

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



TESIS

**“DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE 3 SECCIONES DE
MADERA DE REBROTE DEL *Eucalyptus globulus*
Labill., LA ENCAÑADA – CAJAMARCA”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO FORESTAL**

**PRESENTADO POR REL BACHILLER:
LENIN ESTIVER JULCA ORRILLO**

**ASESOR:
Ing. ANDRÉS HIBERNON LOZANO LOZANO**

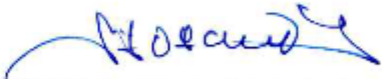
CAJAMARCA – PERÚ

-2026-

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- **Investigador:** Lenin Estiver Julca Orrillo
DNI: 47288665
Escuela Profesional/Unidad UNC: Ingeniería Forestal
 - **Asesor:** Ing. Andrés Hibernon Lozano Lozano
 - **Facultad/Unidad UNC:** Ciencias Agrarias
 - **Grado académico o título profesional:**
 - Bachiller
 - Título profesional
 - Segunda especialidad
 - Maestro
 - Doctor
 - **Tipo de Investigación:**
 - Tesis
 - Trabajo de investigación
 - Trabajo de suficiencia profesional
 - Trabajo académico
 - **Título de Trabajo de Investigación:** "DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE 3 SECCIONES DE MADERA DE REBROTE DE *Eucalyptus globulus* Labill., LA ENCAÑADA - CAJAMARCA"
 - **Fecha de evaluación:** 27/05/2026
 - **Software antiplagio:** TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
 - **Porcentaje de Informe de Similitud:** 14%
 - **Código Documento:** oid: 3117:595149715
 - **Resultado de la Evaluación de Similitud:** 14%
- APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 28/05/2026

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>
 <hr/> Ing. Andrés Hibernon Lozano Lozano DN:26617742

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"

Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los veintisiete días del mes de febrero del año dos mil veintiséis, se reunieron en el ambiente 2C - 202 de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 586-2025-FCA-UNC, de fecha 15 de octubre del 2025**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: "**DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE 3 SECCIONES DE MADERA DE REBROTE DE *Eucalyptus globulus* Labill., LA ENCAÑADA - CAJAMARCA**", realizada por el Bachiller **LENIN ESTIVER JULCA ORRILLO** para optar el Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL**.

A las dieciséis horas y quince minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de diecisiete (17); por tanto, el Bachiller queda expedito para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL**.

A las diecisiete horas y treinta minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.


Ing. Nehemías Honorio Sangay Martos
PRESIDENTE


Ing. Oscar Rogelio Sáenz Narro
SECRETARIO


Ing. Mg. Sc. Luis Dávila Estela
VOCAL


Ing. Andrés Hibernon Lozano Lozano
ASESOR

DEDICATORIA

A mi madre Aurelia,

A mis hermanos Damner y Shaguar

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, Ing. Andrés Lozano Lozano, por su amistad y apoyo en la realización de este trabajo de investigación.

Al equipo de la Unidad Técnica Cajamarca – CITEmadera y del mueble .

A Carolyn, amigos y colegas que me ayudaron en la recolección de datos en campo y procesamiento.

Al señor Ever Díaz, quien fue la persona que proporciono los rebrotes de *Eucalytus globulus* Labill. de una de sus áreas de extracción forestal para el presente el presente estudio.

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Formulación del problema	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos de la investigación	4
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	4
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.5. Hipótesis	4
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Antecedentes	5
2.2. Bases teóricas	8
2.2.1. <i>Madera</i>	8

2.2.1.1.	Características de la madera que influyen en la densidad básica.....	8
2.2.1.2.	Variación de la densidad de la madera.....	9
2.2.2.	<i>Eucalyptus globulus Labill.</i>	11
2.2.2.1.	Descripción dendrológica	11
2.2.3.	<i>Densidad de la madera</i>	11
2.2.3.1.	Densidad de la madera de rebrote	12
2.2.4.	<i>Características generales de los rebrotes</i>	12
2.2.5.	<i>Densidad de la madera</i>	14
2.2.5.1.	Densidad básica.....	15
2.2.5.2.	Densidad saturada	17
2.2.5.3.	Densidad anhidra	18
2.2.6.	<i>Factores que influyen en la densidad básica de la madera</i>	18
2.3.	Definición de términos	19
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS		22
3.1.	Localización de la investigación y características del área de estudio.....	22
3.2.	Materiales	24
3.2.1.	<i>Material biológico</i>	24
3.2.2.	<i>Material y equipos de campo</i>	24
3.2.3.	<i>Materiales y equipos de laboratorio</i>	25
3.2.4.	<i>Materiales y equipos de escritorio</i>	25
3.2.5.	<i>Software</i>	25

3.3. Metodología.....	26
3.3.1. Tipo de la investigación.....	26
3.3.1.1. Diseño de la investigación.....	26
3.3.2. Unidad de análisis, población y muestra.....	26
3.3.2.1. Unidad de análisis.....	26
3.3.2.2. Población.....	27
3.3.2.3. Muestra.....	27
3.3.3. Recolección de datos.....	28
3.3.3.1. Instrumentos.....	28
3.3.3.2. Colección de muestras.....	28
3.3.3.3. Habilitación de trozas para obtención de probetas.....	32
3.3.3.4. Ensayos de laboratorio para la determinación de densidades básica, saturada y anhidra.....	33
3.3.4. Procesamiento y análisis de datos.....	37
3.3.4.1. Ecuaciones para el cálculo de densidades básica, saturada y anhidra	38
3.3.4.2. Análisis estadístico.....	39
3.3.4.2.1. Análisis de varianza.....	40
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4.1. Cuantificación de la densidad básica de la madera de rebrote.....	43
4.2. Cuantificación de la densidad saturada de la madera de rebrote.....	46

4.3. Cálculo de la densidad anhidra de la madera de rebrote	49
4.4. Evaluación de modelos de regresión lineal para la estimación de densidades	51
4.4.1. <i>Evaluación del modelo de regresión para la estimación de la densidad básica en función de la densidad anhidra</i>	51
4.4.2. <i>Evaluación del modelo de regresión para la estimación de la densidad básica en función de la densidad saturada</i>	54
4.4.3. <i>Evaluación del modelo de regresión para la estimación de la densidad anhidra en función de la densidad saturada</i>	56
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	59
CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES	60
CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXOS	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Clasificación de la madera por su densidad básica</i>	17
Tabla 2. <i>Dimensión y número de probetas para ensayos según Norma técnica peruana</i>	27
Tabla 3. <i>Análisis de varianza (ANOVA)</i> ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 4. <i>Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad básica según la sección del fuste</i>	44
Tabla 5. <i>Comparación de medias (Tukey, $\alpha = 0.05$) para Db por sección del fuste.</i> ...	44
Tabla 6. <i>Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad saturada según la sección del fuste</i>	47
Tabla 7. <i>Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad anhidra según la sección del fuste</i>	50
Tabla 8. <i>Modelo de regresión lineal para la estimación de la densidad básica (DB) a partir de la densidad anhidra (DA)</i>	52
Tabla 9. <i>Modelos de regresión lineal para la estimación de la densidad básica (DB) a partir de la densidad saturada (DS)</i>	54
Tabla 10. <i>Modelo de regresión lineal para la estimación de la densidad anhidra (DA) a partir de la densidad saturada (DS)</i>	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Ubicación geográfica del área de extracción de muestras madera de rebrote de Eucalyptus globulus</i>	23
Figura 2. <i>Seccionamiento del fuste de rebrotes de Eucalyptus globulus para obtención de probetas</i>	30
Figura 3. <i>Obtención de probetas de las tres secciones del fuste</i>	30
Figura 4. <i>Sellado de trozas</i>	31
Figura 5. <i>Obtención de probetas de rebrote</i>	32
Figura 6. <i>Esquema dimensional de la probeta utilizada para la determinación de densidad básica, saturada y anhidra en rebrotes de Eucalyptus globulus</i>	33
Figura 7. <i>Pesado de probetas</i>	36
Figura 8. <i>Secado a la estufa de las probetas</i>	36
Figura 9. <i>Flujograma metodológico de la investigación</i>	42
Figura 10. <i>Densidad básica (Db) por secciones del fuste del rebrote de Eucalyptus globulus</i>	43
Figura 11. <i>Densidad saturada (Ds) por secciones del fuste del rebrote de Eucalyptus globulus</i>	47
Figura 12. <i>Densidad anhidra (Da) por secciones del fuste del rebrote de Eucalyptus globulus</i>	49
Figura 13. <i>Tendencia de los modelos de regresión para la predicción de la densidad básica en función de la densidad anhidra</i>	53
Figura 14. <i>Tendencia del modelo de regresión para la predicción de la densidad básica en función de la densidad saturada.</i>	55
Figura 15. <i>Tendencia del modelo de regresión para la estimación de la densidad anhidra en función de la densidad saturada</i>	57

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. <i>Formato de registro de datos de equipos para la densidad de la madera ...</i>	68
Anexo 2. <i>Registro de datos de dimensiones y pesos de las probetas</i>	69
Anexo 3. <i>Formato características dendrométricas y ubicación geográfica de los rebrotes de Eucaliptus globulus Labill. seleccionados.</i>	74

RESUMEN

En esta investigación se analizó la densidad básica, saturada y anhidra de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill. en las secciones inferior, media y superior del fuste, a partir de 90 probetas de $3 \times 3 \times 10$ cm obtenidas de cinco rebrotes de tres años establecidos en una plantación de 0.66 ha ubicada en el centro poblado La Victoria, distrito de La Encañada, Cajamarca. Los árboles seleccionados fueron apeados y trozados en campo; las trozas resultantes se trasladaron a la Unidad Técnica Cajamarca del CITEmadera y del Mueble, donde se habilitaron piezas prismáticas, se sellaron las testas para controlar la pérdida de humedad y se confeccionaron probetas orientadas en sentido radial y tangencial, descartando aquellas con rajaduras, nudos u otros defectos visibles. La determinación de las densidades se realizó siguiendo las NTP 251.008 y 251.011 y el protocolo CITEmadera (2016), mediante mediciones de masa y volumen en estado saturado y después del secado en estufa hasta 103 ± 2 °C y masa constante. El procesamiento estadístico se efectuó con un diseño en bloques completos al azar con tres tratamientos (secciones del fuste) y cinco bloques (rebrotes), aplicando ANOVA, prueba de Tukey al 5% y modelos de regresión lineal simple. La densidad básica alcanzó un valor de 0.564 g/cm^3 y mostró diferencias significativas entre secciones ($p = 0.0177$), con mayores valores en la parte superior e inferior del fuste respecto de la sección media, mientras que las densidades saturadas (1.056 g/cm^3) y anhidra (0.690 g/cm^3) no evidenciaron variación axial significativa, lo que sugiere una distribución relativamente homogénea. La densidad anhidra presentó una relación lineal consistente con la densidad básica.

Palabras clave: *Eucalyptus globulus* Labill., madera de rebrote, densidad básica, densidad saturada, densidad anhidra, modelos de regresión.

ABSTRACT

This study analyzed the basic, saturated and anhydrous density of coppice wood from *Eucalyptus globulus* Labill. in the lower, middle and upper stem sections, using 90 prismatic specimens (3 × 3 × 10 cm) obtained from five three-year-old coppice stems growing in a 0.66 ha plantation located in the village of La Victoria, district of La Encañada, Cajamarca, Peru. Selected stems were felled and bucked in the field, and the resulting logs were transported to the Cajamarca Technical Unit of CITEMadera, where they were sawn into prismatic pieces, end-sealed to reduce moisture loss and converted into specimens oriented along radial and tangential planes, discarding pieces with checks, knots or visible defects. Wood density was determined in accordance with Peruvian Technical Standards NTP 251.008 and NTP 251.011 and the CITEMadera (2016) protocol, based on mass and volume measurements in saturated condition and after oven-drying at 103 ± 2 °C to constant weight. Data were evaluated using a randomized complete block design with three treatments (stem sections) and five blocks (coppice stems), applying ANOVA, Tukey's test at 5% and simple linear regression. Basic density averaged 0.564 g/cm³ and differed significantly among stem sections ($p = 0.0177$), with comparatively higher values in the upper and lower parts than in the middle section, whereas saturated (1.056 g/cm³) and anhydrous density (0.690 g/cm³) showed no significant axial variation ($p > 0.05$). Anhydrous density exhibited a consistent linear relationship with basic density, while saturated density did not show relevant predictive power, providing useful criteria for the technological characterization and potential structural use of *Eucalyptus globulus* coppice wood from La Encañada, Cajamarca.

Keywords: *Eucalyptus globulus* Labill., coppice wood, basic density, saturated density, anhydrous density, regression models.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el género *Eucalyptus* se ha consolidado como uno de los pilares del abastecimiento de madera por su rápido crecimiento, su capacidad de adaptarse a distintos ambientes y la versatilidad de sus usos industriales y rurales. En el contexto peruano, *Eucalyptus globulus* Labill. es la especie que domina gran parte de la franja andina y cumple un rol estratégico tanto en la economía de las familias que dependen de la venta de madera como en los aserraderos y pequeños centros de transformación que la emplean de manera continua. Esta importancia contrasta con el hecho de que, en muchas zonas, las decisiones de aprovechamiento se basan más en la experiencia empírica que en información tecnológica cuantificada.

En la región Cajamarca, una proporción significativa del suministro de madera de *Eucalyptus globulus* proviene de árboles manejados en condición de rebrote, debido a que este sistema permite reducir tiempos de turno y costos de establecimiento frente a nuevas plantaciones. Sin embargo, la madera de rebrote no necesariamente presenta las mismas características que la madera de primer corte, ya que suele contener una mayor proporción de tejido juvenil y puede exhibir variaciones internas asociadas a la posición que ocupa en el fuste. Esta heterogeneidad se refleja en propiedades físicas clave, entre ellas la densidad, que condicionan la respuesta del material durante el secado, el aserrado y el uso estructural. La densidad de la madera es uno de los indicadores más utilizados para describir su calidad, porque está directamente vinculada con la cantidad de material sólido presente en la pared celular y, en consecuencia, con la resistencia mecánica, la durabilidad y el comportamiento frente a tratamientos de preservación. Además, la densidad no se distribuye de forma uniforme dentro del árbol: puede cambiar a lo largo del fuste y entre secciones inferior, media y superior, lo que influye en la forma en que la madera se deforma, se agrieta o falla cuando se somete a cargas o a cambios de humedad. En aplicaciones como la construcción y la minería, donde la madera de *Eucalyptus globulus* de rebrote se utiliza con frecuencia como

pies derechos y elementos de soporte, estas variaciones adquieren especial relevancia porque afectan directamente la seguridad y el desempeño en servicio. A pesar de ello, en Cajamarca la selección de piezas suele hacerse de manera visual, sin disponer de valores de densidad medidos que permitan diferenciar la calidad de la madera según su posición en el fuste. La ausencia de esta información limita la posibilidad de establecer criterios de clasificación más precisos y de vincular la madera de rebrote con normas técnicas orientadas al uso estructural. Frente a esta situación, resulta necesario generar datos específicos sobre la densidad básica, saturada y anhidra de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill. en distintas secciones del fuste, de modo que se pueda describir su variación axial y contar con una base objetiva para recomendar usos y mejorar el aprovechamiento del recurso en el distrito de La Encañada, Cajamarca.

