur de Guatemala ..	16
Estudios de propiedades fisicomecánicas realizados previamente	17
Estudios de propiedades fisicomecánicas del <i>E. urophylla x E. grandis</i>	19
Pruebas físicas y mecánicas realizadas	20
Clasificación de densidad.	20
Clasificación de las propiedades mecánicas	21
Resultados de pruebas de tensión del <i>E. urophylla x E. grandis</i> en México	22
Valores mínimos de uso para la madera	22
OBJETIVOS	25
Objetivo general	25
Objetivos específicos	25
METODOLOGÍA	26
Diseño de investigación	26
Caracterización de los árboles	26
Identificación de los árboles	27
Población y muestra	28

Muestreo de los árboles	28
Tamaño de la muestra	28
Tratamiento de los árboles de la muestra.....	28
Talado de los árboles	28
Trozado del fuste	29
Aserrado de las trozas	30
Corte de la pieza central	30
Pruebas físicas	31
Contenido de humedad	31
Densidad	32
Registro de albura y duramen	33
Poder calorífico	34
Pruebas mecánicas	34
Flexión estática	35
Compresión paralela al grano	36
Compresión perpendicular al grano	37
Dureza	38
Corte paralelo al grano.....	39
Tensión paralela al grano.....	40
Tensión perpendicular al grano.....	41
Identificación del uso potencial de la madera de <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	41
RESULTADOS	44
Pruebas físicas	44
Contenido de humedad	44
Densidad	44

Poder calorífico	45
Pruebas mecánicas	45
Flexión estática	46
Compresión paralela al grano	47
Compresión perpendicular al grano	49
Dureza	50
Corte paralelo al grano.....	52
Tensión paralela al grano.....	53
Tensión perpendicular al grano.....	55
Clasificación del uso de la madera de <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	57
Resultado del uso potencial de la madera	57
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	58
CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES	62
REFERENCIAS.....	63
APENDICES	66

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 1 <i>Mapa de ubicación de plantación de E. urophylla x E. grandis</i>	13
Figura 2 <i>Mapa de ubicación de los árboles de E. urophylla x E. grandis.</i>	27
Figura 3 <i>Esquema de trozado de fuste para pruebas mecánicas</i>	29
Figura 4 <i>Pieza central de la troza</i>	30
Figura 5 <i>Probeta de flexión estática</i>	35
Figura 6 <i>Probeta de compresión paralela al grano</i>	36
Figura 7 <i>Probeta de compresión perpendicular al grano</i>	37
Figura 8 <i>Probeta de dureza</i>	38
Figura 9 <i>Probeta de corte paralelo al grano</i>	39
Figura 10 <i>Probeta de tensión paralela al grano</i>	40
Figura 11 <i>Probeta de tensión perpendicular al grano</i>	41
Figura 12 <i>A Resultado de laboratorio Ministerio de Energía y Minas</i>	66
Figura 13 <i>A Ejemplar de árbol de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis</i>	67
Figura 14 <i>A Árbol de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis seleccionado</i>	67
Figura 15 <i>A Selección y corte de árboles</i>	68
Figura 16 <i>A Medición de alturas de árbol</i>	68
Figura 17 <i>A Marcado del centro de la troza</i>	69
Figura 18 <i>A Aserrado de trozas</i>	69
Figura 19 <i>A Corte de probetas</i>	70
Figura 20 <i>A Secado de probetas</i>	70
Figura 21 <i>A Máquina universal</i>	71
Figura 22 <i>A Elaboración de prueba de flexión estática</i>	71
Figura 23 <i>A Elaboración de prueba de compresión paralela al grano</i>	72
Figura 24 <i>A Elaboración de prueba de compresión perpendicular al grano</i>	72
Figura 25 <i>A Elaboración de prueba de dureza</i>	73
Figura 26 <i>A Elaboración de prueba de corte paralelo al grano</i>	73
Figura 27 <i>A Elaboración de prueba de tensión paralela al grano</i>	74
Figura 28 <i>A Elaboración de prueba de tensión perpendicular al grano</i>	74

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PÁGINA
Tabla 1 <i>Pruebas físicas y mecánicas realizadas</i>	20
Tabla 2 <i>Clasificación de la madera según densidad básica</i>	20
Tabla 3 <i>Clasificación de las propiedades mecánicas</i>	21
Tabla 4 <i>Resultados de pruebas de E. urophylla x E. grandis en México</i>	22
Tabla 5 <i>Valores mínimos de uso para la madera</i>	23
Tabla 6 <i>Ficha de Campo de Árbol</i>	27
Tabla 7 <i>Ficha de campo de la troza de E. urophylla x E. grandis</i>	30
Tabla 8 <i>Pruebas mecánicas realizadas</i>	34
Tabla 9 <i>Resultados de prueba de flexión estática en las trozas base</i>	46
Tabla 10 <i>Resultados de prueba de flexión estática en las trozas del medio</i>	46
Tabla 11 <i>Resultados de prueba de flexión estática en las trozas punta</i>	47
Tabla 12 <i>Resultados de prueba de compresión paralela en las trozas base</i>	47
Tabla 13 <i>Resultados de prueba de compresión paralela en las trozas del medio</i>	48
Tabla 14 <i>Resultados de prueba de compresión paralela en las trozas punta</i>	48
Tabla 15 <i>Resultados de prueba de compresión perpendicular en las trozas base</i>	49
Tabla 16 <i>Resultados de prueba de compresión perpendicular en las trozas del medio</i>	49
Tabla 17 <i>Resultados de prueba de compresión perpendicular en las trozas punta</i>	50
Tabla 18 <i>Resultados de prueba de dureza en las trozas base</i>	50
Tabla 19 <i>Resultados de prueba de dureza en las trozas del medio</i>	51
Tabla 20 <i>Resultados de prueba de dureza en las trozas punta</i>	51
Tabla 21 <i>Resultados de prueba de corte paralelo al grano en las trozas base</i>	52
Tabla 22 <i>Resultados de prueba de corte paralelo al grano en las trozas del medio</i>	52
Tabla 23 <i>Resultados de prueba de corte paralelo al grano en las trozas punta</i>	53
Tabla 24 <i>Resultados de prueba de tensión paralela en las trozas base</i>	53
Tabla 25 <i>Resultados de prueba de tensión paralela en las trozas del medio</i>	54
Tabla 26 <i>Resultados de prueba de tensión paralela en las trozas punta</i>	54
Tabla 27 <i>Resultados de prueba de tensión perpendicular en las trozas base</i>	55
Tabla 28 <i>Resultados de prueba de tensión perpendicular en las trozas del medio</i>	55
Tabla 29 <i>Resultados de prueba de tensión perpendicular en las trozas punta</i>	56

Tabla 30 <i>Clasificación del uso de la madera</i>	57
Tabla 31 <i>Resultado del uso potencial de la madera</i>	57
Tabla 32 B <i>Espesor de albura y duramen</i>	75

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ASTM	American Society for Testing and Materials
FSC	Forest Stewardship Council
CH	Contenido de humedad
ρ	Densidad
MJ/kg	Megajulios por kilogramo
Kcal/kg	Kilocalorías por kilogramo
Ha	Hectáreas
m	Metro
Mpa	Megapascuales
cm	Centímetros
°C	Grados Celsius
<	Menor que
>	Mayor que
≤	Menor o igual que
≥	Mayor o igual que

GLOSARIO

Ápice	Extremo superior del eje principal del árbol donde ocurre el crecimiento en longitud
Albura	Parte externa y más joven de la madera del tronco, generalmente de color más claro, menor durabilidad natural y mayor contenido de humedad que el duramen.
Compresión	Esfuerzo mecánico que actúa reduciendo la longitud de un material al aplicarse una carga en dirección opuesta a sus extremos; en madera puede evaluarse paralela o perpendicular al grano.
Duramen	Parte interna del tronco, formada por tejido más antiguo, con mayor resistencia natural a hongos, insectos y humedad debido a la presencia de extractivos; constituye la fracción más durable de la madera.
Espécimen	Muestra de árbol, troza o probeta seleccionada para su estudio, caracterización o ensayo en laboratorio.
Fuste	Parte del tronco del árbol de donde se obtienen las trozas evaluadas en secciones basal, media y apical para determinar variaciones en propiedades mecánicas.
Industrialización	Conjunto de procesos mecánicos y tecnológicos mediante los cuales la madera en rollo se transforma en productos con valor agregado, como madera aserrada, tableros o elementos estructurales.

Madera aserrada	Producto obtenido del corte longitudinal del tronco o de las trozas mediante sierras, destinado a usos estructurales, constructivos o industriales.
Madera en rollo	Tronco o sección del árbol sin procesar, obtenido después del aprovechamiento forestal y previo a su transformación industrial.
Madera seca	Madera que ha sido sometida a un proceso de secado natural o artificial hasta alcanzar un contenido de humedad menor al 12%, lo que mejora su estabilidad dimensional, resistencia mecánica y durabilidad.
Madera verde	Madera recién cortada que conserva un alto contenido de humedad natural, antes de someterse a procesos de secado.
Máquina universal	Equipo de laboratorio que aplica cargas controladas de flexión, dureza, compresión o tensión sobre probetas para determinar propiedades mecánicas como resistencia, módulo de elasticidad y módulo de ruptura.
Módulo de elasticidad (MOE)	Parámetro que mide la rigidez de la madera frente a esfuerzos, indicando la relación entre esfuerzo aplicado y deformación dentro del rango elástico.
Módulo de ruptura (MOR)	Esfuerzo máximo que la madera puede soportar antes de fallar en un ensayo de flexión, utilizado para estimar su resistencia mecánica.
Probeta	Muestra de madera con dimensiones y forma normalizadas, preparada específicamente para la realización de ensayos físicos o mecánicos.
Propiedades fisicomecánicas	Conjunto de características físicas y mecánicas de la madera que determinan su potencial uso industrial

Rodela	Sección transversal del tronco obtenida mediante un corte perpendicular al eje longitudinal, utilizada para estudios de caracterización de la madera.
Sección apical	Porción superior del fuste o del árbol correspondiente a la zona cercana al ápice, donde la madera suele presentar menor diámetro, generalmente se presentan menores valores de resistencia mecánica en comparación con la base y la sección media del fuste.
Tensión	Esfuerzo mecánico que actúa estirando un material al aplicar fuerzas en sentidos opuestos; en madera puede evaluarse paralela o perpendicular al grano
Troza	Segmento del fuste del árbol cortado en longitudes determinadas para su transporte, procesamiento industrial o preparación de probetas.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar diez propiedades fisicomecánicas del duramen del híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* cultivado en la Escuela Nacional Central de Agricultura ENCA, con el fin de identificar su potencial para procesos de industrialización y aprovechamiento con valor agregado en Guatemala. El estudio se desarrolló en una plantación de 21 años, establecida en una superficie aproximada de 0.30 hectáreas. De un total de 210 árboles, se seleccionaron diez individuos representativos para la obtención de las muestras de madera.

El *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* destaca por su adaptabilidad, rápido crecimiento y proyección industrial, lo que ha impulsado su establecimiento en plantaciones forestales del país. Sin embargo, la información técnica nacional sobre las propiedades fisicomecánicas del duramen bajo condiciones locales es limitada. Esto justificó la elaboración de la investigación, enfocada específicamente en el duramen por ser la parte más durable y aprovechable de la madera, debido a su resistencia natural a hongos, insectos y humedad, así como a la presencia de taninos y extractivos. La albura, en cambio, presenta una proporción mínima y se convierte en merma durante el aserrío.

Se determinaron tres propiedades físicas tales como: contenido de humedad, densidad básica, y poder calorífico, y siete propiedades mecánicas: flexión estática, compresión paralela y perpendicular al grano, dureza, corte paralelo, tensión paralela y tensión perpendicular al grano. Todas las pruebas se realizaron siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM D143-94, lo que garantizó confiabilidad en los resultados.

La madera del duramen presentó un contenido de humedad inicial de 110.6 %, indicando una condición de saturación de fibras. La densidad básica promedio fue de 0.46 g/cm³, clasificándose como madera de densidad media con un equilibrio favorable entre peso y resistencia. El poder calorífico promedio fue de 16.46 MJ/kg, lo que confirma su viabilidad como biomasa energética.

En las propiedades mecánicas se observaron variaciones a lo largo del fuste. La sección basal presentó los valores más altos de resistencia y rigidez, seguida de la

sección media y, finalmente, de la sección apical. Este comportamiento permitió establecer una asignación de usos diferenciada según la posición del fuste. La base del árbol es adecuada para aplicaciones estructurales y de alto desempeño, como crucetas, tarimas pesadas, pisos y mangos de herramientas. La sección media resulta apta para mobiliario escolar y carpintería general, mientras que la sección apical se recomienda para trabajos ligeros, decorativos y embalajes.

La información generada constituye una base técnica sólida para la ENCA y para el sector forestal guatemalteco. Los resultados fortalecen la toma de decisiones en manejo forestal, transformación de la madera y desarrollo de productos con valor agregado, contribuyendo al vínculo entre la academia y el sector productivo del país.

Palabras clave: ASTM, duramen, comportamiento mecánico, aprovechamiento industrial

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento sostenible de especies forestales de rápido crecimiento se ha consolidado como una estrategia clave para fortalecer la producción de madera en países tropicales como Guatemala. Entre estas especies, el híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* destaca por su notable adaptabilidad, rápido desarrollo y versatilidad para aplicaciones industriales. Su alto potencial productivo y la creciente demanda comercial lo convierten en un recurso estratégico tanto en plantaciones académicas como comerciales. La caracterización detallada de las propiedades físicas y mecánicas de su duramen bajo condiciones locales es indispensable para garantizar su uso eficiente y responsable.

La Escuela Nacional Central de Agricultura -ENCA-, fundada en 1921, ha desempeñado un papel fundamental en la formación de profesionales en las áreas agropecuaria, forestal y agroindustrial. Desde sus primeros años en las fincas La Aurora y La Alameda, hasta su establecimiento definitivo en la finca Bárcena en 1944, la ENCA se ha consolidado como un referente nacional en la educación técnica. En respuesta a las demandas del sector productivo, en 2022 incorporó la carrera de perito agroindustrial, ampliando su oferta académica y fortaleciendo la vinculación entre la formación profesional y la industria.

Las instalaciones de la ENCA permiten a los estudiantes interactuar directamente con procesos productivos reales, incluyendo espacios dedicados a la transformación de la madera y áreas de plantaciones forestales en las que se encuentran sembradas ocho especies diferentes: *Eucalyptus glupta*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus globulus* y *Corymbia citriodora* (García, 2024). Se escogió trabajar específicamente con *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* dado que es la especie que mejor se adapta al clima local y porque existen buenos ejemplares tanto en la escuela como en plantaciones comerciales como las del ingenio Pantaleón.

La presente investigación se desarrolló en las instalaciones de la ENCA, donde se evaluaron 210 árboles del híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* con 21 años (Macario, 2024), establecidos en una superficie de 0.30 hectáreas. Se aplicó un

muestreo aleatorio simple, seleccionando diez árboles representativos para la realización de tres pruebas físicas (contenido de humedad, densidad básica y poder calorífico) y siete pruebas mecánicas (flexión estática, compresión paralela y perpendicular al grano, dureza, corte paralelo al grano, tensión paralela y perpendicular al grano), siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D143-94.

Los resultados obtenidos permitieron caracterizar integralmente la madera del duramen de la especie, evidenciando un contenido de humedad elevado en estado verde, una densidad básica promedio de 0.46 g/cm^3 y un poder calorífico de 16.46 MJ/kg , lo que confirma su viabilidad como biomasa energética. Las propiedades mecánicas mostraron variaciones significativas a lo largo del fuste, siendo la base la sección con mayor resistencia y rigidez, seguida de la sección media y la punta. Esta diferenciación funcional permitió identificar usos potenciales específicos para cada sección del árbol, optimizando su aprovechamiento industrial.

En conjunto, este estudio aporta información técnica relevante para el manejo, transformación y uso de la madera del duramen del híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* en Guatemala. Los resultados facilitan la industrialización con valor agregado, fortalecen la formación académica y contribuyen al desarrollo forestal sostenible en el país, estableciendo bases sólidas para una gestión eficiente, segura y responsable de los recursos forestales.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La ENCA actualmente cuenta con dos plantaciones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* una con 21 años de crecimiento y otra con cinco años, ambas ubicadas en áreas con alto potencial para la reforestación productiva.

Existe un interés creciente a nivel nacional por la plantación forestal y su aprovechamiento, especialmente por parte de empresas como Novaforest, que trabaja con plantaciones clonales de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, certificadas bajo el estándar FSC (Forest Stewardship Council), para la producción sostenible de madera industrial, incluyendo tarimas y productos derivados.

A pesar de este interés, no se dispone de estudios técnicos específicos que caractericen las propiedades fisicomecánicas del duramen de los árboles cultivados en la ENCA, lo que representa una limitante significativa para su transformación industrial, su comercialización estratégica y su aprovechamiento como recurso educativo, productivo y demostrativo.

Contar con información técnica precisa es esencial, considerando que el duramen constituye la parte más aprovechable de la madera, es menos susceptible al ataque de hongos, insectos y humedad debido a sus compuestos naturales como taninos y extractivos, y que la mínima proporción de albura contribuye a reducir la merma durante el aserrío.

El conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de la madera es indispensable para determinar su comportamiento estructural, resistencia y estabilidad, aspectos clave para asignar usos industriales adecuados y clasificar la madera conforme a normas internacionales, como la ASTM D143-94. La ausencia de estos datos afecta su competitividad y limita su incorporación en mercados nacionales e internacionales.

Frente a esta situación, se identifica la necesidad de determinar las diez propiedades fisicomecánicas del duramen del híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* cultivado en la ENCA, como una estrategia para generar información clave que contribuya a su industrialización, al desarrollo de productos madereros con valor agregado, al fortalecimiento de los procesos de aprendizaje práctico en el ENCA, y a

fomentar alianzas con el sector maderero externo, y a la promoción del manejo responsable y sostenible de los recursos forestales.

En este estudio se plantea responder a la siguiente pregunta principal:

¿Cuáles son las diez propiedades fisicomecánicas del duramen del híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* y cómo influyen en su potencial para procesos de industrialización?

Y las preguntas secundarias:

¿Qué resultados se obtienen al aplicar las pruebas fisicomecánicas al duramen de la madera de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* y cuál es el comportamiento en cuanto a la densidad, contenido de humedad, poder calorífico, flexión estática, compresión, dureza, corte y tensión?

¿Qué usos potenciales pueden asignarse al duramen de la madera *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* según las propiedades fisicomecánicas obtenidas?

MARCO TEÓRICO

Marco conceptual

Características morfológicas

Altura promedio. Los árboles de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* que se encuentran dentro de ENCA alcanzan una altura promedio aproximada de 30 metros.

Diámetro aprovechable. El diámetro aprovechable de los árboles es de 20 cm para realizar los ensayos fisicomecánicos.

Tronco y corteza. Su tronco es recto y cilíndrico. La corteza exterior es de color marrón claro, con aspecto de piel que se desprende en las tiras, dejando manchas grises o pardas sobre la corteza interior, que es más lisa.

Hojas. Sus hojas son sésiles, ovaladas y grisáceas, alargándose y tornándose coriáceas y de un color verde azulado brillante de adultas.

Condiciones de crecimiento. El árbol se desarrolla en altitudes desde 0 hasta 2,000 m. s. n. m., con una precipitación anual de 800 a 1,200 mm.

Características físicas

Color. La madera presenta tonalidades que varían desde un rosa salmón claro hasta un marrón rojizo oscuro. Su apariencia ha sido comparada con la de la caoba hondureña y el cerezo negro, y tiende a oscurecer con el tiempo (The Wood Database, 2025).

Brillo. Posee un brillo natural medio, lo que le confiere un acabado atractivo sin necesidad de tratamientos adicionales.

Olor. La madera seca no posee un olor distintivo, es inodora

Dirección del grano. El grano es predominantemente recto y uniforme, con una textura media y poros de tamaño pequeño a mediano (The Wood Database, 2025).

Normas ASTM

Son estándares técnicos desarrollados por la American Society for Testing and Materials -ASTM International-, una organización internacional reconocida por elaborar

y publicar las especificaciones técnicas voluntarias para materiales como madera. Estas normas se pueden utilizar en los diversos campos de la ingeniería, la industria y la investigación científica para asegurar la calidad, la seguridad, uniformidad y confiabilidad de los procesos y productos.

Para la elaboración de pruebas fisicomecánicas se utiliza la norma ASTM D143 es una norma ampliamente que se usa para establecer los métodos estandarizados en la determinación de propiedades mecánicas en probetas pequeñas de madera clara (ASTM Internacional, 2014).

Espécimen

Muestra de árbol que se utiliza para estudio, identificación o conservación. Puede ser un árbol completo o partes del mismo.

Fuste

Es la parte del tronco de un árbol que abarca entre las raíces y la copa del árbol, esta es generalmente la parte más recta y libre de ramas del árbol. Principalmente se utiliza para la obtención de madera aprovechable.

Tipos de corte de la madera

El Centro de Innovación Tecnológico de la Madera (2009), define a los cortes como:

Corte radial. Es el corte paralelo al eje longitudinal del tronco en el que la cara de mayor superficie es paralela a los radios y perpendicular a los anillos de crecimiento.

Corte tangencial. Es el corte paralelo al eje del tronco en el que la cara de mayor superficie es tangente a los anillos de crecimiento y perpendicular a los radios.

Corte transversal. Es el corte paralelo al eje del tronco, siendo intermedio entre el corte radial y tangencial

Pruebas físicas de la madera

Contenido de humedad. Según Córdoba (2012) la humedad es el agua contenida dentro de la madera, se determina cuando se relaciona el peso de la madera

en estado húmedo respecto al peso de la madera en estado anhidro o libre de humedad, se representa por medio de porcentaje.

Densidad. Suirezs & Berger (2009) indican que la densidad es la relación entre la masa m en gramos (gr) y el volumen V en cm^3 (gr/cm^3). Es decir, que la densidad es la cantidad de materia leñosa por unidad de volumen.

Poder calorífico. El poder calorífico de la madera es la cantidad de energía térmica que se libera cuando una determinada cantidad de madera se quema completamente en condiciones controladas. Se expresa en megajulios por kilogramo (MJ/kg) o kilocalorías por kilogramo (kcal/kg) (Ramírez & Rodríguez, 2012).

Pruebas mecánicas

Flexión estática. La prueba de flexión estática permite determinar la capacidad de la madera para resistir esfuerzos y deformaciones cuando se le aplica una carga transversal respecto a su eje longitudinal, reproduciendo las condiciones que experimentan los elementos estructurales en servicio.

Compresión paralela al grano. Esta prueba determina la capacidad de la madera para soportar cargas de compresión aplicadas en la dirección paralela a las fibras, evaluando propiedades como el módulo de elasticidad y la resistencia máxima a la compresión (ASTM Internacional, 2022).

Compresión perpendicular al grano. Esta prueba mide la resistencia de la madera a cargas de compresión aplicadas perpendicularmente a las fibras, siendo crucial para evaluar el comportamiento en puntos de apoyo y conexiones (ASTM Internacional, 2014).

Dureza. La dureza es la propiedad que determina la resistencia de la madera a la penetración, evaluada mediante la fuerza necesaria para incrustar una esfera metálica en su superficie.

Corte paralelo al grano. Mide la resistencia de la madera frente a esfuerzos cortantes aplicados en dirección longitudinal a las fibras, determinando su capacidad para evitar deslizamientos internos.

Tensión paralela al grano. La prueba de tensión paralela al grano evalúa la capacidad de la madera para resistir fuerzas de tracción aplicadas en la dirección de las fibras, determinando su resistencia y módulo de elasticidad en tensión (ASTM Internacional, 2022).

Tensión perpendicular al grano. Esta prueba mide la resistencia de la madera a fuerzas de tracción aplicadas perpendicularmente a las fibras, siendo esencial para evaluar el comportamiento en uniones y conexiones estructurales (ASTM Internacional, 2014).

Marco referencial

Antecedentes

El 31 de mayo de 1985 en el artículo 79 de la Constitución Política de la República de Guatemala, se establece la creación de la ENCA, para desarrollar planes de estudio agropecuario, forestal y agroindustrial, a nivel de enseñanza media, con carácter de entidad descentralizada y autónoma, con personalidad jurídica y patrimonio propio, declarando de interés nacional el estudio, aprendizaje, explotación, comercialización e industrialización agropecuaria.

La ENCA establecida en 1921, es una institución de enseñanza media especializada en la formación de técnicos en ciencias agrícolas y forestales. A lo largo de su trayectoria, ha contribuido al desarrollo del sector agropecuario nacional mediante la planificación y ejecución de actividades académicas, técnicas y de investigación orientadas al fortalecimiento productivo del país.

Ubicación geográfica

La ENCA se localiza en el kilómetro 17.5 de la carretera al Pacífico (CA-9 Sur), jurisdicción de Bárcena, municipio de Villa Nueva, departamento de Guatemala. Su ubicación estratégica le permite un fácil acceso desde la Ciudad de Guatemala, lo que favorece las actividades de investigación, plantación, extensión rural, entre otras. Sus coordenadas geográficas aproximadas son: latitud: 14.4760°N, longitud 90.5873°O (Escuela Nacional Central de Agricultura [ENCA], 2025).

Extensión territorial

La ENCA tiene una extensión territorial de 515.5 Ha. (Pineda, 1998)

Límites y vías de acceso

Barrera, et al., (2000) indica que la ENCA limita al norte con San José Villa Nueva, al sur con el ICTA, al este con la finca Santa Clara y al oeste con la aldea Bárcenas.

Se encuentra situada a 3 kilómetros de la cabecera municipal de Villa Nueva y a 17 kilómetros de la Ciudad Capital. Su acceso es a través de una carretera asfaltada que se comunica con la autopista CA-9, carretera al pacífico.

Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis

Según la EPPO (*European and Mediterranean Plant Protection Organization*), en español Organización Europea y Mediterránea para la Protección de las Plantas, registrada en la EPPO Global Database (2016), el híbrido resultante del cruce entre *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, es reconocido bajo la denominación taxonómica de *Eucalyptus urograndis*.

El *Eucalyptus urograndis* es un híbrido resultado del cruce entre *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, dos especies emparentadas del género *Eucalyptus*. Este híbrido ha sido desarrollado principalmente para plantaciones forestales comerciales, debido a su destacado comportamiento en plantaciones, que combina rasgos genéticos favorables de ambas especies parentales.

Por un lado, *Eucalyptus grandis*, originario de Australia, aporta su rápido crecimiento y productividad. Por otro lado, *Eucalyptus urophylla*, procedente del sudeste asiático, contribuye con su resistencia a enfermedades y adaptabilidad a condiciones tropicales. La combinación de estas características confiere al *E. urograndis* una alta tasa de crecimiento, resistencia a plagas, tolerancia a diversos ambientes tropicales y buena calidad de madera, factores que incrementan significativamente su eficiencia y rentabilidad en sistemas de producción forestal.

Estas cualidades han favorecido su implementación en proyectos de reforestación y producción energética en regiones tropicales, como en la costa sur de Guatemala,

donde se ha consolidado como una de las especies forestales más utilizadas en plantaciones comerciales de rápido crecimiento.

Plantación de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis

La plantación de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* fue establecida en el año 2004 y ocupa una superficie de 0.30 hectáreas, sitio específico donde se extrajo la muestra de los ejemplares de esta investigación. Además, se cuenta con otra plantación más reciente, con aproximadamente cuatro años de establecimiento, de la misma especie. Ambas plantaciones se encuentran dentro de la Escuela Nacional Central de Agricultura (ENCA), en el kilómetro 17.5 de la carretera al Pacífico. Cabe mencionar que estas áreas no han recibido un manejo silvicultural sistemático desde su establecimiento.

Características taxonómicas de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis

Nombre científico: *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*

Nombre común: Eucalipto urograndis

Clasificación Taxonómica

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Myrtales

Familia: Myrtaceae

Género: *Eucalyptus*

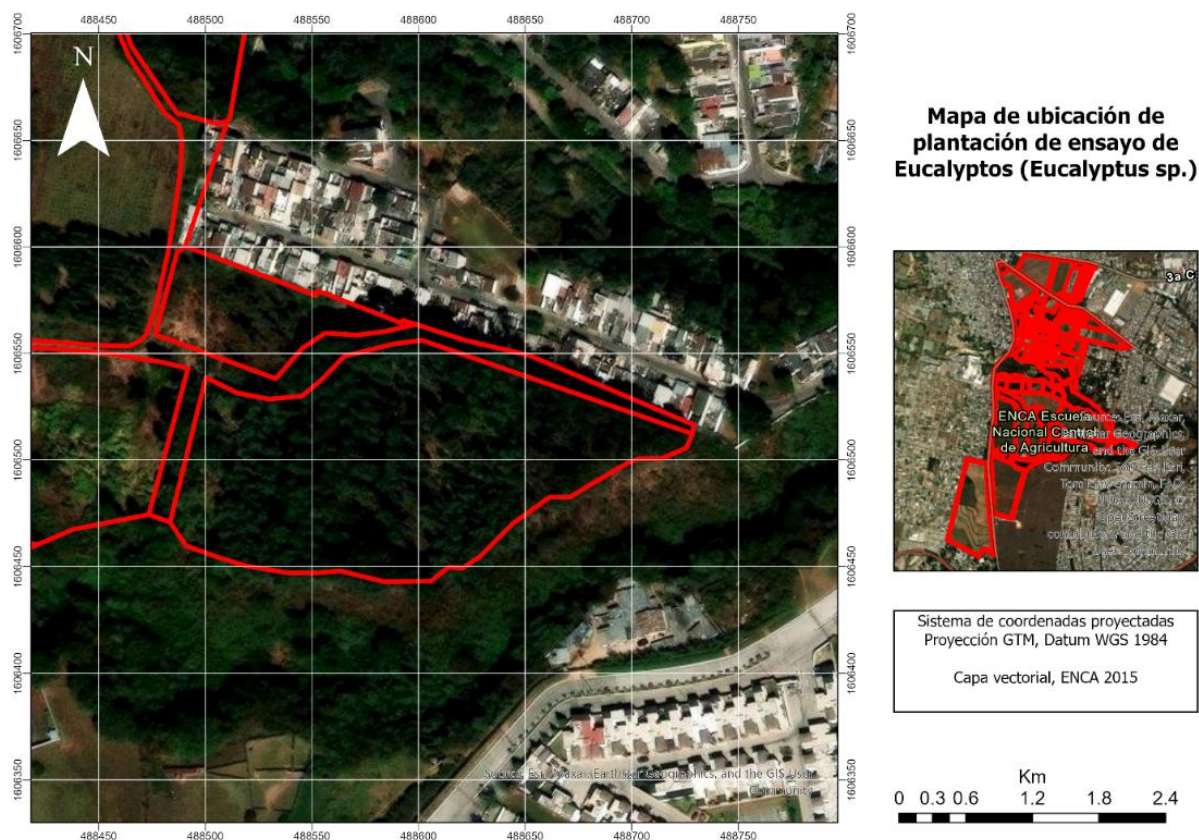
Híbrido: *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*

Ubicación de plantación

La plantación de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* abarca una superficie de 0.30 hectáreas y se encuentra ubicada dentro de la Escuela Nacional Central de Agricultura (ENCA), en el kilómetro 17.5 de la carretera al Pacífico. Esta área forma parte de un conjunto de plantaciones experimentales de eucaliptos destinadas a ensayos de investigación y desarrollo forestal (ver figura 1).