1.1. Descripción del problema

La especie *Eucalyptus globulus* Labill. se ha consolidado como una de las especies forestales de mayor importancia para la industria maderera, debido a su rápido crecimiento, alta adaptabilidad y amplia versatilidad tecnológica (Vignote y Martínez, 2006). Sin embargo, la madera proveniente de rebrotes de *E. globulus* puede diferir de la madera de primer turno, principalmente por la mayor proporción de madera juvenil, la cual puede modificar sus propiedades físicas y de uso (Zobel y Sprague, 1998).

En la región Cajamarca, este recurso se emplea con frecuencia en construcción y minería, especialmente como pies derechos y otros elementos de sostenimiento, donde la selección de la madera suele basarse en criterios prácticos y en la experiencia local, más que en parámetros tecnológicos medidos. Esta situación es relevante porque el fuste no es homogéneo y las propiedades de la madera pueden variar entre las secciones inferior, media y superior, afectando procesos como el secado, la transformación y el desempeño en servicio. En este contexto, disponer de información técnica sobre la densidad de la madera de rebrote

en las distintas secciones del fuste resulta fundamental para establecer criterios de clasificación y orientar un aprovechamiento más adecuado de la madera de *E. globulus* Labill. en aplicaciones estructurales y de soporte.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la densidad de 3 secciones de madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill?, en una plantación ubicada en el distrito de La Encañada, ¿provincia de Cajamarca?

1.3. Justificación

La presente investigación se justificó por la necesidad de generar información tecnológica específica sobre la densidad de la madera de rebrote del *Eucalyptus globulus* Labill. considerando su comportamiento en las secciones inferior, media y superior del fuste.

Otra razón radica en que madera de rebrote del *Eucalyptus globulus* se usa en actividades de construcción y minería; por ejemplo, como pies derechos, sin tener respaldo en propiedades físicas cuantificables, lo que incrementa la incertidumbre sobre su comportamiento en servicio. En ese escenario, disponer de valores de densidad diferenciados por sección del fuste contribuye a orientar el uso más adecuado.

Desde la perspectiva científica, se identificó que gran parte de los estudios reportados para *Eucalyptus globulus* en el ámbito nacional se concentran en árboles de primer turno, mientras que existe escasa información enfocada en madera proveniente de rebrotes, pese a que este aprovechamiento es ampliamente realizado. En consecuencia, determinar la densidad básica, saturada y anhidra en diferentes secciones del fuste permite cubrir un vacío de conocimiento y aportar evidencia comparativa sobre la variación axial de una propiedad física fundamental.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. *Objetivo General*

Determinar la densidad de 3 secciones (inferior, media y superior del fuste) de madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill. en el distrito de La Encañada, provincia de Cajamarca.

1.4.2. *Objetivos Específicos*

- Cuantificar la densidad básica de 3 secciones (inferior, media y superior del fuste) de madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill.
- Cuantificar la densidad saturada de 3 secciones (inferior, media y superior del fuste) de madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill.
- Cuantificar la densidad anhidra de 3 secciones (inferior, media y superior del fuste) de madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill.
- Evaluar modelos de regresión lineal para estimar la densidad básica a partir de la densidad saturada y anhidra en 3 secciones (inferior, media y superior del fuste) de madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill.

1.5. Hipótesis

- Hipótesis nula (H_0): La densidad saturada (DS), anhidra (DA) y básica (DB) de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill. no presentan diferencias estadísticamente significativas entre las secciones inferior, media y superior del fuste.
- Hipótesis alterna (H_a): La densidad saturada (DS), anhidra (DA) y básica (DB) de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill. presentan diferencias estadísticamente significativas entre las secciones inferior, media y superior del fuste.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Araujo et al. (2025) evaluaron estrategias de muestreo longitudinal para determinar la densidad básica de la madera de *Eucalyptus* a lo largo del fuste, con el objetivo de identificar esquemas simplificados que mantuvieran precisión y representatividad del promedio del árbol. El estudio se desarrolló en una plantación comercial en São Paulo (Brasil) e incluyó cuatro clones de eucalipto de seis años, en los que se extrajeron discos en posiciones relativas de la altura comercial (0, 25, 50, 75 y 100%), además de la posición DAP (DBH), comparando siete estrategias de muestreo. Para el análisis, los autores contrastaron promedios entre estrategias e integraron modelos de regresión con el fin de estimar la densidad media del fuste a partir de un número reducido de puntos. Los resultados evidenciaron que la densidad básica estimada varió según el esquema aplicado (con medias entre 449.61 y 476.69 kg/m³) y que las posiciones basales tendieron a registrar valores menores, mientras que las zonas centrales del fuste mostraron mayores densidades.

Waktole et al. (2024) investigaron la variación de propiedades físicas de la madera de *Eucalyptus globulus* en Etiopía, con énfasis en la densidad básica, las contracciones y la proporción albura – duramen, evaluando tanto diferencias entre sitios como la variabilidad intraárbol en sentido axial y radial. La investigación se desarrolló en dos localidades (Menagesha Suba y Debre Birhan), donde se apearon árboles y se recolectaron discos a lo largo del fuste; de cada disco se obtuvieron probetas pequeñas (2×2×3 cm) en distintos puntos desde la médula hacia la corteza, registrándose masa en verde y anhidra, además de dimensiones para estimar densidad y cambios dimensionales. Los autores reportaron diferencias significativas entre sitios, observándose mayor densidad en Menagesha Suba, mientras que en Debre Birhan se registraron mayores contracciones tangencial y longitudinal y una mayor proporción de albura. En cuanto al patrón axial, la densidad mostró una tendencia general de incremento desde la base hacia la parte superior del árbol en ambos

sitios, evidenciando que esta propiedad puede variar de forma marcada con la altura. Asimismo, la variación radial de la densidad no siguió un comportamiento uniforme, lo que refuerza la necesidad de considerar la posición de muestreo cuando se pretende caracterizar la calidad física de la madera dentro del fuste.

Magalhães et al. (2020) evaluaron la densidad básica de la madera en clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* bajo distintos espaciamientos de plantación, considerando además su variación longitudinal a lo largo del fuste. El estudio se desarrolló en Serranópolis (Goiás, Brasil) mediante un diseño en bloques al azar con arreglo factorial que incluyó cinco espaciamientos y tres clones (A01, A02 y GG100), con tres repeticiones. Con el fin de describir el comportamiento axial de la densidad, a los 35 meses se abatió un árbol por parcela y se extrajeron discos en el DAP y en posiciones relativas de la altura comercial (0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %). La densidad básica se determinó siguiendo la norma NBR 11941, lo que permitió comparar el efecto del manejo y del material genético sobre esta propiedad. Los resultados evidenciaron que la densidad básica varió en función del clon y del espaciamiento, observándose valores superiores en los arreglos más amplios; adicionalmente, se registró un patrón longitudinal caracterizado por una disminución desde la base hasta aproximadamente 54% de la altura comercial, seguida de un incremento hacia el 100% de dicha altura.

Ríos - Saucedo et al. (2017) estudiaron la dinámica de brotación y la variación de la densidad básica en madera de rebrote de tres especies forestales, resaltando el caso de *Eucalyptus globulus*. La evaluación se llevó a cabo en la región del Biobío (Chile) bajo condiciones de manejo. Con el fin de describir el comportamiento axial de la propiedad, se aplicó un muestreo longitudinal mediante extracción de rodajas a distintas alturas del fuste, siguiendo la norma NCh 176/2. A partir de mediciones de masa específica, los autores estimaron la influencia del espaciamiento y la edad sobre indicadores vinculados con la calidad lignocelulósica del rebrote. Los resultados situaron la densidad básica entre 0.44 y

0.50 g/cm³, lo que sugiere una estabilidad estadística de esta variable y una independencia respecto a la densidad de carga del rodal en el contexto analizado.

Riesco, G. (2015) evaluó la densidad anhidra (peso específico anhidro) de la madera de *Eucalyptus globulus* y su variación a lo largo del fuste en plantaciones de eucalipto en Galicia – España. El estudio comparó un grupo de 15 árboles sanos con otro de 10 árboles, analizando la distribución de la densidad en diferentes alturas mediante una aproximación exploratoria basada en nubes de puntos construidas con promedios de mediciones. Con el fin de identificar desde qué nivel del fuste podrían presentarse diferencias apreciables, dicha exploración gráfica fue contrastada mediante regresión percentílica (percentiles 95% y 5%). Los resultados indicaron que, para la muestra analizada, hasta los 11 m de altura (aproximadamente 9 cm de diámetro con corteza) no se registraron diferencias significativas de densidad (al 10% de significación), lo que sugiere un comportamiento longitudinal relativamente homogéneo de esta propiedad dentro del rango evaluado.

De la O Hinostroza, (2016) analizó las propiedades anatómicas y físicas de *Eucalyptus globulus* de primer y tercer corte, con material procedente del distrito de Huanchar (Concepción, Perú); el trabajo se realizó en el Laboratorio de Tecnología de la Madera e Industrias Forestales de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Para este estudio se seleccionaron tres árboles por corte, con diámetros de 20 a 25 cm. Los resultados anatómicos fueron un duramente de color marrón pálido y albura blanca en árboles de primer corte y duramen marrón pálido y albura marrón amarillento del tercer corte. En cuanto a las propiedades físicas (contenido de humedad, densidad y contracción), estas mostrando variación en los dos cortes, con valores más altos en la madera de tercer corte.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Madera

A diferencia de los insumos convencionales empleados en la industria de la construcción, la madera se distingue por ser un recurso de origen orgánico, biodegradable y con capacidad de combustión, el cual destaca por poseer una notable eficiencia estructural debido a su alta resistencia en proporción a su densidad (Solano, 1998). Desde un enfoque físico-biológico, este material vegetal se define por su naturaleza higroscópica y anisotrópica (Pomachagua, 1993), atributos derivados de su compleja organización celular. Estas propiedades intrínsecas no solo determinan su comportamiento físico ante las variaciones ambientales, sino que también le confieren una versatilidad técnica que la posiciona como un elemento constructivo con características mecánicas y ecológicas singulares.

La madera está constituida por células, y cada célula presenta una pared celular que delimita una cavidad interna denominada lumen. La cohesión entre las células se establece mediante la lámina media, que actúa como material intercelular de unión; a su vez, el intercambio y la comunicación entre elementos celulares ocurre a través de estructuras como punteaduras y perforaciones (Solano 1998).

2.2.1.1. Características de la madera que influyen en la densidad básica

Los factores ambientales, genéticos y de manejo determinan, en gran medida, las propiedades anatómicas de la madera, las cuales son esenciales para definir su densidad básica. Entre estas propiedades destacan la proporción de madera temprana y tardía, el tamaño y la longitud de las fibras, el espesor de las paredes celulares, el tipo y diámetro de las células, así como la presencia y cantidad de sustancias extractivas en el tejido leñoso. Estas características reflejan la interacción entre el árbol y su medio ambiente, así como la edad del individuo, lo que genera variaciones significativas en la densidad de la madera (Prado y Barros, 1991).

La densidad de la madera también está determinada por la estructura vascular y la disposición de los elementos celulares. En general, las maderas duras presentan vasos más compactos, paredes celulares más gruesas y canales de menor diámetro, condiciones que incrementan su densidad. Además, la madera tardía, debido a su mayor compactación celular, suele ser más densa que la madera temprana. En conjunto, estas propiedades anatómicas explican cómo las variaciones en la microestructura celular se traducen en diferencias en la densidad básica entre especies y dentro de un mismo árbol (Galante, 1953).

Asimismo, la longitud de las fibras y el espesor de la pared celular influyen directamente en la resistencia y densidad de la madera. Fibras más largas proporcionan mayor resistencia mecánica, mientras que un espesor mayor de la pared celular y un menor diámetro de las células se asocian a un aumento de la densidad. De esta manera, la combinación de estos factores anatómicos actúa de manera integrada para determinar la densidad básica del material, reflejando la interacción entre genética, condiciones de crecimiento y manejo forestal (Prado y Barros, 1991; Galante, 1953).

2.2.1.2. Variación de la densidad de la madera

La densidad de la madera muestra una amplia variabilidad entre rodales y también entre árboles dentro de un mismo rodal, incluso al comparar individuos de igual edad, clase de copa y crecimiento bajo condiciones similares (Hillis, 1987). Esta variación ocurre tanto a nivel interespecífico e intraespecífico como dentro de un mismo árbol, debido a que la densidad cambia entre anillos de crecimiento y a lo largo del eje longitudinal del fuste (Hillis, 1987).

A nivel celular, Díaz - Vaz (2003) indica que, dentro de una misma especie, una parte importante de las diferencias en las dimensiones celulares entre árboles tiene un componente hereditario proveniente de los progenitores. No obstante, estas variaciones genotípicas pueden ser moduladas por el ambiente a través de sus efectos sobre el crecimiento, lo que añade diferencias adicionales en la densidad de la madera.

Díaz-Vaz (2003) señala que las sustancias producidas en la copa pueden influir sobre el cambium adyacente, lo que se evidencia en la formación de una franja de madera intermedia más ancha y, en la parte superior del fuste, en zonas de madera tardía con lúmenes relativamente amplios. En contraste, hacia la porción basal del fuste, la madera tardía suele presentar lúmenes más estrechos, condición asociada con una mayor densidad del material.

Con el crecimiento en altura y el envejecimiento del árbol, la influencia fisiológica de la copa sobre las secciones basales del fuste tiende a disminuir (Díaz-Vaz, 2003). A medida que aumenta la distancia entre el cambium de un punto del fuste y la copa, las sustancias fotosintéticas que inciden en el diámetro celular y en el espesor de las paredes ejercen un efecto más limitado; en cambio, cuando el cambium se ubica cercano a la copa superior, dichas sustancias actúan con mayor eficacia y contribuyen a definir las dimensiones finales de las células (Díaz-Vaz, 2003). En consecuencia, la madera juvenil —que se localiza principalmente en las porciones altas del fuste— suele presentar menor densidad en comparación con la madera madura (Díaz-Vaz, 2003).

Finalmente, dentro del árbol, la mayor variación en densidad se produce en sentido radial. Generalmente, la densidad aumenta desde el centro hacia la periferia; sin embargo, esta tendencia se atenúa o incluso desaparece en las secciones superiores del fuste (Hillis, 1987).

Según Panshin y De Zeeuw (1980), la densidad básica puede seguir tres patrones radiales típicos en el fuste: (i) incremento progresivo desde la médula hacia la corteza, (ii) disminución en las zonas cercanas a la médula seguida de un aumento hacia la periferia, y (iii) valores más altos próximos al centro con una disminución hacia la corteza, ya sea con tendencia lineal o curvilínea.

2.2.2. *Eucalyptus globulus* Labill.

2.2.2.1. Descripción dendrológica

Eucalyptus globulus es un árbol perenne de gran a muy gran tamaño, alcanzando alturas entre 40 y 55 m, con valores máximos de hasta 60 m (Orwa et al., 2009), aunque Lanzara y Pizzetti (1978) señalan que puede superar los 40 m. Presenta un tronco recto de 0.6 a 2 m de diámetro y una copa estrecha e irregular, formada por grandes ramas y follaje aromático. Las hojas son alternas, lanceoladas, mayormente curvas o en forma de hoz, con ápice alargado y base acortada, bordes enteros, glabras, gruesas y coriáceas, con venas finas y rectas; su superficie es brillante y verde oscuro en ambas caras, desprendiendo un aroma característico similar al alcanfor. La corteza es lisa, de tonos gris moteado, marrón y verde o azulados, desprendiéndose en tiras largas, mientras que la base se torna grisácea, áspera y pubescente. Esta especie posee un sistema radicular profundo (Orwa et al., 2009).

2.2.3. Densidad de la madera

Igartúa y Monteoliva (2010) señalan que la densidad básica de la madera de *Eucalyptus globulus* (masa anhidra/volumen verde) se utiliza ampliamente como indicador de calidad, porque integra efectos anatómicos y de crecimiento y permite comparar resultados entre estudios cuando se controla la posición de muestreo en el fuste. En plantaciones evaluadas en Argentina, se han reportado diferencias entre procedencias: una procedencia local presentó $546.9 \pm 36 \text{ kg/m}^3$ y una procedencia Valdivia-Chile $490.8 \pm 38 \text{ kg/m}^3$, con un promedio general de 517.7 kg/m^3 y un rango observado de 423.6 a 608.4 kg/m^3 para el conjunto de árboles analizados. Estos resultados evidencian que la densidad básica puede variar tanto por procedencia como por altura de muestreo, y que el patrón axial no necesariamente es uniforme entre materiales genéticos. Como referencia complementaria de uso industrial, también se reportan rangos típicos de densidad básica para *E. globulus* del

orden de 530 a 580 kg/m³ en especificaciones técnicas orientadas a abastecimiento para pulpa.

2.2.3.1. Densidad de la madera de rebrote

Miranda y Pereira (2015) reportan que, en plantaciones forestales, la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* puede presentar densidades básicas cercanas a las de la primera rotación, aunque con diferencias atribuibles al régimen silvícola y a la estructura del rodal. En un estudio de segunda rotación (rebrote), la densidad básica promedio a la altura del pecho fue 567 kg/m³ y la madera de rebrote resultó 2.5% menos densa que la madera de árboles de fuste único en la primera rotación (promedio 582 kg/m³). En ese mismo trabajo se describe un patrón axial de variación con incremento de densidad desde la base hacia la parte alta del fuste, y una disminución de densidad en los espaciamientos más cerrados.

2.2.4. Características generales de los rebrotes

El manejo de rebrotes en plantaciones forestales se ha consolidado como una alternativa silvícola eficaz en distintas especies del género *Eucalyptus*. En *Eucalyptus globulus*, la elevada rentabilidad frente a otras especies se atribuye en buena medida a su marcada capacidad de rebrote (Pinilla et al., 2007). En términos operativos, una proporción considerable de estas formaciones se gestiona bajo el sistema de monte bajo, lo que implica transitar desde un primer ciclo de monte alto, con turnos aproximados de 10 a 15 años, hacia ciclos sucesivos de monte bajo, caracterizados por densidades altas y rotaciones más cortas. Este esquema se orienta principalmente a la obtención de pulpa, leña, polines y otros productos de pequeñas dimensiones (Pinilla et al., 2007).

Eucalyptus globulus se caracteriza por su capacidad de regeneración sucesiva, permitiendo hasta cuatro ciclos de plantaciones forestales sin perder productividad significativa. Las primeras y segundas rotaciones suelen ser incluso más productivas que las

rotaciones de monte alto; sin embargo, el crecimiento decae progresivamente a partir de la tercera rotación (Pinilla et al., 2007). En Chile, las rotaciones de plantaciones originadas a partir de semilla tienen una duración de 10 a 14 años, mientras que las originadas de monte bajo presentan rotaciones más cortas, entre 8 y 10 años, debido a su rápido crecimiento inicial y al retorno más temprano de la inversión, sin comprometer significativamente las propiedades pulpables de la madera (Pinilla et al., 2007).

La producción de los rebrotes tras la primera corta presenta un gran vigor inicial, ya que estos aprovechan las sustancias de reserva acumuladas en las raíces, no obstante, esta ventaja no se mantiene indefinidamente: a medida que la cepa envejece, la productividad del rebrote puede ser superada por la plantación establecida (Pinilla et al., 2007). Además, la producción en volumen de la segunda rotación suele superar a la primera, mientras que la tercera corta tiende a igualarla (Gonzales et al., sf). Según Geldres, (2004), los rendimientos de monte bajo muestran alta variabilidad a través de las sucesivas rotaciones sobre los mismos tocones, lo que dificulta prever un rendimiento constante; sin embargo, las dos primeras rotaciones suelen ser muy productivas.

En estudios de producción de madera de sierra y chapa de alta calidad, Nutto y Touza (2004) observaron que tras la corta inicial se genera el rebrote y se inicia una segunda rotación. A los 15 años, se realiza una segunda corta para pulpa de papel, seleccionando algunos árboles dominantes para mantenerlos en la parcela. El tercer rebrote se desarrolla bajo el dosel de los árboles dominantes y se efectúa una nueva corta. Los resultados indican que el crecimiento diametral de los eucaliptos está estrechamente vinculado con el tamaño de la copa, y que la poda natural por sí sola no permite producir madera de alta calidad en ciclos cortos (Nutto y Touza, 2004).

2.2.5. Densidad de la madera

Según Chave (2006), la densidad de la madera no remite a una única definición, sino que puede expresarse de distintas maneras en función del estado de humedad de la muestra y del procedimiento de medición adoptado. En el ámbito forestal, es frecuente estimar este parámetro a partir de la masa asociada a un volumen conocido de material, empleando como referencia condiciones de “seco al aire” o de secado en estufa. No obstante, la condición “seca al aire” no es estrictamente homogénea a escala internacional, ya que el contenido de humedad residual puede situarse aproximadamente entre 12% y 15% según las normas aplicadas en cada país, lo que introduce variabilidad metodológica y limita la comparabilidad directa entre investigaciones. Por ello, en el presente estudio se adopta como criterio la gravedad específica de la madera (wood specific gravity, WSG), definida como el cociente entre la masa anhidra (obtenida mediante secado en estufa) y el volumen de la muestra en estado verde, determinado mediante el método de desplazamiento de agua. En términos operativos, esta determinación requiere medir de manera consistente tanto el peso anhidro como el volumen inicial (verde) de cada probeta, a fin de asegurar estimaciones reproducibles y comparables dentro del estudio.

De acuerdo a Ananías, R. (1992), De acuerdo con Ananas (1992), la densidad de la madera es una propiedad física esencial que expresa la relación entre la masa del material leñoso y el volumen total que ocupa, considerando tanto la fracción sólida como los espacios internos propios de su estructura porosa. En esta relación masa–volumen, el contenido de humedad cumple un rol determinante, ya que influye simultáneamente en el peso y en las dimensiones de la pieza, modificando el valor observado de densidad. Por ello, se emplean distintas modalidades de densidad, entre ellas la densidad básica y la densidad de referencia, con el fin de estandarizar la evaluación según el estado higrométrico y el criterio de medición. En el ámbito tecnológico, este parámetro se utiliza ampliamente para inferir con alta confiabilidad el desempeño mecánico y la resistencia estructural de la madera. Asimismo,

resulta útil para aproximar la biomasa leñosa disponible por especie y para anticipar su comportamiento en operaciones de transformación, como el aserrado, el cepillado o el moldurado. En términos generales, las maderas de mayor densidad tienden a presentar mayor resistencia y mayor proporción de material leñoso, aunque suelen mostrar menor facilidad de trabajabilidad y tratamiento.

La densidad de la madera se define como el cociente entre su masa y su volumen, un parámetro que se ve directamente afectado por el contenido de humedad, dado que incrementos en esta variable producen un aumento tanto de la masa como, en cierta medida, del volumen. Los valores de densidad entre especies son considerablemente variables; por ejemplo, las coníferas de uso común en construcción suelen presentar densidades entre 400 y 550 kg/m³, mientras que las frondosas típicas oscilan entre 600 y 700 kg/m³. Con base en este parámetro, las maderas pueden clasificarse en categorías como muy ligera, ligera, semipesada, pesada y muy pesada. En gran medida, la densidad determina el comportamiento mecánico del material, su respuesta a posibles tratamientos y modificaciones, así como su idoneidad para diferentes aplicaciones prácticas (Cuevas, 2003).

2.2.5.1. Densidad básica

La densidad básica es uno de los indicadores físicos más utilizados y, a la vez, uno de los más disponibles en la literatura científica especializada, debido a su amplia aplicabilidad en la caracterización tecnológica de la madera (Ugarte y Stoffler, 2017). Su estimación suele ser operativamente sencilla y presenta una relación estrecha con el comportamiento físico-mecánico del material; sin embargo, no debe interpretarse como un atributo uniforme, pues puede exhibir una marcada variabilidad tanto entre especies como dentro de una misma especie, particularmente a lo largo de los gradientes radial y longitudinal del fuste (González, 2018). En este marco, el protocolo técnico de CITEmadera resalta que la densidad básica permite aproximar el grado de dureza y compacidad de la estructura leñosa, aspectos que repercuten directamente en la eficiencia del secado y en la dinámica de

eliminación de humedad (CITEmadera, 2017). En consecuencia, el estudio de los factores que explican su variación intrínseca resulta clave para optimizar el aprovechamiento tecnológico de la madera en contextos industriales, en la medida en que contribuye a mejorar la selección de materia prima y la toma de decisiones en los procesos de transformación (Von et al., 2007).

La densidad básica de la madera se considera un rasgo con componente hereditario; sin embargo, su expresión final puede modificarse por la gestión silvícola y por factores ambientales (Bárcenas et al., 2005). Asimismo, se ha señalado una relación directa entre la densidad básica y el engrosamiento de la pared celular, aunque el incremento de este parámetro suele asociarse con mayores índices de contracción, lo que puede afectar la estabilidad dimensional del material (Goche et al., 2000). Respecto al desarrollo ontogénico, Cobas et al. (2014) proponen una estabilidad relativa de esta propiedad en tejidos juveniles, mientras que Winck et al. (2012) resaltan que el leño juvenil tiende a presentar menor densidad y un ángulo microfibrilar elevado, condiciones que comprometen su desempeño tecnológico. En conjunto, la variabilidad intraespecífica e interespecífica de la densidad básica responde a la interacción de factores como la edad cronológica, la calidad del sitio y la densidad de plantación (Arango et al., 2001; Salazar, 2016).

Los valores de densidad básica en el material leñoso pueden oscilar entre 0.12 y 1.2 g/cm³, rango que se relaciona inversamente con niveles de porosidad aproximados de 92% a 18%. Esta amplitud estructural se explica por la especialización celular y, en particular, por el desarrollo diferencial del espesor de la pared secundaria en función del rol fisiológico del tejido (Vittoria, 2010).

De acuerdo con la clasificación propuesta por Aróstegui (1975), que organiza la madera en función de su densidad básica, las especies del Grupo III presentan un comportamiento favorable durante el procesado con maquinaria de carpintería y, además,

propiedades adecuadas de contracción, resistencia mecánica y durabilidad. En consecuencia, este grupo de maderas resulta apropiado para diversos usos en el sector construcción. Sus aplicaciones potenciales incluyen la fabricación de encofrados y revestimientos, así como la elaboración de elementos estructurales unidos mediante clavos y pernos; también pueden emplearse en carpintería de obra, por ejemplo: puertas y ventanas. (ver Tabla 1).

Tabla 1.

Clasificación de la madera por su densidad básica

Grupo	Rango de Densidad (g/cm³)	Clasificación
I	Menor a 0.30	Muy baja
II	0.30 – 0.40	Baja
III	0.41 – 0.60	Media
IV	0.61 – 0.75	Alta
V	Mayor a 0.75	Muy alta

Nota: La densidad básica de la madera se clasifica en cinco grupos principales, definidos por rangos específicos de g/cm³ que determinan su nivel de densidad desde muy baja hasta muy alta, tomado de (Aróstegui A. , 1975).

2.2.5.2. Densidad saturada

Desde un enfoque teórico, la densidad verde se entiende como un parámetro físico bien definido, dado que está directamente condicionado por el estado fisiológico del árbol, el cual varía según su fase fenológica. Esta densidad describe la condición natural del árbol en vida y de la madera recién extraída, por lo que representa el comportamiento del material antes de cualquier proceso de secado o transformación (Eduardo, 1985).

La densidad saturada se define como la relación entre la masa y el volumen de la madera cuando esta alcanza su máximo volumen, es decir, mientras aún forma parte de la planta viva. En esa condición, funciona como un indicador útil para evaluar el comportamiento físico de la madera en las etapas iniciales del aprovechamiento. Además, su aplicación es especialmente relevante en los cálculos de transporte de trozas (desde el área de extracción hasta los centros de transformación), porque permite estimar con mayor precisión cargas, volúmenes y costos operativos (Eduardo, 1985).

2.2.5.3. Densidad anhidra

La densidad anhidra al aire se define como la relación entre el peso de la madera previamente estacionada y el volumen que esta presenta cuando ha alcanzado el equilibrio higroscópico con la atmósfera circundante. Bajo estas condiciones, se considera de manera general que el contenido de humedad de la madera es cercano al 12 %, valor que suele registrarse con mayor frecuencia en ambientes normales (Eduardo, 1985).

Por otro lado, la densidad anhidra, en sentido estricto, corresponde a la relación existente entre la masa y el volumen de la madera una vez que ha sido completamente desprovista de agua. Este estado se alcanza mediante un proceso de secado en estufa a temperaturas comprendidas entre 105 y 110 °C, lo que permite obtener un material en condición anhidra para fines de análisis físico y comparativo (Eduardo, 1985).

2.2.6. Factores que influyen en la densidad básica de la madera

Diversos estudios señalan que la densidad básica de la madera puede variar de forma apreciable incluso dentro de una misma especie. Esta variabilidad se atribuye a la interacción de factores ambientales y de crecimiento, destacando las condiciones del sitio de origen, el clima, la posición del árbol dentro del bosque y la zona específica del fuste (o del individuo) que se evalúa (Coma, 1959).