Figura 1

Mapa de ubicación de plantación de E. urophylla x E. grandis



Suelo

El suelo donde se encuentra establecida la plantación de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* presenta una composición de 0.43% de nitrógeno total y 0.52% de carbono orgánico, según lo reportado por Marroquín et al. (2025). De acuerdo con los criterios de clasificación propuestos por Moreno (1998), estos valores indican que se trata de un suelo extremadamente rico en nitrógeno, ya que supera el umbral de 0.221. Esta condición favorece no solo el crecimiento del eucalipto, sino que también permite considerar la implementación de cultivos asociados o sistemas agroforestales, aprovechando la fertilidad del suelo para diversificar la producción sin comprometer el desarrollo del cultivo principal.

Densidad aparente del suelo. La densidad aparente del suelo donde se encuentra establecida la plantación de *Eucalyptus* sp. Fue determinada mediante el método del cilindro, obteniéndose un valor de 1.12 g/cm³. De acuerdo con los criterios

establecidos por Moreno (1998), este valor corresponde a una compactación moderada, lo cual indica que el suelo presenta una estructura relativamente equilibrada en términos de porosidad y resistencia mecánica. Esta condición es favorable para el desarrollo del sistema radicular de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, ya que permite una adecuada circulación de aire y agua en el perfil del suelo, facilitando tanto la absorción de nutrientes como el anclaje de las raíces. Asimismo, al no tratarse de un suelo excesivamente compacto, se considera apto para el establecimiento de cultivos asociados o la implementación de sistemas agroforestales, siempre que se lleve a cabo un manejo adecuado que evite un aumento progresivo de la compactación, especialmente por el uso de maquinaria pesada.

Clima

Se caracteriza por un clima templado y subtropical de tierras altas, influenciado por su altitud y geografía. Según la clasificación climática de Köppen, el clima de Villa Nueva es un clima templado con estación seca en invierno y verano cálido. La temperatura media anual en el municipio es de aproximadamente 18.7 °C, con una precipitación anual promedio de 1,714 mm. (ClimateData, 2025)

Plantaciones de *Eucalyptus* en Guatemala

Los árboles del género *Eucalyptus*, se encuentran en diferentes sitios de Guatemala. Estos proporcionan variedad de bienes y servicios ya que la madera proporciona productos forestales con fines energéticos como lo es la leña y el chip, no obstante, los usos son diversos.

Actualmente, no se dispone de una cifra exacta sobre el número total de plantaciones de eucalipto en Guatemala. Sin embargo, según datos del Instituto Nacional de Bosques (INAB), en la Región IX, que abarca los departamentos de Escuintla, Suchitepéquez, Retalhuleu y municipios costeros de Quetzaltenango y San Marcos, se han registrado 1,976 hectáreas de plantaciones voluntarias del género *Eucalyptus* en el Registro Nacional Forestal (RNF) (Instituto Nacional de Bosques [INAB], 2021).

Según (Mejía, 2021), la empresa el Pedregal Escuintla, S.A., le provee a diferentes industrias de madera en chip como una fuente de la energía renovable, a las granjas

avícolas de fibra de madera para camas, así como también están iniciando la fabricación de tarimas de madera y cajas para embalaje.

Las plantaciones de *Eucalyptus* son de gran importancia para el desarrollo del sector forestal, debido a que de estas plantaciones se obtiene energía por la biomasa que produce madera con fines industriales y para construcciones, otro ejemplo son los fustes completos de diámetros menores de esta misma especie que se emplean en la construcción de vivienda (Instituto Nacional de Bosques [INAB], 2021).

Plantaciones de E. urophylla x E. grandis en Guatemala

En el año 2004 se sembraron 6 parcelas con diferentes especies de eucalipto: *Eucalyptus deglupta*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus saligna* y *Eucalyptus globulus*. Estas parcelas se ubicaron en diferentes fincas de la Costa Sur, con diversas características climáticas y de suelo, un año después se tomaron medidas de diámetros y alturas. Obteniendo resultados altamente satisfactorios en las variedades *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus camaldulensis*, ya que sus alturas superaban los siete metros y sus diámetros eran mayores de siete centímetros. Según técnicos forestales guatemaltecos que han realizado visitas técnicas a Brasil, estos indicadores de crecimiento son incluso más favorables en Guatemala, lo que evidencia el alto potencial de estas especies en condiciones locales (Alvarado, 2007). Por esta razón se ha motivado a establecer plantaciones con fines energéticos en Guatemala. La corporación Pantaleón sembró 100 hectáreas en el año 2005 y para el año 2016 sembraron 450 hectáreas, su objetivo era sembrar 2000 hectáreas aproximadamente en ese mismo año (Alvarado, 2007).

Empresas como Novaforest y el Grupo Pantaleón han establecido plantaciones de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* en áreas como Escuintla y Santa Lucía Cotzumalguapa. Ambas plantaciones utilizan clones de alta productividad que se han adaptado a las condiciones de suelo y clima de la región.

Las plantaciones que realiza la empresa Novaforest son renovadas al finalizar cada ciclo productivo, lo que significa que únicamente se cosechan los árboles establecidos específicamente para ese propósito. Estas plantaciones forestales se

caracterizan por tener un ciclo corto de rotación, estimado en aproximadamente seis años, lo que permite una producción continua y planificada de madera industrial bajo esquemas sostenibles

Desarrollo de clones de E. urophylla x E. grandis en la costa sur de Guatemala

En el año 2000, el Grupo Pantaleón inició proyectos forestales en la costa sur de Guatemala, estableciendo plantaciones energéticas de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* en 2005. Según (Instituto Nacional de Bosques [INAB], 2019) inicialmente, se utilizaron pilones producidos a partir de semillas provenientes de Brasil, Costa Rica y Colombia, logrando una producción promedio de 150 toneladas por hectárea en un ciclo de seis años. En 2008, se implementó un programa de selección y desarrollo clonal, seleccionando 200 árboles con características superiores. Estos árboles fueron clonados y plantados en la finca Las Delicias, en Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, donde se monitorearon durante ocho años. Como resultado, se identificaron los cinco clones más productivos, destacando el clon 116, que produce la misma biomasa que 3.75 hectáreas plantadas con pilones de semilla, permitiendo una reducción de hasta el 55% en los costos de manejo forestal. Estos clones demostraron alta productividad en condiciones específicas de altitud, precipitación, tipo de suelo y topografía. Actualmente, el Grupo Pantaleón utiliza exclusivamente estos cinco clones en sus plantaciones comerciales, optimizando la producción y reduciendo costos.

Es importante destacar que los clones utilizados fueron evaluados en fincas que presentan condiciones agroecológicas específicas: altitudes comprendidas entre 300 y 700 metros sobre el nivel del mar, precipitaciones superiores a los 3,500 mm anuales, suelos de textura franco, franco arenosa y franco arcillosa, así como topografías con pendientes entre el 5% y el 20%. A pesar de contar con clones previamente seleccionados y adaptados a estas condiciones, la empresa continúa innovando en el manejo forestal, incorporando nuevas prácticas que optimizan el rendimiento, la sostenibilidad y la calidad de la madera producida.

Estudios de propiedades fisicomecánicas realizados previamente

Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de cuatro especies de madera del Petén. La tesis *“Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de cuatro especies de madera del Petén”* (Rivas & Joachin, 2006) es un estudio preliminar que tuvo como objetivo caracterizar física y mecánicamente especies maderables nativas del Petén. Debido a restricciones presupuestarias y logísticas, los autores redujeron en un 90% el número de muestras recomendadas por la norma ASTM D143-94, realizando solo una parte de las pruebas, con un número reducido de probetas por especie y por tipo de ensayo.

En cada una de las pruebas se utilizaron entre dos y seis probetas por especie, lo que limita la posibilidad de generalizar los resultados obtenidos. Por tanto, estos datos deben considerarse como una primera aproximación técnica al comportamiento de las propiedades de dichas maderas. La investigación concluye que es necesario realizar estudios más amplios, con muestras representativas y metodologías rigurosas, que permitan establecer valores de diseño confiables. No obstante, los resultados obtenidos constituyen un aporte valioso como punto de partida para futuras investigaciones en la región de Petén.

La tesis concluye que se necesitan estudios más amplios, con muestras completas y rigurosas, para establecer valores de diseño confiables. No obstante, proporciona datos útiles como punto de partida para investigaciones futuras en la región de Petén (Rivas & Joachin, 2006).

Características anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de roble blanco (*quercus segoviensis* Liebm.) de la finca la montaña, San Agustín Acasaguastlán, el progreso, Guatemala. La tesis *“Características anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de roble blanco (*Quercus segoviensis* Liebm.) de la finca La Montaña, San Agustín Acasaguastlán, El Progreso, Guatemala”* elaborada por (Camey 2024) es un estudio que busca caracterizar el comportamiento físico y mecánico de esta especie nativa guatemalteca.

En el estudio se realizaron 8 tipos de pruebas mecánicas, utilizando 20 probetas para cada una, lo que da un total de 160 probetas. Las pruebas aplicadas fueron: tensión

perpendicular al grano, flexión estática, tensión paralela al grano, clivaje, corte paralelo al grano, compresión paralela al grano, compresión perpendicular al grano, y dureza. Todas las probetas fueron acondicionadas al 12% de contenido de humedad.

Los resultados mostraron que el roble blanco presenta buena resistencia mecánica, especialmente en compresión paralela (3,844.1 kg) y perpendicular (3,902.5 kg). La dureza fue constante en todas las muestras (815.8 kg), lo que indica uniformidad en esta propiedad. Sin embargo, mostró una alta variabilidad en algunos ensayos, como la tensión perpendicular, que alcanzó un coeficiente de variación del 60%.

Es importante destacar que no se realizaron pruebas físicas de contracción ni análisis volumétrico o dimensional, por lo que el estudio se enfoca exclusivamente en el desempeño mecánico básico de la especie (Camey, 2024).

Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. El manual *“Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera”* de Suirezs y Berger (2010) presenta de forma detallada cómo se evalúan distintas propiedades de la madera siguiendo normas IRAM. En cuanto a las pruebas mecánicas, se describen ensayos como flexión estática, compresión paralela a las fibras, corte o cizallamiento, tracción, clivaje, dureza, torsión y resistencia dinámica, todos orientados a clasificar la madera según su resistencia y usos estructurales. Aunque no se indica un número fijo de árboles o probetas, se enfatiza que deben ser múltiples y representativas, considerando la variabilidad natural del material. También se analiza la contracción de la madera, que es la reducción dimensional al perder humedad; para ello, se usan probetas pequeñas cortadas en direcciones radial, tangencial y longitudinal, midiendo el cambio desde el estado saturado hasta el anhidro. Esta propiedad es clave porque influye en la estabilidad dimensional y puede causar defectos como rajaduras o deformaciones si no se controla adecuadamente. En resumen, el documento es una guía técnica muy útil para conocer el comportamiento físico y mecánico de distintas especies de madera antes de definir su uso final.

Estudios de propiedades fisicomecánicas del *E. urophylla* x *E. grandis*

Anatomía y propiedades físicas de la madera de *Eucalyptus E. urophylla* x *E. grandis* en Oxapampa – Pasco. Este estudio realizado en la Universidad Nacional del Centro del Perú analizó tres árboles de 9 años para determinar las características anatómicas y físicas de la madera de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Se evaluaron propiedades como peso específico básico, contracción volumétrica y relación de anisotropía. Para las pruebas físicas se usaron un total de 30 probetas (10 para cada tipo de prueba: peso específico, contracción y anisotropía). El estudio confirmó que la madera tiene una contracción volumétrica media del 12%, lo que indica un comportamiento moderado frente a cambios de humedad. Las contracciones fueron medidas con precisión, aportando datos útiles para aplicaciones industriales y estructurales. (Mendoza, 2015)

Evaluación de las propiedades físicas y químicas de *E. urophylla* x *E. grandis* en Ecuador. En esta investigación de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, se analizaron muestras de madera de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* provenientes de cinco procedencias diferentes, aunque no se especificó el número exacto de árboles muestreados. Para determinar propiedades como: contenido de humedad, densidad en verde, densidad seca al horno y densidad básica, se usaron 50 probetas, distribuidas entre los diferentes ensayos. El estudio no incluyó pruebas de contracción volumétrica ni lineal. Además, se evaluó el pH de la madera para complementar el análisis fisicoquímico, brindando información relevante para su aprovechamiento y tratamiento. (Martínez, 2018)

Influencia de la enfermedad de cancro *Chrysoporthe Deuterocubensis* sobre propiedades físicas y mecánicas de *E. urophylla* x *E. grandis*. Este estudio publicado en *Forests* analizó cómo la enfermedad de cancro afecta la madera de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, comparando muestras sanas y afectadas. Aunque no se especifica el número de árboles muestreados, se utilizaron 40 probetas para las pruebas de flexión estática, evaluando modos de falla como tensión simple, tensión astillada, compresión y tensión frágil. No se realizaron mediciones de contracción. Los resultados muestran que la enfermedad afecta notablemente las propiedades mecánicas,

disminuyendo la resistencia de la madera, lo que es importante para evaluar el uso estructural del material en áreas afectadas (Lima et al., 2021).

Pruebas físicas y mecánicas realizadas

Tabla 1

Pruebas físicas y mecánicas realizadas

Pruebas Físicas		Pruebas Mecánicas	
No.	Nombre de Prueba	No.	Nombre de Prueba
1	Contenido de humedad	1	Flexión estática
2	Densidad	2	Compresión paralela al grano
3	Poder calorífico	3	Compresión perpendicular al grano
		4	Dureza
		5	Corte paralelo al grano
		6	Tensión paralela al grano
		7	Tensión perpendicular al grano

Clasificación de densidad.

Vizcarra (1998) clasifica la madera según la densidad básica

Tabla 2

Clasificación de la madera según densidad básica

Grupo	Rango (g/cm)	Clasificación
I	< 0.30	Muy baja
II	0.31 – 0.40	Baja
III	0.41 – 0.60	Media
IV	0.61 – 0.80	Alta
V	> 0.81	Muy Alta

Nota. Vizcarra (1998) indica que el sistema de clasificación corresponde a la agrupación de las maderas según su densidad básica, esto debido a su importancia y su relación con la resistencia mecánica

Clasificación de las propiedades mecánicas

Tabla 3

Clasificación de las propiedades mecánicas

Prueba	MOE (kg/cm²)	MOR (kg/cm²)	Clasificación
Flexión estática	<70,000	<400	Muy bajo
	71000-100000	401-900	Bajo
	101000-150000	901-1350	Medio
	151000-200000	1351-1800	Alto
	>200000	>1800	Muy Alto
Compresión paralela al grano		MOR (kg/cm²)	
		<300	Muy baja
		301-450	Baja
		451-700	Media
		701-950	Alta
Compresión perpendicular al grano		>950	Muy Alta
		MOR (kg/cm²)	
		<35	Muy baja
		35-75	Baja
		76-120	Media
Dureza		121-175	Alta
		>175	Muy Alta
		kg	
		<200	Muy baja
		201-400	Baja
Corte paralelo al grano		401-800	Media
		801-1200	Alta
		>1200	Muy Alta
		(kg/cm²)	
		50-70	Baja
		70-100	Media
		100-160	Alta

Nota. Silvestre & Torres 2003

Resultados de pruebas de tensión del *E. urophylla* x *E. grandis* en México

Dávalos & Bárcenas (2016) presentan un estudio en el cual realizaron pruebas de tensión paralela al grano y tensión perpendicular a la fibra dando como resultados los presentados en la siguiente tabla

Tabla 4

*Resultados de pruebas de *E. urophylla* x *E. grandis* en México*

Prueba Mecánica	MPa
Tensión paralela a la fibra	95-110
Tensión perpendicular a la fibra	3-5

Nota. Dávalos & Bárcenas (2016)

Valores mínimos de uso para la madera

La Tabla 10 presenta los valores mínimos recomendados de las propiedades fisicomecánicas de la madera para distintos usos, de acuerdo con lo señalado por Meléndez (2011), Vignote y Martínez (2006), Arostegui (1982) y Dávalos y Bárcenas (1999). Estas propiedades incluyen la densidad básica, flexión estática, compresión, dureza y corte. En relación con las propiedades mecánicas, el MOR (Módulo de Ruptura) representa la resistencia máxima que alcanza la madera antes de fracturarse en un ensayo de flexión estática, mientras que el MOE (Módulo de Elasticidad) refleja la rigidez del material, es decir, su capacidad de deformación elástica bajo carga. La RM (resistencia máxima) corresponde al esfuerzo límite que puede soportar la madera en compresión paralela a las fibras, y el ELP (esfuerzo límite proporcional) indica el esfuerzo máximo hasta el cual la deformación es proporcional a la carga aplicada. En conjunto con esto, se consideran otras propiedades relevantes como la dureza, entendida como la resistencia de la superficie a la penetración, y el corte paralelo al grano, que corresponde a la resistencia de la madera al cizallamiento en dirección de la fibra.

Tabla 5*Valores mínimos de uso para la madera*

Uso	Propiedad fisicomecánica	Valor mínimo requerido
Crucetas	Densidad básica	0.55 – 0.80 g/cm ³
	Flexión estática (MOR)	≥ 365 kg/cm ²
	Flexión estática (MOE)	≥ 76 000 kg/cm ²
	Compresión paralela (RM)	≥ 285 kg/cm ²
	Compresión perpendicular (ELP)	≥ 16.8 kg/cm ²
	Corte paralelo al grano	≥ 61 kg/cm ²
Parihuelas (tarimas) carga liviana	Densidad básica	0.35 – 0.50 g/cm ³
	Flexión estática (MOR)	≥ 237 kg/cm ²
	Compresión perpendicular (ELP)	≥ 15 kg/cm ²
	Dureza	≥ 196 kg/cm ²
Parihuelas (tarimas) carga pesada	Densidad básica	0.50 – 0.70 g/cm ³
	Flexión estática (MOR)	≥ 356 kg/cm ²
	Compresión perpendicular (ELP)	≥ 41 kg/cm ²
	Dureza	≥ 306 kg/cm ²
Pisos de madera	Densidad básica	≥ 0.60 g/cm ³
	Dureza	≥ 313 kg/cm ²
Estructuras	Densidad básica	0.40 – 0.80 g/cm ³
	Flexión estática (MOE)	≥ 96 000 kg/cm ²
	Flexión estática (MOR)	≥ 307 kg/cm ²
	Compresión paralela	≥ 307 kg/cm ²
	Compresión perpendicular (ELP)	≥ 47 kg/cm ²
	Corte paralelo al grano	≥ 36 kg/cm ²
Mobiliario escolar	Densidad básica	0.45 – 0.70 g/cm ³
	Flexión estática (MOE)	≥ 70 000 kg/cm ²
	Flexión estática (MOR)	≥ 438 kg/cm ²
	Compresión perpendicular (ELP)	≥ 34 kg/cm ²
	Corte paralelo al grano	≥ 50 kg/cm ²
	Dureza	≥ 283 kg/cm ²

Uso	Propiedad fisicomecánica	Valor mínimo requerido
Ebanistería	Densidad básica	0.40 – 0.60 g/cm ³
	Dureza	≥ 290 kg/cm ²
Carpintería interior	Densidad básica	0.40 – 0.60 g/cm ³
	Flexión estática (MOE)	≥ 96 000 kg/cm ²
	Flexión estática (MOR)	≥ 615 kg/cm ²
	Compresión paralela	≥ 307 kg/cm ²
Carpintería exterior (revestimiento)	Densidad básica	0.40 – 0.60 g/cm ³
	Flexión estática (MOR)	≥ 356 kg/cm ²
	Dureza	≥ 254 kg/cm ²
	Compresión paralela (RM)	≥ 365 kg/cm ²
Encofrados	Densidad básica	0.40 – 0.60 g/cm ³
	Flexión estática (MOR)	≥ 375 kg/cm ²
	Compresión perpendicular (ELP)	≥ 13 kg/cm ²
	Compresión paralela (RM)	≥ 238 kg/cm ²
	Corte paralelo al grano	≥ 46 kg/cm ²
	Dureza	≥ 206 kg/cm ²
Mangos de herramientas	Densidad básica	0.40 – 0.60 g/cm ³
	Flexión estática (MOR)	≥ 501 kg/cm ²
	Flexión estática (MOE)	≥ 77 000 kg/cm ²
	Compresión paralela (RM)	≥ 196 kg/cm ²
	Dureza	≥ 433 kg/cm ²
	Corte paralelo al grano	≥ 45 kg/cm ²

Nota. Estos valores deben considerarse como referencias mínimas. El cumplimiento de estos parámetros permite garantizar la funcionalidad y la durabilidad de los productos elaborados con madera en distintas aplicaciones.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar las diez propiedades fisicomecánicas del duramen del híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e identificar su potencial para el sector maderero

Objetivos específicos

Realizar pruebas físicas y mecánicas a la madera proveniente del duramen del híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*

Identificar el uso potencial de la madera proveniente del duramen del *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* según las propiedades fisicomecánicas obtenidas

METODOLOGÍA

Diseño de investigación

El diseño de investigación adoptado fue experimental descriptivo, ya que se buscó caracterizar las propiedades físico-mecánicas del duramen de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* mediante la aplicación de pruebas normalizadas. El enfoque experimental se justifica por la intervención directa en los árboles, que incluyó la selección, corte y troceo de los ejemplares hasta la obtención de probetas específicas para los ensayos. A partir de estas muestras, se realizaron pruebas físicas y mecánicas conforme a la norma ASTM D143.

El componente descriptivo del diseño se centró en documentar las características morfológicas de los árboles, las propiedades del duramen y los resultados obtenidos en cada prueba, con el propósito de establecer el comportamiento del material y su posible aplicación en el sector maderero. Este enfoque permitió generar una primera aproximación técnica sobre el potencial industrial de la especie en condiciones locales.

Caracterización de los árboles

Se seleccionaron diez árboles de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* que cumplieran con criterios morfológicos específicos: fuste recto, sano, cilíndrico y libre de defectos visibles. Posteriormente, los árboles fueron cortados a una altura de 30 cm desde el nivel del suelo y trozados para la obtención de la madera. Se consideró como diámetro aprovechable aquel igual o superior a 20 cm, lo que permitió delimitar el volumen útil del duramen para la elaboración de probetas destinadas a los ensayos físico-mecánicos.

Ubicación de los árboles

Los árboles seleccionados en la muestra fueron ubicados, marcados y georreferenciados, con el fin de asegurar la trazabilidad del material utilizado en los ensayos. La Escuela cuenta con un área destinada a plantaciones de eucaliptos de diferentes especies, tal como se observa en la Figura 2, dentro de la cual se encontraba la plantación experimental de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, conformada por una superficie de 0.30 hectáreas.

Figura 2

Mapa de ubicación de los árboles de *E. urophylla* x *E. grandis*.



Nota. Mapa de ubicación de los árboles de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Identificación de los árboles

Para el proceso de selección de los árboles destinados a corte, se realizó una identificación y marcación individual de cada ejemplar, asignándoles un número correlativo y registrando sus coordenadas geográficas. Posteriormente, se procedió al levantamiento de información técnica mediante una ficha de campo (ver Tabla 1), en la cual se consignaron las principales características de cada árbol: número de identificación, ubicación, altura total, altura comercialmente aprovechable y diámetros.

Tabla 6

Ficha de Campo de Árbol

**Escuela Nacional Central de Agricultura
Transformación de la Madera
Ficha de Campo de Árbol de *E. urophylla* x *E. grandis***

Identificación

Fecha de selección:

No. De Árbol:

Ubicación

Coordenadas:

Descripción

Altura total:

Altura aprovechable:

Población y muestra

La población objeto de estudio estuvo compuesta por un total de 210 individuos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, con una edad de 21 años. Estos árboles se encuentran establecidos en una parcela de 0.30 hectáreas localizada dentro de las instalaciones de la ENCA.

Muestreo de los árboles

Dado que los árboles se encontraban agrupado en un único sector, se aplicó la técnica de muestreo aleatorio simple. Esta metodología fue adecuada considerando que todos los ejemplares pertenecían a una población finita y homogénea, lo que permitió seleccionar los ejemplares de forma equitativa y sin favorecer a unos sobre otros, asegurando así que los datos obtenidos fueran representativos del conjunto total.

Tamaño de la muestra

De acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D143-94, se determinó que cada ensayo correspondiente a las pruebas fisicomecánicas debía realizarse con un mínimo de diez especímenes. Esta disposición tiene como finalidad asegurar la confiabilidad y la validez de los resultados obtenidos, permitiendo la determinación de las propiedades de la madera de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Tratamiento de los árboles de la muestra

Talado de los árboles

El procedimiento de corte de los árboles de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* se realizó respetando una altura estándar de 30 centímetros desde la base del suelo. Esta medida fue adoptada con el propósito de facilitar las operaciones posteriores de aprovechamiento forestal y minimizar el impacto sobre el sistema radicular, contribuyendo así a una extracción más ordenada y eficiente de los especímenes seleccionados.

Trozado del fuste

Se llevó a cabo el trozado del fuste para la obtención de las probetas destinadas a los ensayos de las propiedades fisicomecánicas de la madera. El troceado se realizó cada 2 metros, debido a que esta longitud constituye la máxima permitida para el transporte de las plantaciones al área de primera transformación.

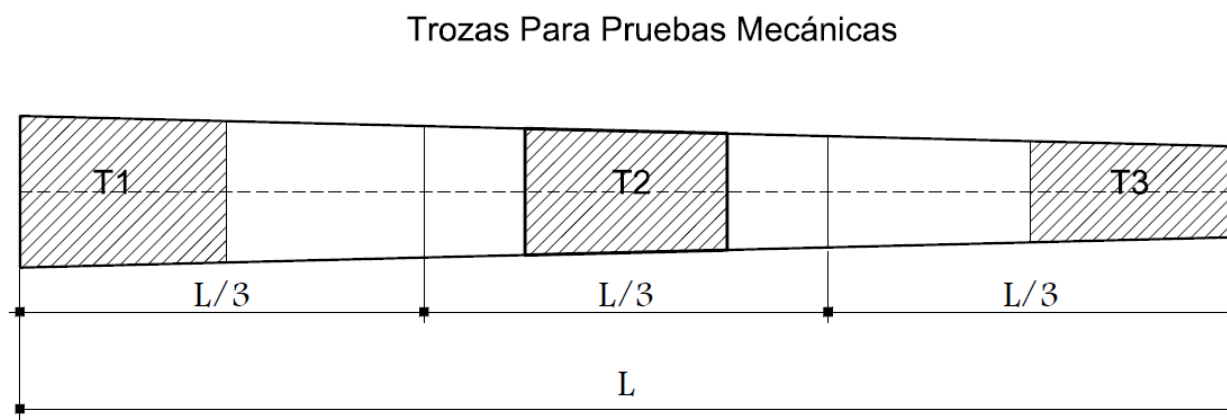
- Se inició cortando el árbol a 30 cm del suelo.
- Posteriormente, se midió la longitud del árbol aprovechable y se dividió en tres partes (ver Figura 3).
- Se procedió a marcar el árbol cada 2 m para obtener las trozas destinadas a las pruebas.

Cada troza fue marcada con el número del árbol y el número de troza para su correcta identificación; posteriormente, los datos fueron registrados en una ficha de campo (ver Tabla 2).

Se siguió el esquema de trozado mostrado en la figura 3.