Cuando los árboles crecen bajo condiciones climáticas óptimas para la especie, tienden a formar maderas con mayores niveles de dureza, cohesión y homogeneidad estructural, lo que se asocia con una mayor elasticidad. Del mismo modo, las características del suelo influyen directamente en la densidad de la madera: en general, los suelos secos y arcillosos suelen producir maderas más densas que aquellos excesivamente húmedos. La temperatura también cumple un rol importante, ya que los árboles establecidos en climas cálidos generan maderas, por lo común, más densas y resistentes que las formadas en climas fríos. Asimismo, la disponibilidad de luz incide de manera notable en esta propiedad, dado que los árboles que se desarrollan en ambientes con alta luminosidad producen maderas más densas que los que crecen en condiciones de sombra (Coma, 1959).

La densidad de la madera, incluso dentro de una misma especie, puede diferir según el tipo de cultivo y la procedencia del material vegetal. En general, los árboles establecidos en terrenos bajos y húmedos tienden a producir maderas más livianas y menos compactas, mientras que los que crecen en zonas elevadas suelen presentar un crecimiento más lento que favorece la compactación de las fibras y, por tanto, maderas más pesadas y densas (Galante, 1953). Finalmente, la heredabilidad también se reconoce como un factor determinante, porque permite la transmisión de estas características y abre la posibilidad de mejorarlas mediante selección genética.

2.3. Definición de términos

a. Densidad anhidra

La densidad seca al aire se define como la relación entre el peso de la madera previamente estacionada y el volumen que presenta una vez que ha alcanzado el equilibrio higroscópico con la atmósfera circundante. En estas condiciones, se considera que el contenido de humedad de la madera es aproximadamente del 12 %, valor típicamente observado en ambientes normales (Eduardo, 1985).

b. Densidad básica

La densidad básica se considera el indicador físico más frecuente y disponible en la literatura científica especializada (Ugarte y Stoffler, 2017). Esta propiedad destaca por su facilidad de cálculo y su estrecha relación con el comportamiento físico-mecánico de la madera. Sin embargo, presenta una notable heterogeneidad, mostrando variaciones significativas tanto entre especies como dentro de un mismo individuo, especialmente a lo largo de los ejes radial y longitudinal del fuste (González, 2018).

c. Densidad de la madera

La densidad de la madera puede definirse como la relación entre la masa y el volumen de la madera a un contenido específico de humedad. A medida que el contenido de agua aumenta, la masa de la madera se incrementa en mayor proporción que su volumen, lo que provoca un aumento en su densidad (JUNAC, 1989).

d. Densidad saturada

La densidad saturada, también conocida como densidad verde, se entiende como un parámetro físico con características definidas, directamente condicionado por las propiedades fisiológicas del árbol, que a su vez varían según su estado fenológico. Esta densidad refleja la condición natural de la madera recién extraída, antes de cualquier proceso de secado o transformación, mostrando el comportamiento del material en su estado vivo (Eduardo, 1985).

e. Fuste

Es la parte del árbol desprovista de ramas, que se extiende desde el tocón hasta el diámetro en punta delgada, constituye el segmento de mayor relevancia económica, ya que representa la sección más valiosa para su aprovechamiento maderable (Juarez, 2014).

f. Madera

La madera se considera un material higroscópico debido a su capacidad de intercambiar agua con el ambiente, tanto a nivel intermolecular como a través de su estructura anatómica. Esta propiedad es particularmente relevante en dos estados críticos: desde el contenido de humedad anhidro, en el cual el peso de la madera corresponde únicamente a sus componentes lignocelulósicos, hasta valores cercanos al punto de saturación de la fibra, situado aproximadamente entre 28 % y 32 % con respecto al peso seco de la masa de madera (Sotomayor et al., 2010).

g. Rebrotos

Los rebrotos se desarrollan a partir de yemas localizadas tanto a lo largo del tallo como en las raíces. Estas yemas permanecen inhibidas debido al equilibrio hormonal del árbol, hasta que se producen alteraciones, generalmente ocasionadas por daños físicos o químicos, lo que permite su activación y desarrollo (MARENA y INAFOR, 2002).

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización de la investigación y características del área de estudio

3.1.1. Localización

La presente investigación se desarrolló en la Unidad Técnica Cajamarca del CITEMadera y del Mueble, ubicada en el distrito y provincia y departamento de Cajamarca. Las muestras provinieron de rebrotes de una plantación forestal de *Eucalyptus globulus* Labill., de tres años de edad, con un área de 0.66 ha, localizada en el centro poblado La Victoria, distrito de La Encañada, provincia y departamento de Cajamarca, cuyas coordenadas centrales son UTM 17S (WGS84): Este 797 442 y Norte 9 216 483 y una altitud 3400 msnm. El acceso al área de muestreo es por la vía asfaltada desde la ciudad de Cajamarca a la capital del distrito de La Encañada (\approx 1 h 45 min) y, a la altura del km 35, se toma el desvío hacia La Victoria para continuar por una trocha carrozable durante aproximadamente 1 h de recorrido hasta la plantación forestal.

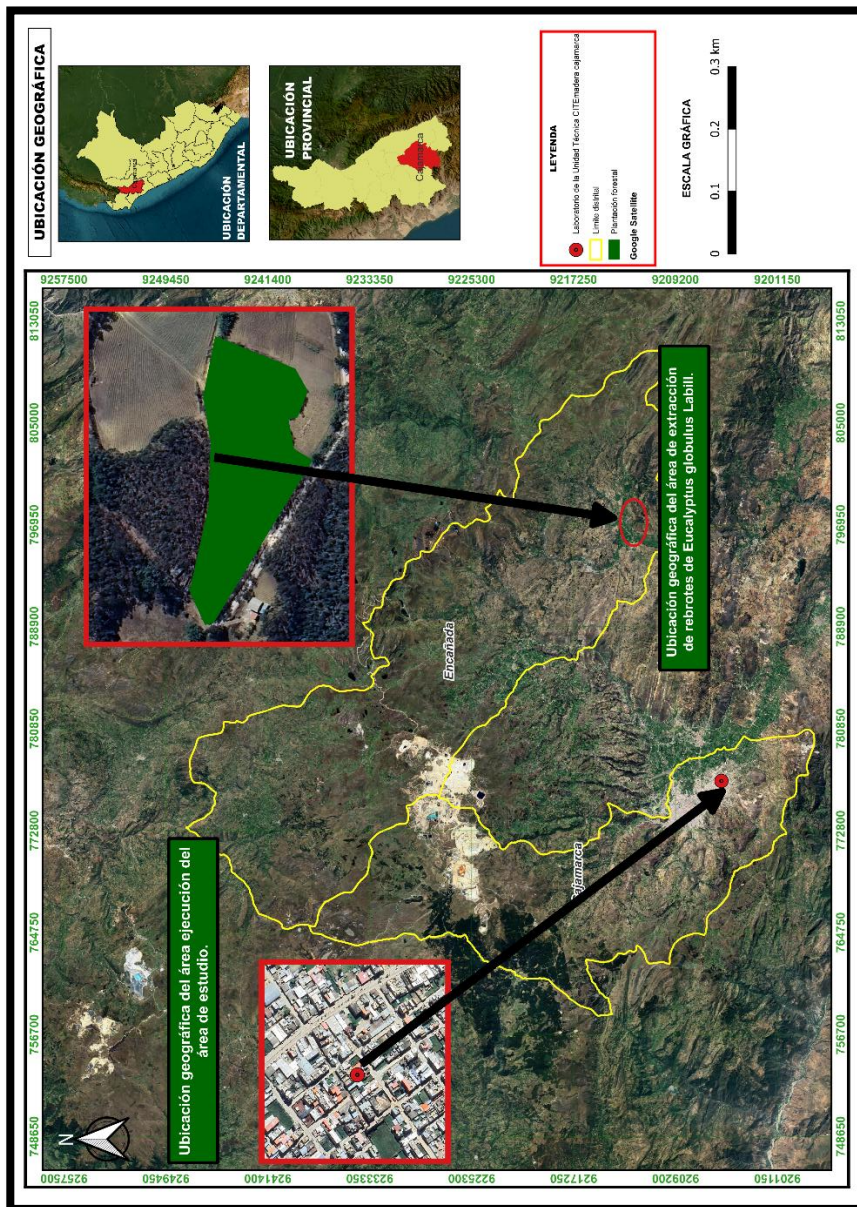
3.1.2. Descripción de la plantación forestal de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill.

La plantación forestal de *Eucalyptus globulus* Labill. fue establecida con un distanciamiento de 3 × 3 m, estimándose alrededor de 733 tocones distribuidos de manera regular en una superficie de 0.66 ha. De una plantación de primer turno que alcanzó aproximadamente 25 años al momento de la cosecha. Tras la corta, a los 3 años se registraron 2 566 rebrotes, observándose entre tres y cuatro brotes por tocón, los cuales evidenciaron un vigor vegetativo acorde con la etapa juvenil del nuevo ciclo de crecimiento. La estructura espacial se caracterizó por una disposición relativamente homogénea de las cepas y una alta ocupación del sitio. La evaluación dasométrica realizada en cinco árboles seleccionados evidenció que el diámetro a la altura del pecho (DAP), medido a 1.30 m sobre el nivel del suelo, se situó en un rango de 15.87 cm a 19.41 cm, con un promedio de 17.85

cm; por su parte, la altura total registró valores comprendidos entre 9.5 m y 11.2 m (ver Anexo 3).

Figura 1.

Ubicación geográfica del área de extracción de muestras de madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* de la victoria, distrito de la Encañada.



3.2. Materiales

Los materiales utilizados en la presente investigación se organizaron en material biológico; materiales y equipos de campo, laboratorio y gabinete; y software, de acuerdo con las actividades de muestreo, preparación de probetas y determinación de las densidades.

3.2.1. Material biológico

El material biológico estuvo constituido por muestras de madera provenientes de cinco (05) rebrotes de de una plantación forestal de *Eucalyptus globulus* Labill, conforme a lo detallado establecido en la norma técnica peruana – NTP 251.008.

De cada rebrote se obtuvieron trozas de tres secciones del fuste (inferior, media y superior), las cuales se habilitaron para la obtención probetas, siguiendo lo establecido en la norma técnica peruana – NTP 251.011.

3.2.2. Material y equipos de campo

- Cinta diamétrica.
- Libreta de campo y fichas de registro.
- Pintura de pared color blanca.
- Pintura en spray color roja.
- Wincha de 50 m.
- Cámara fotográfica.
- GPS navegador.
- Motosierra.

3.2.3. Materiales y equipos de laboratorio

- Balanza analítica (0.01 g).
- Calibrador Vernier.
- Estufa eléctrica de precisión.
- Materiales de escritorio.
- Normas Técnicas Peruanas (NTP), aplicadas a la determinación de propiedades técnicas de la madera.

3.2.4. Materiales y equipos de escritorio

- Calculadora.
- Computadora.
- Impresora.
- Escáner.
- Lapiceros.

3.2.5. Software

- Python, en la plataforma Google Colaboratory (Google Colab).
- Microsoft Excel 16.
- Microsoft Office 16.
- QGIS versión 3.40.

3.3. Metodología

3.3.1. Tipo de la investigación

La presente investigación fue de enfoque cuantitativo, debido a que se realizaron mediciones y análisis estadístico de las densidades de la madera.

3.3.1.1. Diseño de la investigación

Se empleó un diseño no experimental, de corte transeccional (transversal), porque la recolección de datos se realizó en un único momento y no se manipuló deliberadamente ninguna variable.

El alcance fue descriptivo-comparativo, ya que se describieron y compararon las densidades de la madera entre las secciones inferior, media y superior del fuste.

3.3.2. Unidad de análisis, población y muestra

3.3.2.1. Unidad de análisis

La unidad de análisis estuvo constituida por cada una de las probetas de madera obtenidas a partir de las secciones de los cinco rebrotes de *Eucalyptus globulus* seleccionados.

Para asegurar la adecuada orientación anatómica de las probetas, se empleó un esquema de corte radial, garantizando que sus caras se encontraran orientadas según los planos radial y tangencial de la madera, lo cual permitió realizar mediciones consistentes de las densidades evaluadas.

En total se ensayaron 90 probetas, obtenidas mediante la combinación de cinco rebrotes, tres secciones del fuste (inferior, media y superior) y seis probetas por sección, conforme a lo indicado en la Tabla 2.

Tabla 2.

Dimensión y número de probetas para ensayos según Norma técnica peruana

Propiedad física de la madera	Dimensiones (cm)	Nº probetas / sección	Nº probetas / rebrote	Nº individuos (rebrotos)	Total de probetas	Norma Técnica
Densidad (Saturada, Básica y Anhidra)	3 × 3 × 10	6	18	5	90	NTP 251.011:2019

Nota. Las probetas fueron de dimensiones estándar (3 × 3 × 10 cm); se emplearon 6 probetas por sección del fuste (inferior, media y superior) y 18 probetas por rebrote (3 secciones × 6 probetas), totalizando 90 probetas utilizadas para la determinación de la densidad saturada, básica y anhidra.

3.3.2.2. Población

La población la constituyó 2566 rebrotos de *Eucalyptus globulus* Labill., presentes en la plantación forestal de 0.66 ha.

3.3.2.3. Muestra

La muestra estuvo constituida por cinco (5) rebrotos de *Eucalyptus globulus* Labill. de aproximadamente tres años de edad, ubicados en una plantación del centro poblado La Victoria, distrito de La Encañada. La selección se realizó de forma dirigida, considerando como criterios mínimos un diámetro a la altura del pecho (DAP) igual o superior a 15 cm (Delmastro, 1980)., buena calidad de fuste (recto y de forma uniforme) y ausencia de daños biológicos visibles por plagas o enfermedades, de modo que las probetas obtenidas reflejaran de manera adecuada el comportamiento promedio de la madera de rebrote en el área de

estudio y cumplieran con el requisito de un mínimo de cinco individuos por especie establecido en la NTP 251.008 para este tipo de evaluaciones.

3.3.3. Recolección de datos

3.3.3.1. Instrumentos

Para la recolección y registro de datos se emplearon instrumentos como: formatos y fichas guía, elaborados y aplicados conforme a las Normas Técnicas Peruanas (NTP) utilizadas en el estudio.

En campo se usaron fichas de registro para la identificación del rebrote y anotación de variables de selección, siguiendo los lineamientos de la NTP 251.008 para selección y colección de muestras.

En laboratorio se emplearon formatos de registro para la determinación de densidad de la madera, conforme al procedimiento descrito por la NTP 251.011 (revisada 2019), incluyendo el formato de medición consignado en el Anexo 1 para el registro de masas y dimensiones por estado de la probeta.

Para la determinación de la densidad básica, densidad saturada y densidad anhidra de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus*, se aplicaron los procedimientos establecidos en las Normas Técnicas Peruanas previamente citadas. El proceso metodológico se estructuró en cuatro fases consecutivas.

3.3.3.2. Colección de muestras

Se seleccionaron cinco (05) individuos representativos de rebrotes de *Eucalyptus globulus* Labill. en una plantación forestal ubicada en el distrito de La Encañada. La selección se realizó bajo los lineamientos de la NTP 251.008 (1980, revisada en el 2021) “Madera. Selección y colección de muestras”, asegurando que los vástagos presentaran un

fuste único dominante, buena rectitud y ausencia de defectos fitosanitarios visibles que pudieran alterar los resultados de densidad.

A cada rebrote se le midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) y se registró su ubicación mediante coordenadas UTM, con el propósito de mantener el control y la trazabilidad del material muestreado y se procedió a lo siguiente:

a. Talado, trozado y aserrío primario

Para la obtención del material, se procedió a la tala de los rebrotes utilizando una motosierra como herramienta principal, siguiendo los protocolos de seguridad forestal. Una vez en el suelo, se realizó el trozado del fuste comercial cumpliendo con la NTP 251.008, la cual recomienda la extracción de secciones transversales para capturar la variabilidad axial de las propiedades físicas a lo largo del fuste.

El fuste se dividió en tres secciones críticas: (i) sección inferior, extraída a 0.30 m sobre el nivel del suelo; (ii) sección media, obtenida al 50% de la longitud comercial del fuste; y (iii) sección superior, extraída en el límite del extremo comercial (ápice). De cada sección se obtuvieron probetas de 60 cm de longitud.

Inmediatamente después del corte, se realizó el sellado de los extremos con pintura blanca, como medida para evitar la pérdida acelerada de humedad y prevenir la aparición de grietas radiales o colapsos que pudieran invalidar la muestra.

Figura 2.

*Seccionamiento del fuste de rebrotes de *Eucalyptus globulus* para obtención de probetas*

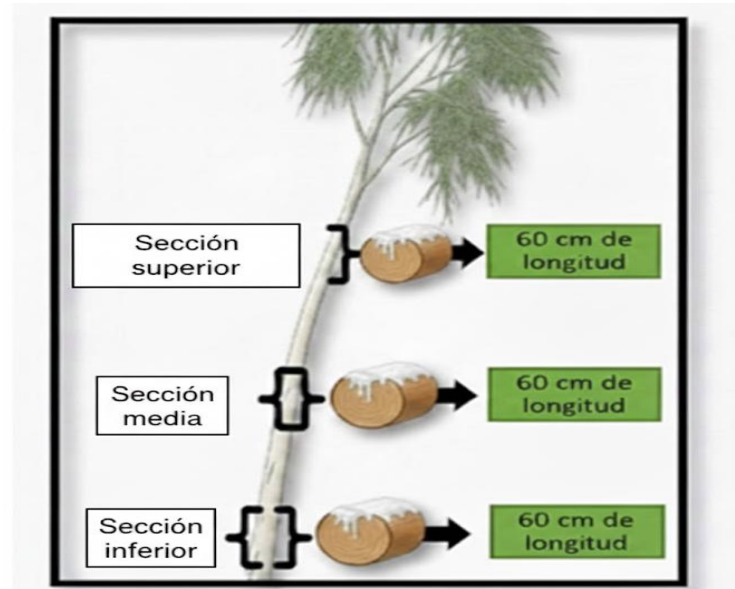


Figura 3.

Obtención de probetas de las tres secciones del fuste



Figura 4.*Sellado de trozas***b. Transporte**

Una vez obtenidas las probetas en campo, estas fueron trasladadas a un centro de aserrío local para su transformación y habilitación de las unidades de análisis. En esta etapa, se procedió al aserrío mediante cortes radiales para obtener las probetas (unidades experimentales) con dimensiones nominales de 3 cm × 3 cm × 10 cm, cuidando la orientación de los planos anatómicos.

Cada probeta fue codificada de manera individual y correlativa (ver Anexo 2), asegurando trazabilidad desde el rebrote y la sección del fuste hasta el ensayo final. Finalmente, las 90 probetas fueron transportadas a la Unidad Técnica Cajamarca del CITEMadera y del Mueble, protegidas de exposición solar y pérdida de humedad, para iniciar la fase de laboratorio bajo la NTP 251.011.

3.3.3.3. Habilitación de trozas para obtención de probetas

Las trozas obtenidas en campo fueron trasladadas a un centro de aserrío local para su transformación y habilitación como unidades de análisis. En esta fase, se llevó a cabo el aserrío mediante cortes radiales con el fin de obtener probetas prismáticas de dimensiones nominales de 3 cm × 3 cm × 10 cm, prestando especial atención a la correcta orientación de los planos anatómicos de la madera para garantizar la validez de las mediciones posteriores. Cada probeta fue identificada mediante una codificación individual y correlativa, detallada en el Anexo 2, con el propósito de asegurar la trazabilidad del material desde el rebrote de origen y la sección del fuste correspondiente hasta la ejecución del ensayo final. Como resultado de este proceso, se obtuvo un total de 90 probetas, las cuales fueron trasladadas de inmediato a la Unidad Técnica Cajamarca del CITEMadera y del Mueble, debidamente protegidas de la exposición solar directa y de la pérdida de humedad, para dar inicio a la fase de ensayos de laboratorio bajo los estándares establecidos en la NTP 251.011.

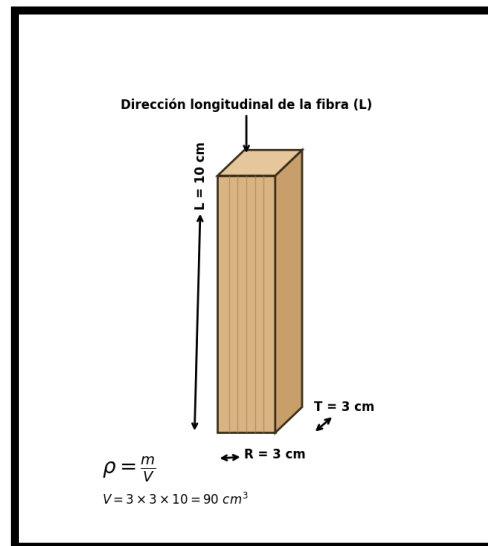
Figura 5.

Obtención de probetas de rebrote en un aserradero



Figura 6.

Esquema dimensional de la probeta utilizada para la determinación de densidad básica, saturada y anhidra en rebrotes de Eucalyptus globulus



Las probetas se obtuvieron a partir de cortes radiales que partieron de la zona próxima a la médula y se extendieron hacia la madera más externa, tomando la posición de la médula como referencia para ubicar cada unidad de ensayo. De esta manera fue posible representar el gradiente interno del fuste sin incluir directamente la médula en las probetas y, al mismo tiempo, mantener la cara longitudinal alineada con la dirección de las fibras, descartando piezas con nudos, rajaduras u otros defectos visibles.

3.3.3.4. Ensayos de laboratorio para la determinación de densidades básica, saturada y anhidra

Los ensayos de laboratorio se realizaron en la Unidad Técnica Cajamarca del CITEMadera y del Mueble, ubicada en la zona urbana del distrito y provincia de Cajamarca, región Cajamarca. Este laboratorio cuenta con balanzas analíticas de precisión, estufas

eléctricas de secado graduable y equipos de medición dimensional calibrados, condiciones que garantizaron la rigurosidad y la repetibilidad de los ensayos físicos ejecutados.

La determinación de las densidades básica, saturada y anhidra de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* se ejecutó bajo los lineamientos de la NTP 251.011:2014 (revisada en 2019) y la directiva técnica de ensayos físicos del CITEmadera (2016), empleando 90 probetas prismáticas de $3 \times 3 \times 10$ cm, codificadas individualmente y cepilladas en sus caras antes del ensayo para asegurar la ortogonalidad de sus superficies. Las probetas fueron orientadas radialmente respecto a la médula, de manera que representaran el gradiente desde la zona interna hacia la corteza del fuste, siguiendo los criterios de preparación establecidos en la norma técnica aplicada.

Para el registro de masas, cada probeta fue pesada de forma independiente en una balanza electrónica con precisión de 0.01 g (Figura 7), verificando previamente la nivelación y la tara del equipo antes de cada medición.

a) Estado verde (saturado)

Las probetas se mantuvieron completamente inmersas en agua hasta que su peso se estabilizó, condición que refleja el estado de saturación de la madera. Previo al pesado, el exceso de agua superficial fue retirado cuidadosamente con un paño absorbente y cada probeta se colocó en el centro del platillo de la balanza para registrar la masa saturada (m_s) una vez que la lectura resultó estable. En esta misma etapa, utilizando un vernier digital, se midieron las tres dimensiones, espesor, ancho y largo, verificando la ortogonalidad de las caras, con el fin de calcular el volumen verde (V_v) de cada unidad de análisis. Los datos obtenidos fueron anotados en los formatos de registro diseñados para tal fin (ver Anexo 2).

b) Estado anhidro (seco)

Las probetas fueron sometidas a secado en estufa mediante un incremento gradual de temperatura, iniciando alrededor de 40 °C y elevándola de forma escalonada hasta

alcanzar 103 ± 2 °C, de acuerdo con lo establecido en la NTP 251.011. El proceso se mantuvo hasta verificar la masa constante, es decir, hasta que la diferencia entre dos pesadas consecutivas resultó despreciable, independientemente del intervalo de tiempo transcurrido. Dado que el material correspondía a madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* de aproximadamente tres años, con una alta proporción de madera juvenil y un contenido de humedad inicial elevado, el tiempo requerido para alcanzar la masa constante fue de aproximadamente 27 horas, superando el referente orientativo de 24 horas. Durante este secado se eliminó primero el agua libre contenida en los lúmenes celulares y espacios intercelulares y, de manera progresiva, el agua higroscópica adsorbida en las paredes celulares, hasta alcanzar el estado anhidro, en el que la masa registrada representa únicamente el material sólido de la madera. Una vez cumplido este criterio, las probetas se retiraron de la estufa y se dejaron enfriar dentro de un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente, momento en el que se registró la masa anhidra (m_0) siguiendo el mismo procedimiento de pesado descrito anteriormente. Finalmente, se midieron nuevamente las tres dimensiones de cada probeta para estimar el volumen seco (V_0), y los datos se registraron en los formatos correspondientes.

Figura 7.

Pesado de probetas



Cada probeta se pesó de forma independiente utilizando una balanza electrónica con precisión de 0.01 g, verificando previamente la nivelación y la tara del equipo. Los datos de masa saturada (ms) se registraron en los formatos diseñados para tal fin (ver Anexo 2).

Figura 8.

Secado a la estufa de las probetas



Las probetas se sometieron a secado en estufa mediante un incremento gradual de temperatura hasta alcanzar 103 ± 2 °C, manteniéndose aproximadamente 27 horas hasta verificar la masa constante. Los datos de masa anhidra (m_0) y dimensiones finales se registraron en los formatos correspondientes.

3.3.4. *Procesamiento y análisis de datos*

El procesamiento y análisis de los datos se llevó a cabo mediante la aplicación de ecuaciones matemáticas normalizadas por el protocolo técnico del CITEmadera (2016) y el uso de herramientas computacionales de análisis estadístico cuantitativo. La información obtenida en laboratorio fue sistematizada y organizada según la posición axial del fuste, distinguiendo tres niveles de análisis: sección inferior, sección media y sección superior. Posteriormente, los registros fueron procesados en los entornos RStudio 4.4 y Python (Google Colab), plataformas que facilitaron la estructuración de las variables de interés, la depuración y validación de los datos mediante la identificación y eliminación de registros que no cumplieran con los criterios de calidad establecidos, el cálculo de las densidades básica, saturada y anhidra para cada unidad de análisis, y la ejecución de las pruebas de significancia estadística requeridas para la caracterización y comparación de las propiedades físicas evaluadas en función de la posición axial en el árbol. Durante la fase de depuración, se excluyeron las probetas que presentaron la observación "falla estructural (rajadura)", obteniéndose un tamaño muestral efectivo de 30 probetas para la sección inferior, 23 para la sección media y 30 para la sección superior.

3.3.4.1. Ecuaciones para el cálculo de densidades básica, saturada y anhidra

Siguiendo el protocolo técnico de CITEMadera (2016), se aplicaron las siguientes ecuaciones para la caracterización del rebrote de *Eucalyptus globulus*:

a) Determinación de la densidad básica (D_b)

Según lo establecido por el CITEMadera (2016), la densidad básica se obtuvo mediante la relación entre la masa anhidra y el volumen de la probeta en estado saturado, empleando la siguiente fórmula:

$$D_b = \left(\frac{m_o}{v_v} \right)$$

Donde:

- D_b : Densidad básica (g/cm^3).
- m_o : Masa de la probeta en estado seco a la estufa (g).
- V_v : Volumen de la probeta en estado verde o saturado (cm^3).

b) Determinación de la densidad saturada (D_s)

La densidad saturada se determinó, bajo los criterios del CITEMadera (2016), dividiendo la masa en estado saturado entre el volumen en el mismo estado, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D_s = \left(\frac{m_s}{v_v} \right)$$

Donde:

- D_s : Densidad saturada (g/cm^3).
- m_s : Masa de la probeta en estado saturado (g).
- V_v : Volumen de la probeta en estado verde o saturado (cm^3).

c) Determinación de la densidad anhidra (D_a)

De acuerdo con el CITEmadera (2016), la densidad anhidra se calculó dividiendo la masa seca a la estufa entre el volumen obtenido en estado seco (anhidro), mediante la siguiente fórmula:

$$D_a = \left(\frac{m_0}{v_0} \right)$$

Donde:

- D_a : Densidad anhidra (g/cm^3).
- m_0 : Masa de la probeta en estado seco a la estufa (g).
- V_0 : Volumen de la probeta en estado seco (cm^3).

3.3.4.2. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos para la determinación de la densidad de la madera de rebrote se llevó a cabo utilizando RStudio 4.4 y Python (Google Colab). El procesamiento se basó en un diseño en bloques completos al azar (DBCA) con tres tratamientos y cinco bloques, donde las secciones del fuste (inferior, media y superior) se consideraron como tratamientos y los cinco rebrotes evaluados como bloques, con el propósito de controlar la variabilidad entre individuos. Sobre esta estructura se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para contrastar la hipótesis de igualdad de medias entre secciones y, cuando se detectaron diferencias significativas, se recurrió a la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0.05 para la comparación múltiple de promedios. En este contexto, el p-valor se interpretó

como la probabilidad de obtener un F-valor igual o más extremo que el observado en el ANOVA si la hipótesis nula de igualdad de medias fuera verdadera; por ello, valores inferiores a 0.05 se consideraron evidencia suficiente para rechazar dicha hipótesis y afirmar que existen diferencias estadísticas entre las secciones del fuste.

3.3.4.2.1. Análisis de varianza

Dentro del procesamiento de datos, una vez calculadas las densidades básica, saturada y anhidra, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) bajo el diseño en bloques completos al azar (DBCA) con el fin de evaluar diferencias estadísticas entre las secciones del fuste.