Figura 3

Esquema de trozado de fuste para pruebas mecánicas



T1, T2, T3: Trozas para probetas de pruebas mecánicas

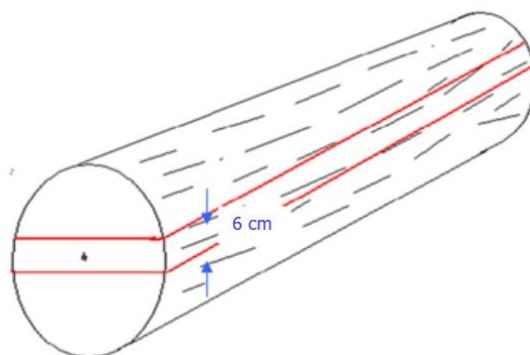
Tabla 7*Ficha de campo de la troza de E. urophylla x E. grandis*

Escuela Nacional Central de Agricultura
Transformación de la Madera
Ficha de la Troza de *E. urophylla* x *E. grandis*

Identificación		
Fecha de tumbado		
No. De Árbol:		
No. De Troza		
Medición		
Diámetro extremo mayor:	d1:	cm
	d2:	cm
Diámetro extremo menor:	d1:	cm
	d2:	cm
Nota. d1: diámetro mayor, d2: diámetro menor		

Aserrado de las trozas***Corte de la pieza central***

La troza seleccionada fue aserrada con el objetivo de obtener una pieza de 6 cm de ancho para las probetas destinadas a las pruebas mecánicas, abarcando de corteza a corteza e incluyendo la médula, tal como se muestra en la figura 4.

Figura 4*Pieza central de la troza*

Nota. (Salvador, Manuel, 2010)

Pruebas físicas

Contenido de humedad

Según la norma ASTM D143-94, una vez obtenidas las probetas para la determinación de humedad, estas fueron pesadas. Las muestras de humedad se apilaron abiertamente en un horno y se secaron a una temperatura de 103 ± 2 °C hasta alcanzar una masa aproximadamente constante, tras lo cual se determinó la masa seca al horno.

Las probetas se pesaron periódicamente cada cuatro horas, según fuera necesario, debido a que cuando las probetas presentaban anomalías tales como grietas, rajaduras, alabeos, torceduras, abarquillado o curvaturas se dejaban a la misma temperatura por un período adicional cuatro horas, por el contrario si no se presentaban anomalías si se dejaban por un período de cuatro horas y se aumentaba la temperatura. La pérdida de masa, expresada como porcentaje de la masa seca al horno determinada, se consideró como el contenido de humedad de la muestra.

El contenido de humedad se calculó mediante la siguiente fórmula, según el Centro de Innovación Tecnológico de la Madera (2009):

$$\%CH = \frac{P_h - P_o}{P_o} \times 100$$

Donde:

$\%CH$: Porcentaje de contenido de humedad de la madera

P_h : Peso de la madera húmeda o inicial

P_o : Peso de la madera anhidra o seca

Los pesos de la madera húmeda y anhidra fueron determinados utilizando una balanza analítica.

Densidad

Densidad en verde. Se determinó realizando la relación de la masa seca de la muestra sobre el volumen de la madera verde aplicando la siguiente formula indicada por Suirezs & Berger (2009)

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{gr}{cm^3}$$

Donde:

m : Masa de la madera verde

V : Volumen de la madera verde

Para la densidad saturada o verde se relacionó la masa de la madera verde con el volumen de la madera verde, es decir los pesos iniciales de las probetas de la madera de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Densidad anhidra. Se obtuvo al dividir el peso de la madera entre el volumen que ocupaba. Suirezs & Berger (2009) indican que como en el laboratorio, el peso y la masa se determinan de la misma forma, por medio de balanzas

se acepta que la masa es igual al peso ($p=m$), obteniendo la fórmula:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{gr}{cm^3}$$

Donde:

m : Masa de la madera seca

V : Volumen de la madera seca

El peso y volumen de la madera se determinaron al 0% de humedad. La masa de la madera se obtuvo pesando cada probeta en una balanza analítica, mientras que el volumen se determinó midiendo la probeta con ayuda de un vernier. Estas mediciones fueron tomadas después de haber obtenido un peso constante a la temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ como lo indican Suirezs & Berger (2009).

En conjunto con esto el procedimiento se realizó siguiendo la norma ASTM D-143, es decir tomando medidas de manera constante hasta alcanzar los 103 ± 2 °C. Cada resultado de densidad obtenido fue tabulado y se calculó un promedio de densidad para cada probeta.

Densidad básica. Se determinó realizando la relación de la masa seca de la muestra sobre el volumen de la madera verde aplicando la siguiente formula indicada por Suirezs & Berger (2009)

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{gr}{cm^3}$$

Donde:

m : Masa de la madera seca

V : Volumen de la madera verde

Esta densidad se obtuvo realizando las mediciones del volumen de la madera verde con ayuda de un vernier, y obteniendo los datos de la masa de la madera seca.

Registro de albura y duramen

Según (Cabrera, 2016), en la madera de un árbol se pueden distinguir dos capas principales, la albura, la cual es una capa delgada de madera más joven y de color claro que se sitúa junto a la corteza; y el duramen, el cual contiene la madera más antigua del árbol y es de un color más oscuro generalmente.

Por lo tanto, se procedió a la identificación de albura y duramen según su color a ojo alzado, debido a que la madera de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* presentaba una diferenciación claramente definida entre ambas características. Esta distinción se basó principalmente en el color, lo que permitió reconocerlas a simple vista.

No obstante, para futuras investigaciones se recomienda realizar pruebas anatómicas para la diferenciación de la albura y duramen de la madera.

Espesor de albura

Se procedió a medir la diferencia entre el diámetro del disco sin corteza y el diámetro del duramen en cada espécimen, promediando las direcciones de medición

(Fernández, 2018). Es importante mencionar que existió un descarte de aserrío en el cual se perdió la corteza y la albura de los árboles.

Espesor de duramen

Se midió el diámetro del duramen en cada troza seleccionada y se promediaron las mediciones.

Poder calorífico

Esta propiedad se determinó llevando la muestra de aserrín de madera de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* al laboratorio técnico del Ministerio de Energía y Minas, con el fin de obtener los resultados de las muestras. En el laboratorio se aplicó la norma ASTM D-240 para la determinación del poder calorífico superior (MJ/kg).

Pruebas mecánicas

Las pruebas realizadas se muestran en la Tabla 3. Para la elaboración de las pruebas mecánicas se utilizó una máquina universal de marca Instron 3369, la cual se encuentra ubicada en el laboratorio de tecnología de la madera de la ENCA, cada prueba se realizó aplicando la normativa ASTM D 143-94, la cual proporciona los parámetros como las dimensiones de las probetas, las velocidades de las pruebas, y cómo se deben de colocar las probetas.

Tabla 8

Pruebas mecánicas realizadas

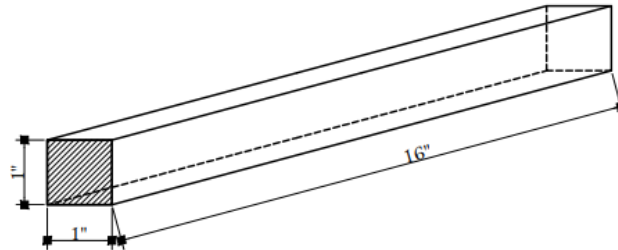
No.	Prueba
1	Flexión estática
2	Compresión paralela al grano
3	Compresión perpendicular al grano
4	Dureza
5	Corte paralelo al grano
6	Tensión paralela al grano
7	Tensión perpendicular al grano

Flexión estática

- Probeta: 1 x 1 x 16 pulgadas

Figura 5

Probeta de flexión estática



Procedimiento. Se prepararon las probetas mediante la medición de sus dimensiones. Durante la realización de las pruebas se siguieron los siguientes procedimientos:

Se colocó la muestra sobre rodillos y cuchillas de apoyo con placas y rodillos, asegurando que la distancia desde el apoyo hasta el plano central no excediera la profundidad de la muestra

Se alinearon los bordes de la cuchilla lateralmente para ajustar posibles giros

La carga se aplicó sobre la superficie tangencial más cercana a la médula

Se colocó el bloque de carga correspondiente

Se aplicó una velocidad de 1,3 mm/min

Se esperó hasta la finalización de la prueba

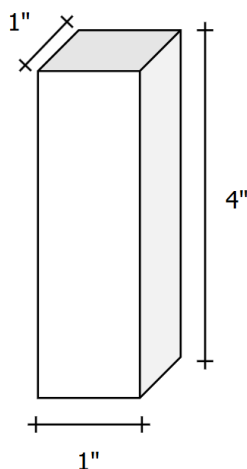
Se anotó la carga máxima soportada por la probeta

Compresión paralela al grano

Probeta: 1 x 1 x 4 pulgadas

Figura 6

Probeta de compresión paralela al grano



Procedimiento. Se midieron las dimensiones reales de la sección transversal y la longitud de cada probeta. Durante la ejecución de la prueba se siguieron los siguientes pasos:

Se colocaron los accesorios a la máquina universal, los cuales fueron una placa con cojinete esférico, para garantizar una distribución uniforme de la carga.

La carga se aplicó de manera continua durante la prueba, a una velocidad de movimiento de la cruceta de 0,003 mm/min.

Se inició el ensayo en la máquina y se esperó hasta su finalización.

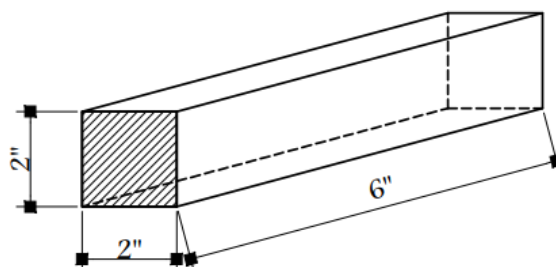
Se registraron los resultados correspondientes a la carga máxima soportada por cada probeta.

Compresión perpendicular al grano

Probeta: 2 x 2 x 6 pulgadas

Figura 7

Probeta de compresión perpendicular al grano



Procedimiento. Se midieron la altura, el ancho y la longitud reales de cada probeta. Durante la realización de la prueba se siguieron los siguientes procedimientos:

Se colocó una placa de soporte metálica de 2 pulgadas (50 mm) de ancho a lo largo de la superficie superior del espécimen

La placa se posicionó a distancias iguales de los extremos y en ángulo recto con la longitud de la probeta

La carga se aplicó sobre una superficie radial de la muestra

La carga se aplicó de forma continua durante toda la prueba, a una velocidad de movimiento de la cruceta de 0,305 mm/min

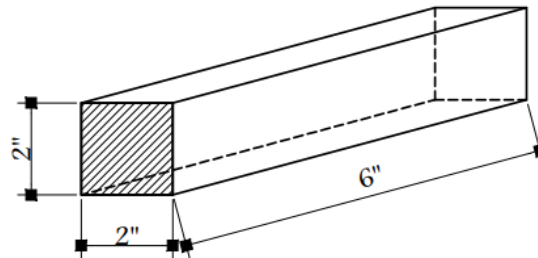
Se registraron los resultados obtenidos

Dureza

Probeta: 2 x 2 x 6 pulgadas

Figura 8

Probeta de dureza



Procedimiento. Se midieron las dimensiones reales de la sección transversal y la longitud de cada probeta. Durante la ejecución de la prueba se siguieron los siguientes procedimientos:

Se realizaron dos penetraciones en una superficie tangencial, dos en una superficie radial y una en cada extremo de la muestra.

Se seleccionaron las superficies radiales y tangenciales con el fin de obtener un promedio representativo de la pieza.

Se aseguró que las penetraciones se encontraran alejadas de los bordes para evitar astillamiento o rotura.

La carga se aplicó de manera continua durante toda la prueba.

La velocidad de movimiento de la cruceta fue de 6 mm/min.

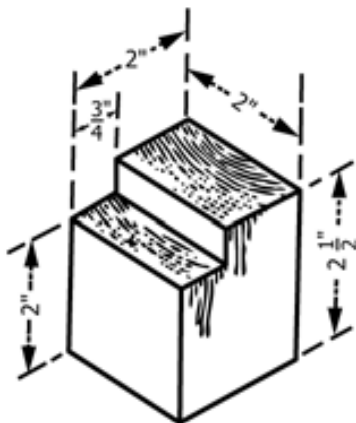
Se registró la carga cuando la bola penetró hasta la mitad de su diámetro

Corte paralelo al grano

Probeta: 2 x 2 x 2 ½ pulgadas

Figura 9

Probeta de corte paralelo al grano



Nota. ASTM D143-94

Procedimiento. Se midieron las dimensiones reales de la superficie de corte de cada probeta. Durante la realización de la prueba se siguieron los siguientes procedimientos:

Se aseguró que la barra transversal estuviera ajustada, de manera que los bordes del espécimen quedaran verticales y el extremo descansara uniformemente sobre el área de contacto.

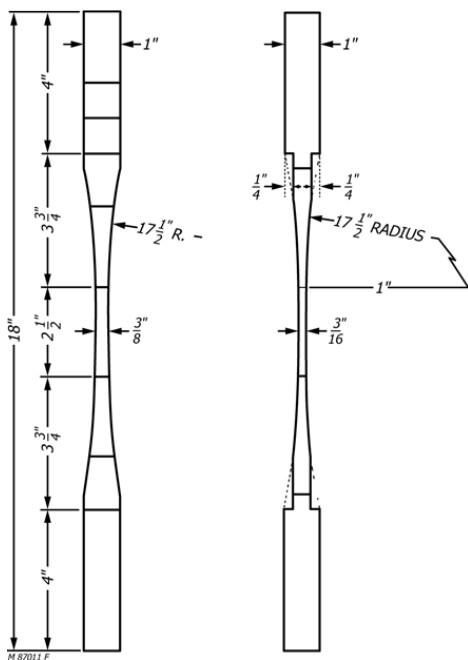
La carga se aplicó de forma continua durante toda la prueba, a una velocidad de cruceta de 0,6 mm/min.

Se esperó a la finalización del ensayo y se registró el resultado obtenido.

Tensión paralela al grano

Figura 10

Probeta de tensión paralela al grano



Nota. ASTM D143-94

Procedimiento. Se midieron las dimensiones reales de la superficie de corte de cada probeta. Durante la realización de la prueba se siguieron los siguientes procedimientos:

Se aseguró que la barra transversal estuviera ajustada, de manera que los bordes del espécimen quedaran verticales y el extremo descansara uniformemente sobre el área de contacto.

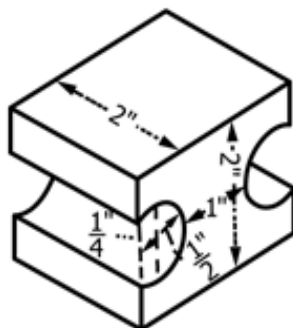
La carga se aplicó de forma continua durante toda la prueba, a una velocidad de cruceta de 0,6 mm/min.

Se esperó a la finalización del ensayo y se registró el resultado obtenido.

Tensión perpendicular al grano

Figura 11

Probeta de tensión perpendicular al grano



Nota. ASTM D143-94

Procedimiento. Se prepararon las probetas conforme al tamaño y forma mostrados en la Figura 11.

Durante la realización de la prueba, los especímenes se sujetaron en mordazas

La carga se aplicó de forma continua durante toda la prueba, a una velocidad de movimiento de la cruceta móvil de 2,5 mm/min.

Al finalizar la prueba, se anotó la carga máxima aplicada.