Con el propósito de evaluar la variabilidad de las propiedades físicas entre las distintas secciones del fuste, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) bajo el diseño en bloques completos al azar (DBCA) previamente descrito.

Para la comparación de promedios entre las secciones inferior (base), media y superior, se empleó la prueba de Tukey, considerando un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$).

Este procedimiento permitió identificar diferencias estadísticas significativas en las densidades evaluadas en función de su posición axial en el árbol.

Tabla 3.*Análisis de varianza (ANOVA)*

Fuente de variación	Grados de libertad
Tratamientos (secciones del fuste)	2
Bloques (rebrotos)	4
Error	8
Total	14

El análisis estadístico se realizó mediante un diseño en bloques completos al azar, el cual se representa mediante el siguiente modelo estadístico:

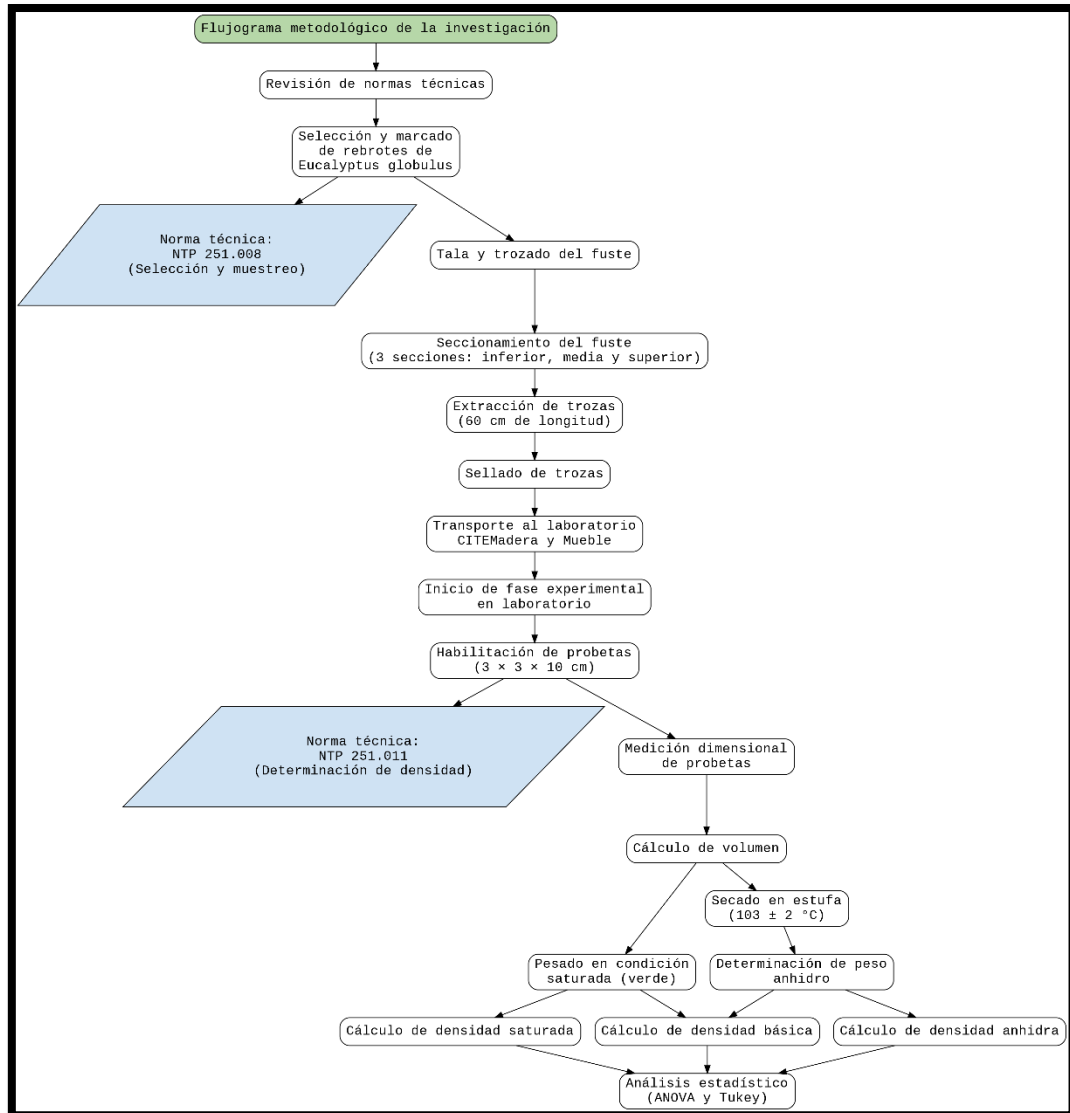
$$Y_{ij} = \mu + \beta_i + \alpha_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

- Y_{ij} : : Variable de respuesta.
- μ : : Media de la población.
- α_i : Efecto de la k – ésima parte del rebrote (inferior, media, superior).
- B_j : Efecto del k – ésimo bloque (rebrote).
- E_{ij} : : Error experimental.

Figura 9.

Flujograma metodológico de la investigación



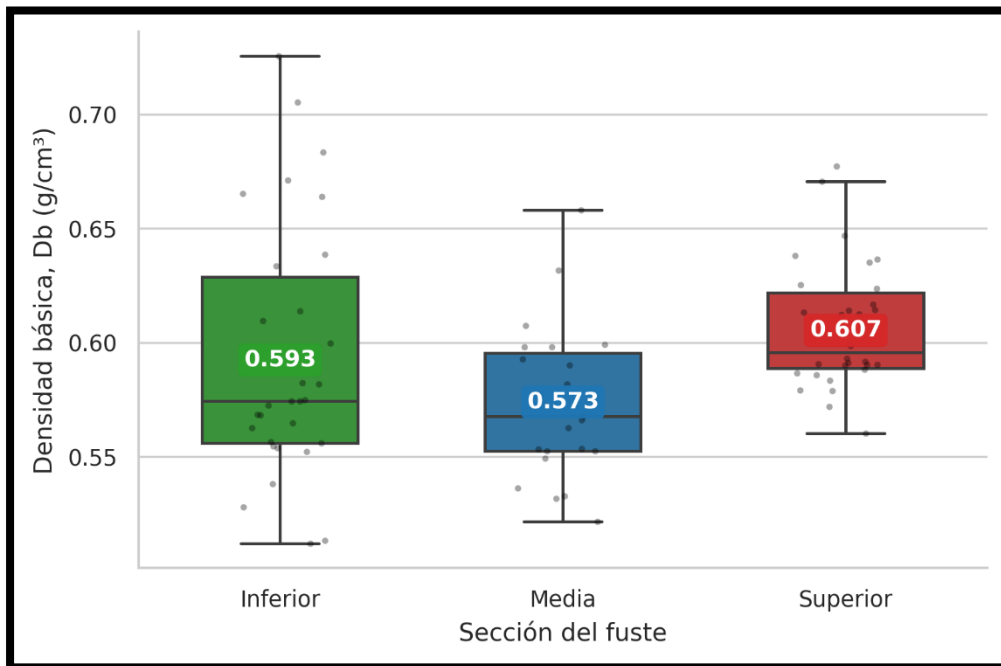
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cuantificación de la densidad básica de la madera de rebrote

La densidad básica (Db) de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* presentó valores promedio de 0.593 g/cm³ en la sección inferior, 0.573 g/cm³ en la sección media y 0.607 g/cm³ en la sección superior del fuste.

Figura 10.

Densidad básica (Db) por secciones del fuste del rebrote de Eucalyptus globulus



Para contrastar estadísticamente las diferencias entre secciones, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor (Tabla 4), que evidenció diferencias significativas en la densidad básica (Db) del fuste.

Tabla 4.

Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad básica según la sección del fuste

Fuente de variación	G.L.	S.C.	C.M.	F – valor	p – valor
Sección del fuste	2	0.0147	0.00735	4.25	0.0177
Residuos	80	0.1384	0.00173		
Total	82	0.1532			

Nota: G.L. = grados de libertad; S.C. = suma de cuadrados; C.M. = cuadrado medio; F - valor = estadístico F del ANOVA; p - valor = probabilidad asociada al estadístico F.

El ANOVA resultó significativo ($p = 0.0177 < 0.05$), por lo que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y se concluye que al menos una sección del fuste difiere en su densidad básica.

En consecuencia, se realizó una comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) para identificar qué pares de secciones difieren estadísticamente (ver Tabla 5).

Tabla 5.

Comparación de medias (Tukey, $\alpha = 0.05$) para Db por sección del fuste.

Sección del fuste	Densidad básica (g/cm³)	Grupos de significancia
Superior	0.6069	a
Inferior	0.5933	ab
Media	0.5733	b

La prueba de Tukey evidenció que la única diferencia estadísticamente significativa se presenta entre la sección media y la sección superior del fuste, mientras que la sección inferior se ubica en un nivel intermedio (ab), sin diferir de manera significativa ni de la sección media ni de la superior. En conjunto, estos resultados respaldan que la densidad básica de

la madera no constituye un atributo homogéneo, sino que presenta variaciones dentro del rebrote a lo largo del gradiente longitudinal del fuste, reflejando la influencia de factores anatómicos y de desarrollo sobre esta propiedad física.

En términos comparativos, los valores de densidad básica obtenidos en el presente estudio se sitúan dentro del intervalo documentado para *Eucalyptus globulus* Labill. por ejemplo, Miranda y Pereira (2015) reportan densidades básicas a nivel del DAP de 0.567 g/cm³ para madera de rebrote y de 0.582 g/cm³ para madera de primera rotación, mientras que Igartúa y Monteoliva (2010) informan un valor medio de 0.517 g/cm³ y un rango de 0.4236 a 0.608 g/cm³ para esta especie. De igual manera, De la O Hinostroza (2016) reporta densidades básicas entre 0.440 y 0.580 g/cm³ en madera de primera corta y entre 0.421 y 0.584 g/cm³ en madera de tercera corta. En este contexto, el promedio global alcanzado en la presente investigación (0.564 g/cm³) se ubica ligeramente por encima de los valores medios señalados por estos autores y dentro del extremo superior de los rangos que ellos reportan.

Asimismo, Waktole et al. (2024) registran densidades básicas de 0.560 y 0.541 g/cm³ para *E. globulus*, valores muy próximos al promedio global del presente estudio. En contraste, Ríos - Saucedo et al (2017). sitúan la densidad básica de madera de rebrote de *E. globulus* en un rango de 0.44 a 0.50 g/cm³, claramente inferior.

La variación axial observada en la densidad básica, con valores promedio más elevados en la sección superior del fuste, intermedios en la sección inferior y menores en la sección media, muestra que esta propiedad no se distribuye de manera uniforme a lo largo del árbol, sino que presenta diferencias sistemáticas entre posiciones longitudinales. Esta tendencia puede interpretarse a partir de la condición juvenil del material analizado, correspondiente a rebrotes de aproximadamente tres años, en los cuales la mayor proporción de madera juvenil se asocia, en términos generales, con cambios marcados en la densidad y con ángulos microfibrilares más elevados, lo que repercute en el desempeño tecnológico de la madera y en la forma en que varían sus propiedades físicas y mecánicas a lo largo del fuste (Zobel y Sprague, 1998).

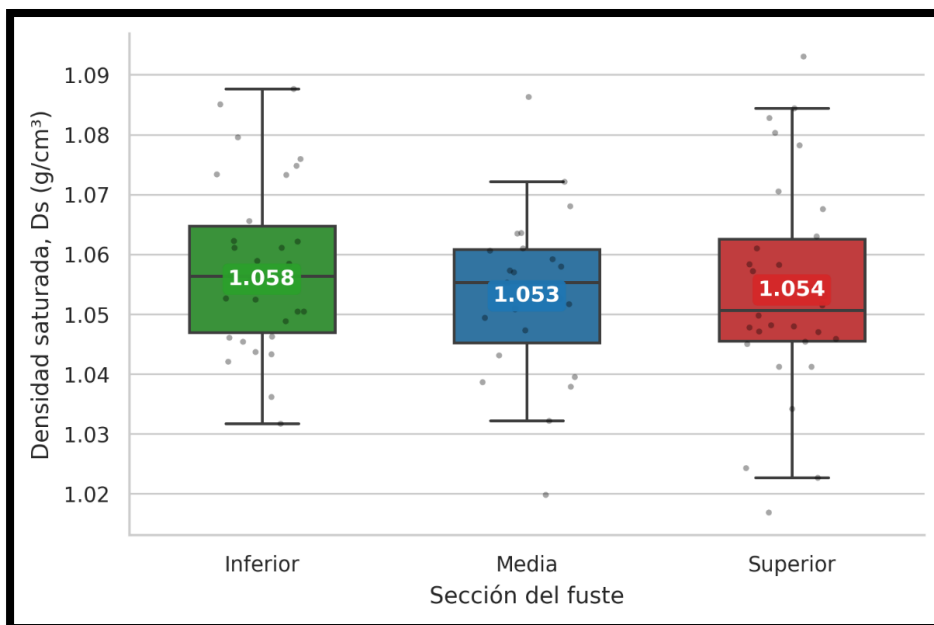
Díaz-Vaz (2003) describe que, en árboles de mayor desarrollo, las partes superiores suelen presentar células con mayor espacio interno y paredes más delgadas, vinculadas a densidades más bajas, mientras que hacia la base aumenta la proporción de tejido de crecimiento tardío, con células de menor diámetro interno y paredes más gruesas, asociadas a densidades más altas. Sin embargo, los resultados del presente estudio sugieren un comportamiento particular de los rebrotes juveniles, en los que la sección superior alcanza densidades relativamente elevadas en comparación con las demás secciones. Esta diferencia respecto de lo descrito para árboles de primera rotación respalda la idea de que la distribución de la madera juvenil y su efecto sobre la densidad básica pueden variar según la edad y el tipo de fuste, por lo que la interpretación de la variación observada debe considerar conjuntamente estos factores (Zobel y Sprague, 1998).

4.2. Cuantificación de la densidad saturada de la madera de rebrote

La densidad saturada (D_s) de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* presentó valores promedio de 1.058 g/cm^3 en la sección inferior, 1.053 g/cm^3 en la sección media y 1.054 g/cm^3 en la sección superior del fuste.

Figura 11.

Densidad saturada (Ds) por secciones del fuste del rebrote de Eucalyptus globulus



En la Figura 11 se aprecia un patrón prácticamente uniforme de Ds entre las tres secciones.

Para evaluar estadísticamente estas variaciones, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA).

Tabla 6.

Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad saturada según la sección del fuste

Fuente de variación	G.L.	S.C.	C.M.	F – valor	p – valor
Sección del fuste	2	0.0004	0.0002	0.87	0.4232
Residuos	80	0.0204	0.0003		
Total	82	0.0208			

Nota: G.L. = grados de libertad; S.C. = suma de cuadrados; C.M. = cuadrado medio; F - valor = estadístico F del ANOVA; p - valor = probabilidad asociada al estadístico F.