Identificación del uso potencial de la madera de E. urophylla x E. grandis

Los datos obtenidos durante la ejecución de los ensayos mecánicos realizados al duramen del híbrido *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*, mediante la máquina universal de ensayos Instron 3369, fueron organizados según el tipo de prueba efectuada. Posteriormente, la información fue sistematizada y procesada en Microsoft Excel, lo que permitió el cálculo de las propiedades fisicomecánicas correspondientes y su posterior análisis comparativo.

A partir de los datos recopilados en Microsoft Excel, se calculó el parámetro mecánico llamado el módulo de ruptura (MOR) determinado conforme a la fórmula establecida en la norma ASTM D1037, la cual es la siguiente:

$$MOR = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde:

P: Carga máxima aplicada antes de la fractura

L: Distancia entre los soportes

b: Ancho de la probeta

d: Altura de la probeta

Los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos fueron obtenidos conforme a los lineamientos establecidos en la norma ASTM D143-94, determinándose los valores correspondientes para cada probeta ensayada en cada prueba.

Con los parámetros físicos y mecánicos calculados, se procedió a la identificación del uso potencial de la madera mediante un análisis técnico comparativo. Para ello, los valores individuales obtenidos para cada propiedad fisicomecánica fueron comparados con los criterios de referencia establecidos en la tabla 2, correspondiente a la clasificación de la madera según su densidad básica, así como con los valores mínimos requeridos para los distintos usos de la madera presentados en la tabla 3.

Adicionalmente, para la identificación del uso potencial de la madera se utilizó la tabla 5, la cual presenta los valores mínimos de referencia para aplicaciones específicas y fue utilizada como herramienta para la clasificación funcional de la madera.

La comparación de los resultados con los criterios establecidos en las tablas 2, 3 y 5 permitió identificar de manera integral el comportamiento del duramen del híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* frente a los requerimientos técnicos exigidos para usos tales como crucetas, parihuelas de carga liviana y pesada, pisos de madera, estructuras, mobiliario escolar, ebanistería, carpintería interior y exterior, encofrados y mandos de herramientas.

Se consideró que el uso de la madera del híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* era viable si los resultados de las propiedades fisicomecánicas cumplieran o bien superaran los valores mínimos establecidos para las propiedades críticas asociadas con dicho uso. En los casos que una o más propiedades no alcanzaron los valores de referencia, no se recomendó la madera para utilizarla en ese producto.

Los resultados fueron organizados en una tabla, clasificando el cumplimiento de cada propiedad respecto a los criterios establecidos en las tablas 2, 3 y 5, lo que permitió identificar la resistencia y la aptitud de uso del duramen del *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, en concordancia con el objetivo de identificar su uso potencial en el sector maderero.

Esta información se presenta en la tabla 30, denominada “clasificación del uso de la madera”, en la cual se establecen los posibles usos de la madera por propiedad mecánica y por sección del fuste. A partir de esta clasificación, se identificaron los usos que se repitieron y cumplieron de forma consistente con los parámetros establecidos para cada propiedad y troza evaluada.

Como resultado de este análisis, se definió el uso potencial de la madera por troza, el cual se presenta en la tabla 31, denominada “resultado del uso potencial de la madera”, constituyendo la base técnica para la discusión de resultados y la formulación de conclusiones relacionadas con su potencial de industrialización.

RESULTADOS

Antes de presentar los resultados, se recuerda que *Eucalyptus urograndis* es el nombre taxonómico reconocido por la Organización Europea y Mediterránea para la Protección de las Plantas (EPPO, 2016) para el híbrido proveniente del cruce entre *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Pruebas físicas

En concordancia con el objetivo específico orientado a la determinación de las propiedades físicas del duramen del híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, se evaluaron la densidad básica, el contenido de humedad y el poder calorífico, considerando la variación longitudinal del fuste en troza base, media y punta.

Contenido de humedad

El contenido de humedad se determinó utilizando 126 probetas de madera obtenidas de diez árboles de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Las muestras fueron pesadas en una balanza analítica y posteriormente sometidas a un proceso de secado en el horno del laboratorio de Tecnología de la Madera de la ENCA.

Se determinó un contenido de humedad inicial de 110.6% en las probetas, lo que evidencia que la madera se encontraba en condición de saturación de fibras y con el lumen de las células lleno de agua al inicio del proceso de secado. El procedimiento se llevó a cabo conforme a lo establecido en la norma ASTM D143-94, empleando un horno de secado con temperaturas controladas en un rango de 103 ± 2 °C, y las muestras fueron retiradas únicamente cuando alcanzaron un peso constante, garantizando así la condición de peso anhidro.

Densidad

Densidad verde. El valor promedio obtenido para la densidad en condición verde fue de 0.96 g/cm³, calculada considerando la masa de las 126 probetas y el volumen verde

Densidad anhidra. La densidad básica de la madera de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* se determinó a partir de 126 muestras en estado anhidro obteniéndose un valor promedio de 0.69 g/cm³.

Densidad básica. La densidad básica, se calculó realizando la relación entre la masa anhidra y el volumen verde de las 126 probetas, presentando un valor promedio de 0.46 g/cm³.

Poder calorífico

La muestra de aserrín obtenida de los diez árboles de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* fue analizada en el Laboratorio de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas. Los resultados determinaron un poder calorífico de 16.46 MJ/kg, equivalente a 3930 kcal/kg, mediante la aplicación de la norma ASTM D-240.

Pruebas mecánicas

Se realizaron las pruebas mecánicas del duramen del *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* en troza base, media y punta. Se realizaron pruebas de flexión estática, compresión paralela y perpendicular al grano, dureza, corte y tensión paralela y perpendicular al grano, empleando 30 probetas por cada prueba, para un total de 210 probetas

Flexión estática

Las pruebas mecánicas se efectuaron utilizando 30 probetas para cada ensayo, lo que representó un total de 210 probetas evaluadas. Los resultados de la prueba de flexión estática se pueden visualizar en las siguientes tablas.

Tabla 9

Resultados de prueba de flexión estática en las trozas base

Troza Base (hasta 7 m de altura)					
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	Módulo de Young (kg/cm²)	MOR (kg/cm²)	Clasificación MOE	Clasificación MOR
1-2	332.6	130,688.1	1,149.3	Medio	Medio
2-2	377.6	146,831.7	1,304.8	Medio	Medio
3-2	506.6	1,205,145.8	1,750.6	Muy alto	Alto
4-2	434.8	162,494.0	1,502.6	Alto	Alto
5-2	363.5	123,764.7	1,256.3	Medio	Medio
6-2	489.2	163,186.5	1,690.8	Alto	Alto
7-2	338.8	128,347.0	1,171.0	Medio	Medio
8-2	176.7	78,589.1	610.6	Bajo	Bajo
9-2	325.9	128,293.4	1,126.2	Medio	Medio
10-2	214.0	80,668.8	739.6	Bajo	Bajo

Tabla 10

Resultados de prueba de flexión estática en las trozas del medio

Troza Medio (5.33m hasta 14.66m de altura)					
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	Módulo de Young (kg/cm²)	MOR (kg/cm²)	Clasificación MOE	Clasificación MOR
1-6	329.0	121,572.6	1,137.0	Medio	Medio
2-6	350.7	117,445.9	1,212.0	Medio	Medio
3-6	437.6	189,969.0	1,512.5	Alto	Alto
4-6	324.7	128,889.5	1,122.3	Medio	Medio
5-6	347.0	140,508.6	1,199.1	Medio	Medio
6-5	371.5	142,554.5	1,283.9	Medio	Medio
7-6	271.5	100,729.7	938.3	Muy bajo	Medio
8-6	171.3	92,571.0	592.0	Bajo	Bajo
9-6	217.4	9,275.0	751.4	Muy bajo	Bajo
10-5	203.7	87,402.0	703.8	Bajo	Bajo

Tabla 11*Resultados de prueba de flexión estática en las trozas punta*

Troza Punta (14.66m hasta 22m de altura)					
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	Módulo de Young (kg/cm²)	MOR (kg/cm²)	Clasificación MOE	Clasificación MOR
1-10	299.6	113,151.3	1,035.2	Medio	Medio
2-10	329.6	127,171.3	1,139.0	Medio	Medio
3-11	359.0	124,916.4	1,240.7	Medio	Medio
4-10	246.2	1,195,663.9	850.9	Muy alto	Bajo
5-11	279.0	116,079.7	964.4	Medio	Medio
6-8	366.3	128,892.3	1,265.9	Medio	Medio
7-10	136.1	49,524.5	470.5	Muy bajo	Bajo
8-10	163.7	79,403.0	565.7	Bajo	Bajo
9-10	140.5	56,264.9	485.4	Muy bajo	Bajo
10-8	144.5	62,728.0	499.5	Muy bajo	Bajo

Compresión paralela al grano

La prueba de compresión paralela al grano se realizó sobre un total de 30 probetas obtenidas del fuste de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Tabla 12*Resultados de prueba de compresión paralela en las trozas base*

Troza Base (hasta 7 m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza Base (kg)	MOR (kg/cm²)	Clasificación MOR
1-2	4514.5	699.7	Media
2-2	4355.7	675.1	Media
3-2	5353.3	829.8	Alta
4-2	4711.5	730.3	Alta
5-2	4446.2	689.2	Media
6-2	5008.0	776.2	Alta
7-2	4284.9	664.2	Media
8-2	2557.3	396.4	Baja
9-2	4462.6	691.7	Media
10-2	3292.0	510.3	Media

Tabla 13*Resultados de prueba de compresión paralela en las trozas del medio*

Troza Medio (5.33m hasta 14.66m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza Base (kg)	MOR (kg/cm²)	Clasificación MOR
1-6	4353.1	674.7	Media
2-6	3726.1	577.5	Media
3-6	5278.7	818.2	Alta
4-6	4606.9	714.1	Alta
5-6	4384.1	679.5	Media
6-5	4360.9	675.9	Media
7-6	3609.4	559.5	Media
8-6	2547.8	394.9	Baja
9-6	3865.3	599.1	Media
10-5	2249.6	348.7	Baja

Tabla 14*Resultados de prueba de compresión paralela en las trozas punta*

Troza Punta (14.66m hasta 22m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza Base (kg)	MOR (kg/cm²)	Clasificación MOR
1-10	3680.1	570.4	Media
2-10	3366.7	521.8	Media
3-11	3762.4	583.2	Media
4-10	4109.5	637.0	Media
5-11	4244.1	657.8	Media
6-8	3845.9	596.1	Media
7-10	2302.2	356.8	Baja
8-10	2245.1	348.0	Baja
9-10	2457.4	380.9	Baja
10-8	1991.0	308.6	Baja

Compresión perpendicular al grano

Las pruebas de compresión perpendicular al grano se efectuaron utilizando 30 probetas de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, evaluando las secciones de base, medio y copa del fuste.

Tabla 15

Resultados de prueba de compresión perpendicular en las trozas base

Troza Base (hasta 7 m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	MOR (kg/cm²)	Clasificación MOR
1-2	1,772.8	23.3	Muy baja
2-2	2,039.8	26.8	Muy baja
3-2	2,717.0	35.8	Baja
4-2	1,820.9	24.0	Muy baja
5-2	1,814.3	23.9	Muy baja
6-2	3,585.2	47.2	Baja
7-2	3,244.2	42.7	Baja
8-2	1,625.1	21.4	Muy baja
9-2	2,267.9	29.8	Muy baja
10-2	1,497.9	19.7	Muy baja

Tabla 16

Resultados de prueba de compresión perpendicular en las trozas del medio

Troza Medio (5.33m hasta 14.66m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	MOR (kg/cm²)	Clasificación MOR
1-6	1,417.1	18.7	Muy baja
2-6	1,533.3	20.2	Muy baja
3-6	2,577.5	33.9	Muy baja
4-6	1,734.0	22.8	Muy baja
5-6	1,663.8	22.1	Muy baja
6-5	3,004.1	39.5	Baja
7-6	1,651.4	21.7	Muy baja
8-6	1,550.2	20.6	Muy baja
9-6	1,724.3	22.4	Muy baja
10-5	1,386.4	18.2	Muy baja

Tabla 17*Resultados de prueba de compresión perpendicular en las trozas punta*

Troza Punta (14.66m hasta 22m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	MOR (kg/cm²)	Clasificación MOR
1-10	799.0	10.5	Muy baja
2-10	1,209.4	15.9	Muy baja
3-11	1,771.7	23.3	Muy baja
4-10	981.1	12.9	Muy baja
5-11	775.6	10.2	Muy baja
6-8	2,540.6	33.4	Muy baja
7-10	1,027.8	13.5	Muy baja
8-10	1,087.1	14.3	Muy baja
9-10	1,176.4	15.5	Muy baja
10-8	1,235.3	16.3	Muy baja

Dureza

La prueba de dureza se efectuó sobre 30 probetas de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, evaluando las tres secciones del fuste como lo es la base, medio y copa, considerando las direcciones tangencial, radial y transversal como se muestra en la siguiente tabla

Tabla 18*Resultados de prueba de dureza en las trozas base*

Troza Base (hasta 7 m de altura)		
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	Clasificación
1-2	497.1	Media
2-2	624.1	Media
3-2	759.7	Media
4-2	447.8	Media
5-2	496.8	Media
6-2	723.0	Media
7-2	512.7	Media
8-2	389.7	Baja
9-2	551.5	Media
10-2	422.3	Media

Tabla 19*Resultados de prueba de dureza en las trozas del medio*

Troza Medio (5.33m hasta 14.66m de altura)		
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	Clasificación
1-6	496.0	Media
2-6	477.3	Media
3-6	664.4	Media
4-6	470.4	Media
5-6	422.7	Media
6-5	678.7	Media
7-6	457.1	Media
8-6	388.8	Baja
9-6	387.3	Baja
10-5	495.1	Media

Tabla 20*Resultados de prueba de dureza en las trozas punta*

Troza Punta (14.66m hasta 22m de altura)		
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	Clasificación
1-10	429.8	Media
2-10	412.1	Media
3-11	550.2	Media
4-10	335.5	Baja
5-11	339.5	Baja
6-8	667.0	Media
7-10	397.7	Baja
8-10	324.3	Baja
9-10	324.3	Baja
10-8	290.0	Baja

Corte paralelo al grano

En la prueba de corte paralelo al grano del *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* se observó que la resistencia disminuye gradualmente de la base hacia la copa del fuste.