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la densidad saturada (Tabla 6) no resultó significativo ($F = 0.87$; $p = 0.4232 > 0.05$), por lo que no se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias y se concluyó que la densidad saturada se mantiene estadísticamente constante entre las secciones inferior, media y superior del fuste. En consecuencia, no fue necesaria la aplicación de pruebas de comparación múltiple de medias (Tukey), confirmándose la homogeneidad axial de D_s con un nivel de confianza del 95%.

En el presente estudio, la densidad saturada presentó un promedio general de 1.056 g/cm^3 , con valores muy próximos entre las secciones inferior, media y superior del fuste (1.058 , 1.053 y 1.054 g/cm^3 , respectivamente), lo que respalda la ausencia de diferencias significativas y evidencia un comportamiento axial prácticamente uniforme. Resultados similares fueron reportados por De la O Hinojosa (2016) para *Eucalyptus globulus*, con densidades saturadas del orden de 1.06 g/cm^3 en madera de primera corta y 1.09 g/cm^3 en madera de tercera corta, y variaciones axiales reducidas, lo que indica que, en condiciones de alta humedad, la especie alcanza valores elevados de densidad con cambios moderados a lo largo del fuste.

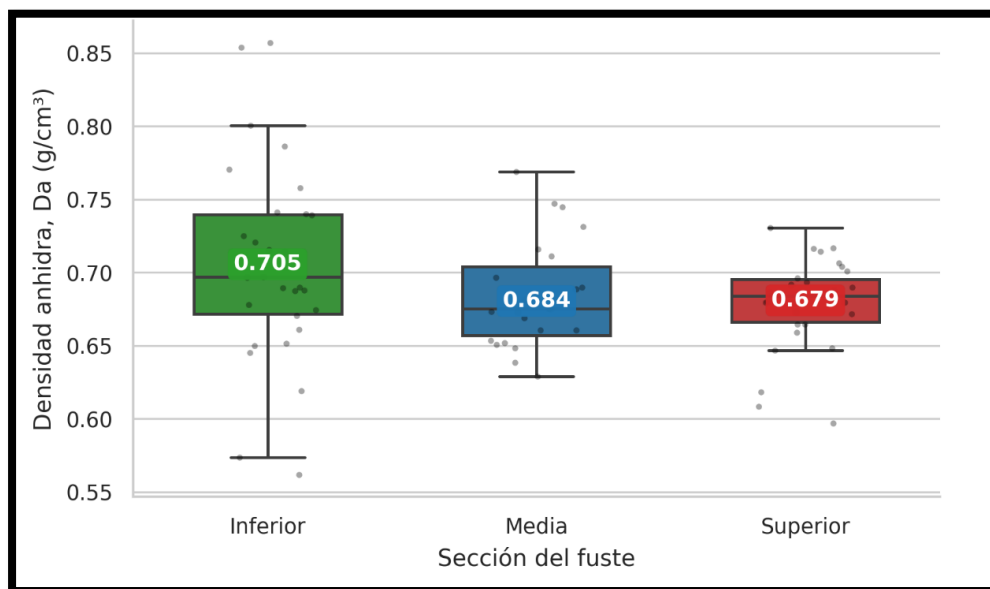
Esta coincidencia puede interpretarse con lo señalado por Eduardo (1985), quien define la densidad saturada como la densidad que presenta la madera en la planta viva, cuando se encuentra próxima a su máximo volumen, y destaca que este parámetro se utiliza para representar el peso y el volumen de las trozas bajo altos contenidos de humedad (Eduardo, 1985). Bajo estos estados de elevada hidratación (verde o saturado), el agua ocupa de manera relativamente uniforme los espacios internos de la madera, de modo que las diferencias locales en la estructura anatómica tienen un efecto limitado sobre la relación masa/volumen. En este contexto, los valores de D_s tienden a mantenerse muy similares entre la base, la parte media y la sección superior del tronco, lo que explica la homogeneidad axial observada en la densidad saturada.

4.3. Cálculo de la densidad anhidra de la madera de rebrote

La densidad anhidra (D_a) de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* presentó valores promedio de 0.705 g/cm^3 en la sección inferior, 0.684 g/cm^3 en la sección media y 0.679 g/cm^3 en la sección superior del fuste.

Figura 12.

*Densidad anhidra (D_a) por sección del fuste del rebrote de *Eucalyptus globulus**



La Figura 12 muestra que las tres secciones del fuste presentan valores de D_a muy próximos entre sí, con un ligero predominio de la sección inferior sobre las secciones media y superior.

Para contrastar estadísticamente las diferencias entre secciones, se aplicó la prueba ANOVA de un factor (ver Tabla 7), considerando como fuente de variación la sección del fuste.

Tabla 7.

Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad anhidra según la sección del fuste

Fuente de variación	G.L.	S.C.	C.M.	F – valor	p – valor
Sección del fuste	2	0.0040	0.0020	2.50	0.0884
Residuos	80	0.0640	0.0008		
Total	82	0.0680			

Nota: G.L. = grados de libertad; S.C. = suma de cuadrados; C.M. = cuadrado medio; F - valor = estadístico F del ANOVA; p - valor = probabilidad asociada al estadístico F.

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la densidad anhidra (Tabla 7) no resultó significativo ($F = 2.50$; $p = 0.0884 > 0.05$), por lo que no se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias y se concluyó que la densidad anhidra no presenta diferencias estadísticamente significativas entre las secciones inferior, media y superior del fuste; en consecuencia, no fue necesario aplicar pruebas post hoc de comparación múltiple (como Tukey), confirmándose la homogeneidad axial de Da con un nivel de confianza del 95%.

El promedio general de densidad anhidra obtenido en el presente estudio fue de 0.693 g/cm^3 , con valores muy próximos entre secciones (0.705 g/cm^3 en la inferior, 0.684 g/cm^3 en la media y 0.679 g/cm^3 en la superior), lo que respalda la ausencia de diferencias significativas y sugiere un comportamiento axial casi uniforme. Resultados concordantes han sido reportados por Riesco (2015), quien no encontró diferencias significativas de densidad anhidra a lo largo del fuste de *Eucalyptus globulus* hasta aproximadamente 11 m de altura, y por De la O Hinostroza (2016), que informa incrementos de densidad entre primera y tercera corta, pero una distribución axial relativamente estable dentro de cada turno de aprovechamiento. Esta concordancia indica que, en madera de *E. globulus* bajo condiciones de rebrote, las variaciones en la proporción y compactación de los tejidos a lo largo del fuste no son lo suficientemente marcadas como para generar contrastes significativos en la

densidad anhidra entre secciones, lo que se traduce en un perfil densimétrico axialmente homogéneo.

4.4. Evaluación de modelos de regresión lineal para la estimación de densidades

Con el propósito de explorar el potencial predictivo entre las propiedades físicas evaluadas, se desarrollaron modelos de regresión lineal simple que relacionan las densidades básicas (D_b), saturada (D_s) y anhidra (D_a) de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill. en las tres secciones del fuste (inferior, media y superior). Estos modelos permiten cuantificar la interdependencia entre variables y evaluar su aplicabilidad para la estimación indirecta de la densidad básica a partir de mediciones alternativas, de menor costo o más accesibles en condiciones operativas.

4.4.1. Evaluación del modelo de regresión para la estimación de la densidad básica en función de la densidad anhidra

En la Tabla 8 se presentan los parámetros estadísticos de los modelos de regresión lineal simple ajustados entre la densidad básica (DB) y la densidad anhidra (DA) para cada una de las tres secciones del fuste (inferior, media y superior) de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill. Estos modelos permiten evaluar la capacidad de la densidad anhidra como variable predictora de la densidad básica y generan ecuaciones específicas para cada nivel axial del fuste.

Tabla 8.

Modelo de regresión lineal para la estimación de la densidad básica (DB) a partir de la densidad anhidra (DA)

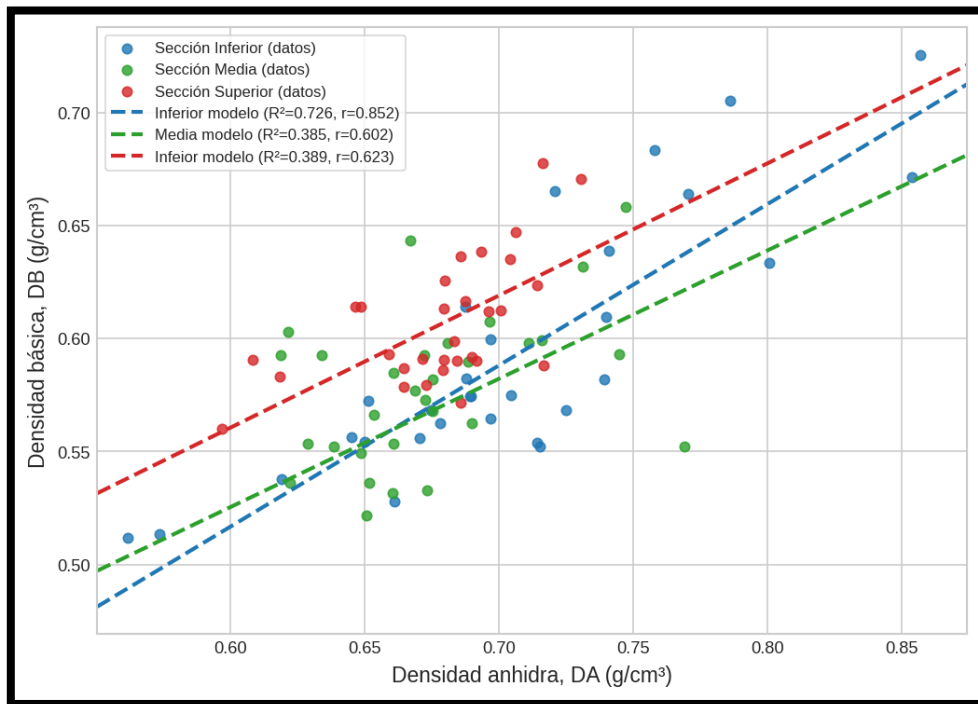
Sección del fuste	R²	C.C.	Modelo ajustado
Inferior	0.726	0.852	$Db = 0.089 + (0.7130 \times Da)$
Media	0.385	0.602	$Db = 0.185 + (0.5674 \times Da)$
Superior	0.389	0.624	$Db = 0.210 + (0.5843 \times Da)$

Nota. Db = Densidad básica; Da = Densidad anhidra; R² = Coeficiente de determinación (proporción de la variabilidad explicada por el modelo); C.C. = Coeficiente de correlación lineal de Pearson (grado y sentido de la asociación entre las variables).

La Tabla 8 evidencia que la relación entre la densidad básica (DB) y la densidad anhidra (Da) varía en intensidad a lo largo del fuste, siendo más fuerte en la sección inferior y moderada en las secciones media y superior. En la base, el modelo $Db = 0.089 + 0.7130 \cdot Da$ presenta un coeficiente de determinación $R^2 = 0.726$ y un coeficiente de correlación $r = 0.852$, lo que indica que la densidad anhidra explica el 72.6% de la variabilidad de la densidad básica y se configura como un predictor altamente confiable. En cambio, en las secciones media y superior, los modelos registran R^2 de 0.385 y 0.389, con r de 0.602 y 0.623, respectivamente, lo que refleja una relación positiva, pero de menor ajuste, en la que solo alrededor del 39% de la variación en Db es explicada por Da, sugiriendo una mayor dispersión de los datos y una capacidad predictiva intermedia en estos niveles del fuste.

Figura 13.

Tendencia de los modelos de regresión para la predicción de la densidad básica en función de la densidad anhidra



En la Figura 13 se visualiza una pendiente positiva en las tres líneas (azul, verde y roja), lo que confirma una relación directa entre la densidad básica y la anhidra. Se observa que la línea de la base es la más inclinada y precisa, lo que indica que en este nivel existe la relación más fuerte entre ambas variables ($R^2 = 0.726$). En las secciones media y superior, aunque el ajuste es moderado ($R^2 = 0.39$), la consistencia de la pendiente ratifica que la densidad anhidra es el predictor más robusto para esta especie en las tres posiciones del fuste.

4.4.2. Evaluación del modelo de regresión para la estimación de la densidad básica en función de la densidad saturada

En la Tabla 9 se presentan los parámetros estadísticos de los modelos de regresión lineal simple ajustados entre la densidad básica (DB) y la densidad saturada (DS) para cada una de las tres secciones del fuste (inferior, media y superior) de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill. Estos modelos permiten evaluar la capacidad de la densidad saturada como variable predictora de la densidad básica y generan ecuaciones específicas para cada nivel axial del fuste.

Tabla 9.

Modelos de regresión lineal para la estimación de la densidad básica (DB) a partir de la densidad saturada (DS)

Sección del fuste	R ²	C.C.	Modelo ajustado
Inferior	0.118	0.343	Db = -0.823 + (1.337 x Ds)
Media	0.099	0.314	Db = -0.185 + (0.721 x Ds)
Superior	0.119	0.344	Db = 0.023 + (0.553 x Ds)

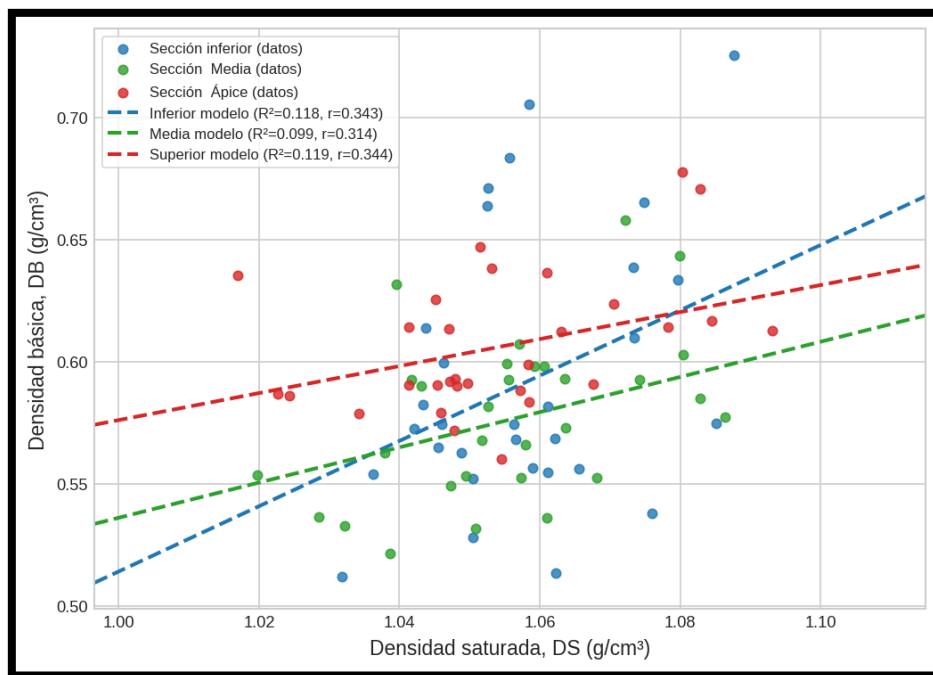
Nota. Db = Densidad básica; Ds = Densidad saturada; R² = Coeficiente de determinación (proporción de la variabilidad explicada por el modelo); C.C. = Coeficiente de correlación lineal de Pearson (grado y sentido de la asociación entre las variables).