Tabla 21

Resultados de prueba de corte paralelo al grano en las trozas base

Troza Base (hasta 7 m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	MOR (kg/cm²)	Clasificación MOR
1-2	3,331.6	133.3	Alta
2-2	2,804.1	112.2	Alta
3-2	3,106.8	124.3	Alta
4-2	2,931.8	117.3	Alta
5-2	3,084.3	123.4	Alta
6-2	3,463.4	138.5	Alta
7-2	3,183.4	127.3	Alta
8-2	2,726.5	109.1	Alta
9-2	2,775.4	111.0	Alta
10-2	3,072.6	122.9	Alta

Tabla 22

Resultados de prueba de corte paralelo al grano en las trozas del medio

Troza Medio (5.33m hasta 14.66m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	MOR (kg/cm²)	Clasificación MOR
1-6	2,825.4	113.0	Alta
2-6	2,752.0	110.1	Alta
3-6	2,975.2	119.0	Alta
4-6	1,838.1	73.5	Media
5-6	2,750.7	110.0	Alta
6-5	3,245.8	129.8	Alta
7-6	2,774.5	111.0	Alta
8-6	2,475.0	99.0	Media
9-6	2,534.9	101.4	Alta
10-5	2,183.5	87.3	Media

Tabla 23*Resultados de prueba de corte paralelo al grano en las trozas punta*

Troza Punta (14.66m hasta 22m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	MOR (kg/cm²)	Clasificación MOR
1-10	2,669.9	106.8	Alta
2-10	2,489.1	99.6	Media
3-11	1,527.8	61.1	Baja
4-10	1,626.7	65.1	Baja
5-11	2,156.0	86.2	Media
6-8	2,762.5	110.5	Alta
7-10	2,188.3	87.5	Media
8-10	2,146.4	85.9	Media
9-10	2,120.6	84.8	Media
10-8	2,015.9	80.6	Media

Tensión paralela al grano

En la prueba de tensión paralela al grano se evidenció que la resistencia disminuye de la base hacia la copa del fuste.

Tabla 24*Resultados de prueba de tensión paralela en las trozas base*

Troza Base (hasta 7 m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	MOR (kg/cm²)	MOR (MPa)
1-2	1,013.2	157.1	15.4
2-2	883.4	136.9	13.4
3-2	763.0	118.3	11.6
4-2	726.1	112.5	11.0
5-2	711.9	110.3	10.8
6-2	1,166.0	180.7	17.7
7-2	839.2	130.0	12.8
8-2	867.5	134.5	13.2
9-2	917.3	142.2	13.9
10-2	794.9	123.2	12.1

Tabla 25*Resultados de prueba de tensión paralela en las trozas del medio*

Troza Medio (5.33m hasta 14.66m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	MOR (kg/cm²)	MOR (MPa)
1-6	748.3	116	11.4
2-6	509.8	79	7.7
3-6	730.2	113.2	11.1
4-6	450.6	69.9	6.9
5-6	699.0	108.3	10.6
6-5	1,513.4	234.6	23
7-6	641.0	99.4	9.7
8-6	674.9	104.6	10.3
9-6	881.7	136.6	13.4
10-5	674.0	104.5	10.2

Tabla 26*Resultados de prueba de tensión paralela en las trozas punta*

Troza Punta (14.66m hasta 22m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	MOR (kg/cm²)	MOR (MPa)
1-10	422.9	65.6	6.4
2-10	298.9	46.3	4.5
3-11	553.7	85.8	8.4
4-10	435.2	67.5	6.6
5-11	510.0	79.1	7.8
6-8	980.5	152.0	14.9
7-10	596.0	92.4	9.1
8-10	569.0	88.2	8.7
9-10	173.2	26.8	2.6
10-8	563.7	87.4	8.6

Tensión perpendicular al grano

En la prueba de tensión perpendicular al grano, los resultados presentados en la tabla 10 muestran una clara disminución de la resistencia desde la base hacia la troza punta.

Tabla 27

Resultados de prueba de tensión perpendicular en las trozas base

Troza Base (hasta 7 m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	MOR (kg/cm²)	MOR (MPa)
1-2	826.6	25.6	2.5
2-2	1,088.7	33.8	3.3
3-2	1,186.3	36.8	3.6
4-2	667.4	20.7	2.0
5-2	728.5	22.6	2.2
6-2	870.6	27.0	2.6
7-2	846.3	26.2	2.6
8-2	656.0	20.3	2.0
9-2	461.8	14.3	1.4
10-2	508.6	15.8	1.5

Tabla 28

Resultados de prueba de tensión perpendicular en las trozas del medio

Troza Medio (5.33m hasta 14.66m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	MOR (kg/cm²)	MOR (MPa)
1-6	734.7	22.8	2.2
2-6	737.0	22.8	2.2
3-6	697.6	21.6	2.1
4-6	375.1	11.6	1.1
5-6	726.6	22.5	2.2
6-5	785.1	24.3	2.4
7-6	638.0	19.8	1.9
8-6	496.9	15.4	1.5
9-6	438.8	13.6	1.3
10-5	373.8	11.6	1.1

Tabla 29*Resultados de prueba de tensión perpendicular en las trozas punta*

Troza Punta (14.66m hasta 22m de altura)			
Probeta	Máximo Fuerza (kg)	MOR (kg/cm²)	MOR (MPa)
1-10	423.0	13.1	1.3
2-10	295.9	9.2	0.9
3-11	542.2	16.8	1.6
4-10	300.2	9.3	0.9
5-11	628.9	19.5	1.9
6-8	341.6	10.6	1.0
7-10	538.2	16.7	1.6
8-10	465.5	14.4	1.4
9-10	390.9	12.1	1.2
10-8	314.3	9.7	1.0

Clasificación del uso de la madera de *E. urophylla* x *E. grandis*

Tabla 30

Clasificación del uso de la madera

Propiedad	Troza Base (hasta 7 m de altura)	Troza Media (7m–14 m de altura)	Troza Punta (14m–22 m de altura)
Flexión estática	Estructuras, crucetas, tarimas pesadas, pisos de madera	Mobiliario escolar, carpintería interior, encofrados	Carpintería ligera, ebanistería, embalajes
Compresión paralela al grano	Estructuras, mangos de herramientas, crucetas	Mobiliario, carpintería interior	Carpintería ligera, usos no estructurales
Compresión perpendicular al grano	Tarimas pesadas, pisos	Tarimas livianas, mobiliario	Ebanistería y carpintería decorativa
Dureza	Pisos de madera, mangos de herramientas, mobiliario pesado	Mobiliario escolar, carpintería interior, encofrados	Ebanistería, molduras, embalajes
Corte paralelo al grano	Estructuras, mangos de herramientas, encofrados	Mobiliario, tarimas livianas	Usos secundarios y decorativos
Tensión paralela al grano	Estructuras, crucetas, herramientas	Carpintería y mobiliario	Revestimientos, ebanistería
Tensión perpendicular al grano	Tarimas y piezas estructurales ligeras	Mobiliario y carpintería interior	Paneles decorativos, molduras

Resultado del uso potencial de la madera

Tabla 31

Resultado del uso potencial de la madera

Troza	Producto recomendado
Troza base (hasta 7 m de altura)	Estructuras, crucetas, tarimas para cargas pesadas, pisos, herramientas
Troza media (7 m - 14 m de altura)	Mobiliario escolar, productos de carpintería como mesas, repisas, contrachapados, patas de mesa, vigas para mobiliario, encofrados como vigas y/o postes de soporte, y tablas.
Troza punta (14 m - 22 m de altura)	Ebanistería como estantes, repisas y piezas decorativas, marcos y estructuras delgadas de muebles, carpintería ligera como molduras, muebles pequeños o decorativos y embalajes

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Cada una de las pruebas mecánicas se realizó utilizando 30 probetas, conforme a los lineamientos establecidos por la norma ASTM D143-94, lo que permitió garantizar la confiabilidad y representatividad de los resultados obtenidos.

El análisis de las propiedades físicas de la madera de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* reveló un contenido de humedad inicial de 110.6 %, indicando que las probetas se encontraban en estado de saturación de fibras, con el lumen celular completamente lleno de agua al inicio del proceso de secado. Este comportamiento es característico de maderas recién cortadas y coincide con lo reportado por Vignote y Martínez (2006), quienes señalan que las especies del género *Eucalyptus* presentan altos niveles de humedad antes del secado, lo cual puede influir en sus propiedades mecánicas y estabilidad dimensional. El secado se realizó siguiendo la norma ASTM D143-94, asegurando la obtención del peso anhidro mediante control de temperatura y extracción de las muestras únicamente al alcanzar peso constante a 103 ± 2 °C.

El poder calorífico de la madera, determinado en el Laboratorio de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas, fue de 16.46 MJ/kg (3930 kcal/kg), lo que indica un potencial energético adecuado para su aprovechamiento como biomasa. Este valor es comparable al reportado por Dávalos y Bárcenas (2016) para maderas de densidad media del género *Eucalyptus*, lo que refuerza la viabilidad de utilizar residuos de transformación, como astillas y aserrín, en procesos de generación de energía térmica.

En cuanto a la densidad básica, se obtuvo un valor promedio de 0.46 g/cm³, lo que clasifica la madera dentro del grupo de densidad media según Vizcarra (1998). Esta categoría sugiere un equilibrio adecuado entre peso y resistencia, lo que la hace apta para aplicaciones como mobiliario escolar, ebanistería y carpintería interior. Estos resultados son coherentes con los hallazgos de Mendoza (2015) y Martínez (2018), quienes reportaron densidades similares para esta especie en estudios realizados en Perú y Ecuador, respectivamente.

En las pruebas de flexión estática, los valores de MOR y MOE se ubicaron dentro del rango de resistencia media, según la clasificación propuesta por Silvestre y Torres

(2003). No obstante, se observaron valores particularmente bajos en las trozas correspondientes a las bases 8-2 y 10-2. Este comportamiento puede atribuirse al raleo realizado en el año 2008, que afectó la competencia entre árboles y, por ende, el desarrollo uniforme del material leñoso. Según Alvarado (2007), las prácticas de manejo forestal como el raleo influyen significativamente en las propiedades físicas y mecánicas de la madera, especialmente cuando se aplican en etapas intermedias del crecimiento.

Lo anterior se confirma mediante una entrevista de campo no estructurada realizada al encargado de las plantaciones de la ENCA, quien indicó que en 2008 se efectuaron raleos en el área. Aunque los árboles seleccionados para el corte presentaban características dasométricas similares, fue evidente que existieron diferencias tecnológicas significativas en la madera obtenida, lo que explica los valores reducidos observados en las trozas de base 8-2 y 10-2.

Los resultados obtenidos en compresión paralela al grano mostraron un comportamiento similar al observado en la flexión estática, predominando valores de resistencia media. Nuevamente, las trozas de las bases 8-2 y 10-2 reflejaron valores reducidos. De acuerdo con Silvestre y Torres (2003), esta propiedad está estrechamente relacionada con la densidad de la madera, lo cual concuerda con el valor de 0.46 g/cm^3 obtenido en este estudio. Comparando con los parámetros establecidos por Meléndez (2011), Vignote y Martínez (2006) y Arostegui (1982), los valores se ubican dentro del rango requerido para aplicaciones estructurales livianas y mobiliario escolar, lo que indica un desempeño confiable bajo condiciones de carga axial moderada.

En las pruebas de compresión perpendicular al grano, los valores obtenidos se clasificaron como de resistencia baja a media, según la escala de Silvestre y Torres (2003). Este resultado es típico en maderas de densidad media y está relacionado con la estructura anatómica de las fibras del *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Según Mendoza Solano (2015), este comportamiento refleja la disposición radial de los vasos y fibras en maderas de rápido crecimiento, lo que influye directamente en la resistencia a cargas perpendiculares.

Respecto a la dureza, los valores promedio clasifican la madera como de dureza media, lo cual la hace adecuada para aplicaciones en pisos y mobiliario que no están

expuestos a impactos severos. Este nivel de dureza se encuentra dentro de los parámetros mínimos establecidos por Meléndez (2011) para ebanistería y carpintería interior. Además, los resultados coinciden con los obtenidos por Camey (2024) en estudios de maderas nativas guatemaltecas, donde especies de densidad media presentaron durezas comprendidas entre 400 y 800 kg.

En el caso del corte paralelo al grano, los valores promedio se ubicaron en la clasificación media, lo que indica una resistencia adecuada al esfuerzo de cizallamiento. Según Silvestre y Torres (2003), esta propiedad es crítica para el uso de la madera en estructuras y mangos de herramientas, confirmando el potencial del *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* para aplicaciones donde se requiere estabilidad frente a esfuerzos tangenciales.

Finalmente, los resultados de tensión paralela y perpendicular al grano se compararon con los valores reportados por Dávalos y Bárcenas (2016), quienes obtuvieron rangos de 95–110 MPa y 3–5 MPa, respectivamente. En este estudio, los valores registrados se mantuvieron dentro de rangos similares, lo que demuestra un comportamiento mecánico comparable al observado en estudios internacionales. Esto respalda la idea de que las plantaciones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* en Guatemala presentan un desarrollo y calidad de madera equivalentes a los de regiones con condiciones tropicales similares.

En conjunto, los resultados fisicomecánicos del duramen de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* cultivado en la ENCA evidencian un comportamiento de resistencia media, con un balance adecuado entre densidad, rigidez y dureza, de acuerdo con los criterios de clasificación y valores mínimos de uso establecidos en las tablas 2, 3 y 5, propuestos por Meléndez (2011), Vignote y Martínez (2006) y Arostegui (1982). La variación longitudinal del fuste permitió definir una aptitud de uso diferenciada por troza, donde la troza base se orienta a aplicaciones estructurales y de alta exigencia mecánica, la troza media a mobiliario y carpintería, y la troza punta a ebanistería, carpintería ligera y embalajes, lo cual sustenta el resultado del uso potencial de la madera presentado en la Tabla 31 y confirma su viabilidad para el aprovechamiento industrial y estructural en Guatemala.

CONCLUSIONES

La caracterización fisicomecánica del duramen del híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, mediante la aplicación de tres pruebas físicas (densidad, contenido de humedad y poder calorífico) y siete pruebas mecánicas (flexión estática, compresión paralela y perpendicular al grano, dureza, corte paralelo al grano, tensión paralela y perpendicular al grano), permitió cumplir con el primer objetivo de esta investigación. Los resultados obtenidos evidencian que la madera presenta un contenido de humedad inicial promedio de 110.6 %, lo que confirma su condición de saturación de fibras al momento del corte. La densidad básica promedio de 0.46 g/cm³ ubica a la especie dentro del grupo de maderas de densidad media, mientras que el poder calorífico de 16.46 MJ/kg respalda su potencial como fuente energética renovable. Las pruebas mecánicas, realizadas en estado anhidro conforme a la norma ASTM D143-94 en una máquina universal, evidenciaron que la resistencia y rigidez de la madera disminuyen progresivamente de la base hacia la punta del fuste, siendo la base la sección con mayor capacidad de soporte, debido a factores anatómicos como el porcentaje de fibras maduras en la base del fuste, y la disminución de estas características hacia la punta.

Se identificó el uso potencial de la madera del duramen del híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* según la sección del fuste. La base del árbol, con mayores valores de resistencia y rigidez, es apta para aplicaciones estructurales y de alta exigencia mecánica, tales como pisos, tarimas, herramientas y elementos de carga. La sección media, con propiedades intermedias, se recomienda para mobiliario escolar, carpintería interior y encofrados. Por su parte, la punta del fuste, con menor capacidad mecánica, es adecuada para productos de carga ligera como molduras, embalajes y carpintería decorativa. Por ello, la ENCA puede iniciar con la industrialización de esta madera, generando distintos productos que aporten valor agregado y beneficios económicos a la escuela.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que la Escuela Nacional Central de Agricultura (ENCA) implemente un sistema de clasificación de la madera de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* según la sección del fuste (base, medio y punta) antes de su industrialización. Esta estrategia permitirá aprovechar de manera óptima las propiedades mecánicas específicas de cada segmento, destinando la base a productos de alta exigencia estructural, el medio a aplicaciones de resistencia intermedia, y la punta a usos decorativos o de carga ligera. Esta diferenciación contribuirá a reducir desperdicios y mejorar la eficiencia en el aprovechamiento del recurso.

Considerando que los resultados de esta investigación se basan en una muestra de diez árboles, se sugiere ampliar el tamaño muestral en futuras evaluaciones. Esto permitirá validar la consistencia de las propiedades físicas y mecánicas en distintos lotes de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, asegurando la uniformidad del material en procesos industriales y fortaleciendo la confiabilidad de su uso comercial.

REFERENCIAS

- Arostegui, J. (1982). *Recopilación y análisis de estudios tecnológicos de maderas peruanas*.
- ASTM Internacional. (1999). *ASTM D5536-94*. Standard practice for sampling forest trees for determination of clear wood properties: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/6639/8ec1e3d176d1400099484515bf15fc9f/ASTM-D5536-94-1999-.pdf>
- ASTM Internacional. (2000). *Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials (ASTM D1037-99)*. <https://es.scribd.com/document/691544265/Astm-d1037-Standards>
- ASTM Internacional. (2014). *ASTM D 143-14 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. <https://store.astm.org/d0143-14.html>
- ASTM Internacional. (2021). *Standard Test Method for Ash in Wood*. <https://www.astm.org/d1102-84r21.html>
- ASTM Internacional. (2022). *Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes*. <https://www.studocu.com/gt/document/universidad-de-san-carlos-de-guatemala/materiales-de-construccion-2/astm-d198-22-traducido/109142105>
- Cabrera, A. (Octubre de 2016). *Extracción y caracterización de colofonia obtenida de la resina del pino ocote (Pinus oocarpa schiede ex schtd) a escala planta piloto, como alternativa tecnológica a la producción artesanal en el municipio de Granados Baja Verapaz*. [Tesis de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5745/1/Arturo%20Estuardo%20Cabrera%20Casta%20B1eda.pdf>
- Camey, E. (Noviembre de 2024). *Características anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de roble blanco (Quercus segoviensis Liebm.) de la finca La Montañita, San Agustín Acasaguastlán, El Progreso, Guatemala*. [Tesis de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]: <https://www.enca.edu.gt/wp-content/uploads/2025/02/TESIS-EDGAR-CAMEY-NOV-2024.pdf>
- Centro de Innovación Tecnológico de la Madera. (2009). *Técnicas de Secado de la Madera*. Competencias Básicas para la Producción Industrial de Muebles de la Madera: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/571600/03._T%C3%A9cnicas_de_secado.pdf
- ClimateData. (2025). *Clima Villa Nueva Guatemala*. <https://es.climate-data.org/americadel-norte/guatemala/guatemala/villa-nueva-54060/>
- Córdoba Foglia, R. (2012). Conceptos básicos sobre el secado de la madera. 2(5), 88-92. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/546/472>

- Dávalos Sotelo, R., & Bárcenas Pazos, G. M. (2016). *Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición "verde". Madera y Bosques*, 4(1), 65-70. <https://doi.org/10.21829/myb.1998.411368>
- Escuela Nacional Central de Agricultura [ENCA]. (13 de Marzo de 2025). *Historia de la Escuela Nacional Central de Agricultura -ENCA-*. <https://www.enca.edu.gt/historia/>
- Escuela Nacional Central de Agricultura [ENCA]. (2025). *Ubicación*. <https://www.enca.edu.gt>
- European and Mediterranean Plant Protection Organization [EPPO]. (2016). *Eucalyptus urograndis*. <https://gd.eppo.int/taxon/EUCUG>
- Fernández, J. (2018). *Módelaje de parámetros de albura y duramen en árboles de Tectona grandis L.f en plantaciones forestales de distintas edades en Costa Rica*. [Tesis de maestría, Tecnológico de Costa Rica]: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9938/modelaje_parametros_albura_duramen_arboles_tectona.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Instituto Nacional de Bosques [INAB]. (2019). Selección y desarrollo de clones de alta productividad de Eucalyptus urograndis en la costa sur de Guatemala. *Revista Forestal de Guatemala*, IV, 24. https://www.inab.gob.gt/images/revista_forestal/Revista%20Forestal%20-%20Edicion%204.pdf
- Instituto Nacional de Bosques [INAB]. (Marzo de 2021). Plantaciones de Eucalipto fomentan la legalidad forestal en la costa sur de Guatemala: https://www.inab.gob.gt/images/boletines/2021/marzo/plantaciones_de_eucalipto.pdf
- Marroquín Cajti, K. A., Mazariegos Villegas, C. A., Roca Roca, M. A., Sosa Ajquí, E. R., Sosa Valásquez, J. F., Tohom Yaxón, U., & Vásquez Pineda, B. J. (2025). *Determinación del porcentaje de N total de muestras del suelo*. Guatemala.
- Martínez, C. (2018). *Evaluación de las propiedades físicas - químicas de Eucalyptus urograndis Eucalipto), en el sector de Fumisa, Cantón Buena Fe, provincia de Los Ríos*. <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/bea616ff-6a39-4860-b6c1-7c2f0c409860/content>
- Mendoza, R. (2015). *Anatomía y propiedades físicas de la madera de Eucalyptus urograndis H.B.K. Oxapampa – Pasco*. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3510>
- Novaforest. (2025). *Sostenibilidad En Novaforest*. <https://novaforest.com/>
- Pineda, C. (1998). *Estudio técnico de capacidad de uso de los suelos de la ENCA. Informe técnico P.A.* Escuela Nacional Central de Agricultura, Guatemala. <https://www.enca.edu.gt/empleos/>

- Ramírez, & Rodríguez. (2012). *Aprovechamiento energético de la biomasa forestal residual: Estudio de caso en el estado de Durango*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP):
<https://biblioteca.inifap.gob.mx:8443/jspui/handle/123456789/3591>
- Rivas, C., & Joachin, J. (2006). *Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de cuatro especies de madera del Petén*.
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2615_C.pdf
- Salvador, Manuel. (2010). *Asociación para la investigación y desarrollo integral - AIDER-*. Obtenido de Protocolo de campo para la selección y colección de muestras para la selección y colección de muestras para la caracterización anatomica y de propiedades físicas, mecánicas, químicas y tecnológicas de la madera:
[http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2929/Technical/Technical%20report%20-%20Protocolo%20para%20la%20seleccion%20de%20muestras%20\(2010\).pdf](http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2929/Technical/Technical%20report%20-%20Protocolo%20para%20la%20seleccion%20de%20muestras%20(2010).pdf)
- Silvestre, M., & Torres, F. (2003). *Contribución al conocimiento tecnológico de la madera de Eucalyptus grandis Hill y Eucalyptus urophylla S.T. Blake proveniente de plantaciones forestales comerciales de 7 años de edad en las Choapas, Veracruz, MEX.*. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Suirezs, T. M., & Berger, G. (2009). *Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera*.
https://editorial.unam.edu.ar/images/documentos_digitales/f5_978-950-579-154-5.pdf
- The Wood Database. (2025). *Lyptus*. <https://www.wood-database.com/lyptus/>
- Vizcarra, S. (1998). Guía para el secado de la madera en horno. Proyecto de manejo forestal sostenible BOLFOR.

APENDICES

Figura 12 A

Resultado de laboratorio Ministerio de Energía y Minas

 Ministerio de Energía y Minas	LABORATORIOS TÉCNICOS	PÁGINA 1 DE (1) LAB-REP-1704-2025 ORDEN No. L-801-2025 GUATEMALA, 11-09-2025																	
RESULTADOS DE ANÁLISIS MUESTRA: Eucalyptus Urograndis PRESENTADA POR: Cindy Camey RESPONSABLE DEL MUESTREO: Cindy Camey PROCEDENCIA: ENCA Barcena LOCALIZACIÓN: ENCA Barcena FECHA DE MUESTREO: 27-08-2025 FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA Y PAPELERÍA: 08-09-2025 FECHA DE ANÁLISIS: del 09 al 11-09-2025 PRECIO DE ANÁLISIS: \$ 44.00 ANALISTA: Julio Villacinda																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCIÓN</th> <th>MÉTODO DE ANÁLISIS</th> <th>ESPECIFICACIÓN (a)</th> <th>RESULTADO (b)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PODER CALORÍFICO SUPERIOR, MJ/kg</td> <td>ASTM D-240</td> <td>_____</td> <td>(c) 16.46</td> </tr> <tr> <td>CENIZA, % masa</td> <td>ASTM D-482</td> <td>_____</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>HUMEDAD, % masa</td> <td>Gravimétrico</td> <td>_____</td> <td>27.28</td> </tr> </tbody> </table>	DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN (a)	RESULTADO (b)	PODER CALORÍFICO SUPERIOR, MJ/kg	ASTM D-240	_____	(c) 16.46	CENIZA, % masa	ASTM D-482	_____	0.30	HUMEDAD, % masa	Gravimétrico	_____	27.28			
DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN (a)	RESULTADO (b)																
PODER CALORÍFICO SUPERIOR, MJ/kg	ASTM D-240	_____	(c) 16.46																
CENIZA, % masa	ASTM D-482	_____	0.30																
HUMEDAD, % masa	Gravimétrico	_____	27.28																
OBSERVACIONES: a) En el Acuerdo Ministerial No. 326-2024/SG no existen especificaciones para este producto. b) El resultado es válido solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio. c) El valor de 16.46 MJ/kg es equivalente a 3930 Kcal/kg y a 7074 Btu/lb.   ING. JULIO FRANCISCO VILLACINDA MALDONADO ÁREA DE HIDROCARBUROS  Vo. Bo. ING. MAYRA DEL ROSARIO VILLATORO DEL VALLE JEFE LABORATORIOS TÉCNICOS 																			
El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico. OFICINAS CENTRALES Diagonal 17, 29-78, zona 11, Las Charcas PBX. (+502) 2419-6464 Síguenos como Ministerio de Energía y Minas     www.mem.gob.gt																			

Figura 13 A

Ejemplar de árbol de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis



Figura 14 A

Árbol de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis seleccionado



Figura 15 A
Selección y corte de árboles



Figura 16 A
Medición de alturas de árbol



Figura 17 A
Marcado del centro de la troza



Figura 18 A
Aserrado de trozas



Figura 19 A
Corte de probetas



Figura 20 A
Secado de probetas



Figura 21 A
Máquina universal

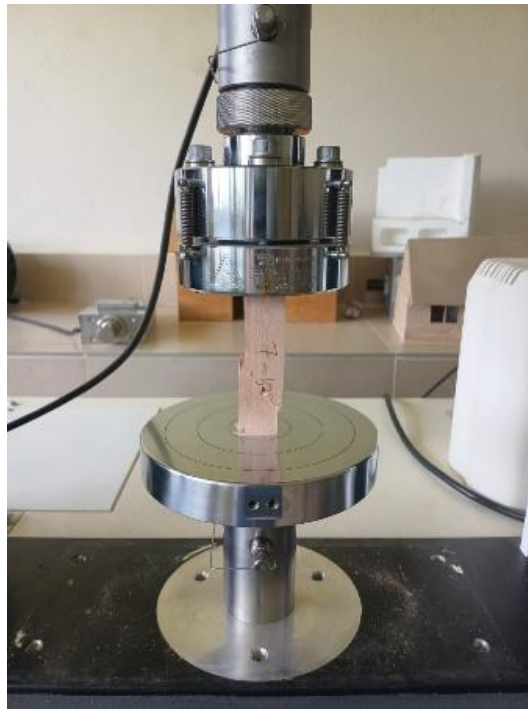


Figura 22 A
Elaboración de prueba de flexión estática



Figura 23 A

Elaboración de prueba de compresión paralela al grano

**Figura 24 A**

Elaboración de prueba de compresión perpendicular al grano



Figura 25 A
Elaboración de prueba de dureza



Figura 26 A
Elaboración de prueba de corte paralelo al grano



Figura 27 A

Elaboración de prueba de tensión paralela al grano

**Figura 28 A**

Elaboración de prueba de tensión perpendicular al grano

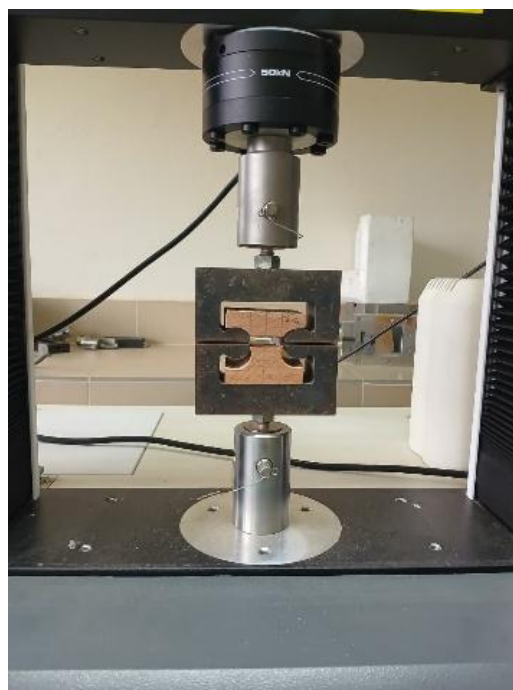


Tabla 32 B
Espesor de albura y duramen

No. De Árbol	No. De Troza	Albura (cm)	Duramen (cm)	Proporción Albura/Duramen
1	1-2	2.6	26.5	10%
	1-6	2.0	19.0	11%
	1-10	1.9	18.0	11%
2	2-2	2.2	26.3	8%
	2-6	2.0	21.0	10%
	2-10	1.8	18.8	9%
3	3-2	3.2	26.8	12%
	3-6	2.3	22.3	10%
	3-11	2.4	17.5	14%
4	4-2	2.0	26.9	7%
	4-6	2.2	24.9	9%
	4-10	2.2	18.5	12%
5	5-2	2.9	32.9	9%
	5-6	2.0	19.9	10%
	5-11	2.0	17.5	11%
6	6-2	2.5	23.5	11%
	6-5	2.0	20.0	10%
	6-8	1.6	16.9	10%
7	7-2	2.9	27.5	10%
	7-6	1.9	20.5	9%
	7-10	2.0	17.8	11%
8	8-2	2.2	26.3	8%
	8-6	2.2	24.5	9%
	8-10	1.9	16.8	11%
9	9-2	2.0	27.0	8%
	9-6	1.9	24.0	8%
	9-10	1.9	18.4	10%
10	10-2	1.9	22.0	9%
	10-5	1.8	20.0	9%
	10-8	1.7	16.8	10%