La Tabla 9 evidencia que la relación entre la densidad básica (Db) y la densidad saturada (Ds) es extremadamente débil en las tres secciones del fuste. Los coeficientes de determinación son consistentemente bajos: R² = 0.118 en la sección inferior, R² = 0.099 en la media y R² = 0.119 en la superior, lo que indica que la densidad saturada explica menos del 12% de la variabilidad de la densidad básica en todos los niveles evaluados. Los coeficientes de correlación (r = 0.31 – 0.34) confirman una asociación prácticamente inexistente entre

ambas variables, lo que descarta a la densidad saturada como predictor confiable de la densidad básica.

Figura 14.

Tendencia del modelo de regresión para la predicción de la densidad básica en función de la densidad saturada.



En la Figura 14 se observa una alta dispersión de los datos en las tres secciones del fuste, con líneas de regresión que presentan pendientes inconsistentes y prácticamente horizontales, reflejando la ausencia de una relación funcional significativa entre la densidad básica y la densidad saturada. A diferencia del modelo $Db - Da$ (Figura 13), donde las pendientes positivas evidenciaban una correlación robusta, en este caso la falta de patrón claro confirma que las variaciones en el contenido de agua libre (componente principal de DS) no guardan proporción con la cantidad de tejido leñoso sólido, lo que explica la baja capacidad predictiva de los modelos ajustados.

4.4.3. Evaluación del modelo de regresión para la estimación de la densidad anhidra en función de la densidad saturada

En la Tabla 10 se presentan los parámetros estadísticos de los modelos de regresión lineal simple ajustados entre la densidad anhidra (DA) y la densidad saturada (DS) para cada una de las tres secciones del fuste (inferior, media y superior) de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill.

Tabla 10.

Modelo de regresión lineal para la estimación de la densidad anhidra (DA) a partir de la densidad saturada (DS)

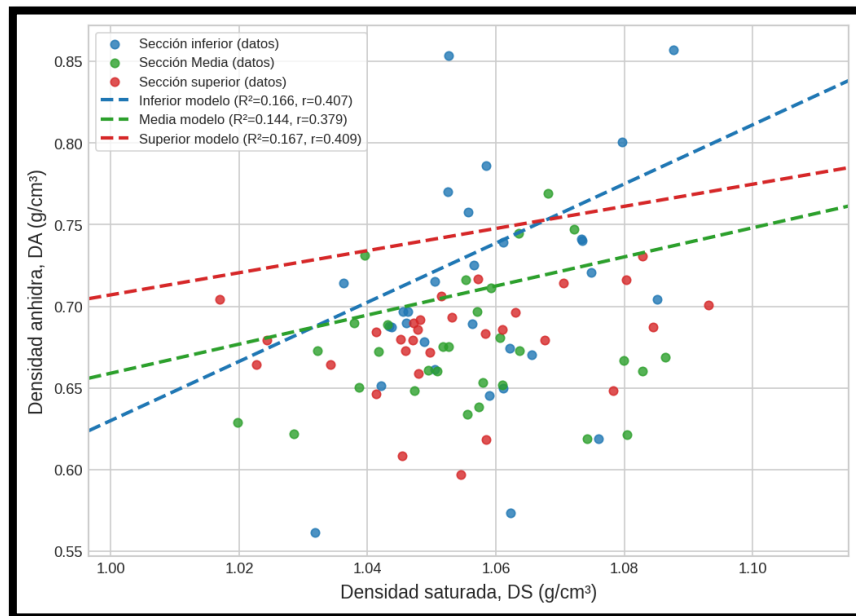
Sección del fuste	R ²	C.C.	Modelo ajustado
Inferior	0.116	0.407	DA = -1.182 + (1.812 × DS)
Media	0.124	0.379	DA = -0.232 + (0.891 × DS)
Superior	0.078	0.409	DA = 0.029 + (0.678 × DS)

Nota. Da = Densidad anhidra; Ds = Densidad saturada; R² = Coeficiente de determinación (proporción de la variabilidad explicada por el modelo); C.C. = Coeficiente de correlación lineal de Pearson (grado y sentido de la asociación entre las variables).

La Tabla 10 evidencia que la relación entre la densidad anhidra (Da) y la densidad saturada (DS) es débil en las tres secciones del fuste. Los coeficientes de determinación oscilan entre R² = 0.124 (media) y R² = 0.166 (inferior), lo que indica que la densidad saturada explica menos del 17% de la variabilidad de la densidad anhidra en cualquiera de los niveles evaluados. Los coeficientes de correlación (r = 0.38–0.41) confirman una asociación estadísticamente baja entre ambas variables, lo que limita sustancialmente el uso de la densidad saturada como predictor de la densidad anhidra.

Figura 15.

Tendencia del modelo de regresión para la estimación de la densidad anhidra en función de la densidad saturada



En la Figura 15 se observa un patrón gráfico con alta dispersión y pendientes débiles en las tres secciones del fuste, similar al comportamiento registrado en el modelo $D_b - D_s$ (Figura 14). Las líneas de regresión muestran una orientación prácticamente horizontal, lo que respalda la falta de significancia estadística del modelo y confirma que la densidad saturada no constituye un indicador confiable para estimar la densidad anhidra. Este resultado es coherente con la naturaleza conceptual de ambas variables: mientras que la densidad anhidra refleja exclusivamente la masa del tejido leñoso seco dividida por su volumen anhidro, la densidad saturada incorpora tanto la masa total (tejido + agua libre) como el volumen verde, sin guardar proporcionalidad directa con la cantidad de material sólido depositado en las paredes celulares.

En términos generales Rosales-Solórzano et al. (2020) desarrollaron ecuaciones de predicción de niveles de humedad en función de la densidad básica para 95 especies

forestales tropicales en Madre de Dios, Perú, obteniendo modelos con coeficientes de determinación R^2 superiores a 0.98 para la relación CHM – DB (contenido de humedad máximo vs. Densidad básica) y $R^2 = 0.99$ para CHL–DB (contenido de humedad libre vs. Densidad básica). Los autores proponen ecuaciones exponenciales del tipo $CHM = 597.96e^{(-2.843 \cdot DB)}$, demostrando que existe una relación inversa altamente significativa entre la densidad básica y el contenido de humedad en condición saturada.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

- La densidad básica de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* Labill. presentó un promedio general de 0.564 g/cm^3 , con diferencias estadísticamente significativas entre las secciones del fuste ($p < 0.05$). La sección inferior registró el mayor valor (0.592 g/cm^3), seguida de la sección superior (0.574 g/cm^3) y la sección media (0.526 g/cm^3).
- La densidad saturada presentó un promedio de 1.056 g/cm^3 sin diferencias significativas entre las secciones inferior (1.061 g/cm^3), media (1.054 g/cm^3) y superior (1.053 g/cm^3) del fuste ($p > 0.05$).
- La densidad anhidra registró un promedio general de 0.693 g/cm^3 sin variación estadísticamente significativa entre las secciones inferior (0.705 g/cm^3), media (0.685 g/cm^3) y superior (0.693 g/cm^3) del fuste ($p > 0.05$).
- El modelo de regresión lineal $DB = 0.089 + 0.713 \cdot DA$ demostró que la densidad anhidra es un predictor eficiente de la densidad básica en la sección inferior del fuste ($R^2 = 0.726$, $p < 0.01$), con capacidad moderada en las secciones media y superior ($R^2 = 0.39$). Por el contrario, la densidad saturada no presentó capacidad predictiva para estimar la densidad básica en ninguna sección del fuste ($R^2 < 0.17$, $p > 0.05$).

CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES

- Ampliar la caracterización tecnológica de la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* mediante la evaluación de propiedades mecánicas (resistencia a compresión, flexión y tracción) y de estabilidad dimensional (contracciones volumétricas, radiales y tangenciales), a fin de contar con información complementaria que permita definir con mayor precisión criterios de clasificación y uso del material en aplicaciones estructurales y de construcción.
- Profundizar en el estudio de la influencia de factores silviculturales como la edad del rebrote, la densidad de plantación y el número de cortes sucesivos sobre las propiedades físicas de la madera, considerando distintos contextos ambientales y altitudinales de la región Cajamarca, con el propósito de identificar esquemas de manejo en plantaciones forestales que contribuyan a mejorar la calidad del material obtenido.
- Dado que la Norma Técnica E.010 del Reglamento Nacional de Edificaciones clasifica la madera estructural en función de su densidad básica y de sus propiedades mecánicas, se recomienda que futuros trabajos articulen los valores de densidad obtenidos para la madera de rebrote de *Eucalyptus globulus* con ensayos de resistencia y rigidez, de manera que se puedan proponer categorías de clasificación compatibles con dicha norma y respaldar el uso seguro de este material en elementos estructurales empleados en construcción y minería en La Encañada y en otros ámbitos de la región Cajamarca.

CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ananías, R. (1992). *Física de la madera*. Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del Bío-Bío.
- Arango, B., Hoyos, J. F., y Vásquez, A. M. (2001). Variación de la densidad básica de la madera de *Eucalyptus grandis* en arboles de siete años de edad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 54(1), 1275-1284.
- Araujo, S. de L., Protázio, L. B., Gimenez, G. G., Barros Junior, U. O., Castor Neto, T. C., Silva, D. F. S. H. S., Rezende, D. A. N., Almeida, M. N. F., Silva, J. G. M., y Vidaurre, G. B. (2025). Sampling strategies along the tree stem to determine the basic density of *Eucalyptus* wood. *CERNE*, 31. doi:doi: 10.1590/01047760202531013500
- Aróstegui, A. (1975). *Estudio Tecnológico de Maderas del Perú (Zona Pucallpa) - Características y usos de la madera de 40 especies del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt*. (3).
- Aróstegui, V. (1982). *Recopilación y análisis de estudios tecnológicos de maderas peruanas*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Bárcenas, G. M., Ortega, F., Ángeles, G., y Ronzón, P. (2005). Relación estructura propiedades de la madera de angiospermas mexicanas. *Universidad y Ciencia*, 21(42), 45.
- Cabanillas, J. (2019). *Propiedades físicas y mecánicas de la madera de Eucalyptus globulus de dos procedencias en la región Cajamarca*. [Tesis de pregrado]. Universidad Privada del Norte.

- Chave, J. (2006). *Medición de densidad de madera en árboles tropicales. Manual de campo. PAN-AMAZONIA.*
- CITEmadera. (2017). *Desarrollo de la tecnología de secado para especies reforestadas, nativas y de rápido crecimiento, con potencial e incremental valor comercial hacia un aseguramiento de la calidad, rentabilidad y competitividad de las industrias y el bosque.* Centro de Innovación Productiva y Transferencia .
- Cobas, A. C., Area, M. C., y Monteoliva, S. (2014). . Patrones de variación de la densidad de la madera y morfometría celular de *Salix babylonica* para la determinación de la edad de transición entre madera juvenil y madura. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(3), 343 - 344.
- Coma, P. (1959). *Prontuario de la madera; compañero del industrial y del comerciante maderero y de los técnicos de la construcción.* Editorial Gustavo Gili.
- Cuevas, E. (2003). *Propiedades físicas y mecánicas de la madera: Material de apoyo en propiedades físicas y mecánicas.* Universidad de Talca.
- De la O Hinojosa, S. Y. (2016). *Anatomía y propiedades físicas de la madera de primera y tercera corta de Eucalyptus globulus Labill-Huánchar-Concepción.* [Tesis de grado], Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/02b62b72-d405-4900-bfa5-9fc30cef7805/content>
- Delmastro, R., Prado, J., y Barros, S. (1980). *Propiedades físico-mecánicas de la madera: Un análisis estructural.*

- Díaz, P. (2005). *Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de madera de Nothofagus glauca (Hualo) proveniente de la Zona de Cauquenes*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Talca.
- Díaz - Vaz, J. (2003). *Anatomía de maderas*. Universidad Austral de Chile.
- Eduardo, C. (1985). *Programa de investigación de celulosa y papel*. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones. Obtenido de <http://www.celuloseonline.eom.br/imagembank/Docs/DocBank/dc/dc040.pdf>
- Galante, J. (1953). *Tecnología de las maderas; estudio teórico-práctico de la elaboración manual y mecánica y su adaptación en la industria*. Editorial Labor.
- Geldres, R., Schlatter, J., y Marcoleta, C. (2024). Monte bajo: opción para tres especies de eucaliptos en segunda rotación. *Bosque*, 25(3), 57-62.
- Goche, J. R., Fuentes, M., Borja, A., y Ramírez, H. (2000). Variación de las propiedades físicas de la madera de un árbol de *Abies religiosa* y de *Pinus ayacahuite* var. *Veitchii*. *Revista Chapingo*, 6(1), 83-92.
- González, F. A. (2018). *Variación de la densidad básica de la madera y Módulo de Elasticidad en plantaciones jóvenes de Nothofagus alpina*. [Tesis de grado]. Universidad Austral de Chile.
- Gonzales, M. C. (sf). *Manual técnico de silvicultura del Eucalyptus*. Agro Byte. Obtenido de <http://www.agrobyte.com/publicaciones/eucalipto/indice.html>
- Hillis, W. E. (1987). *Heartwood and tree exudates*. Springer-Verlag.

Igartúa, D., y Monteoliva, S. (2010). Densidad básica, longitud de fibras y crecimiento en dos procedencias de *Eucalyptus globulus* en Argentina. *Bosque*, 31(2), 150–156. doi:DOI: 10.4067/S0717-92002010000200008

Instituto Nacional de Calidad. (2019). *Madera. Método para determinar la densidad (NTP 251.011:2014, revisada en 2019)*. INACAL.

Instituto Nacional de Calidad. (2016). *Madera. Selección y colección de muestras para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas (NTP 251.008:2016)*. INACAL

Juárez, Y. (2014). *Dasometría: Apuntes de clase y guía de actividades prácticas (1.ª ed.)* [Documento en PDF]. Scribd. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/402638087/DASOMETRIA-Apuntes-de-Clase-y-Guia-de-Ac-1-pdf>

JUNAC. (1984). *Manual de Diseño para maderas del grup andino*.

Junac, R. (1989). *Manual del Grupo Andino para el secado de madera (1.ª ed.)*. Carbajal S.A.

Lanzara, P., y Pizzetti, M. . (1978). *Alberi: Come riconoscerne gli alberi*. . Arnoldo Mondadori Editore.

Magalhães, L. G. S., de Lima, A. P. L., de Lima, S. F., Soratto, D. N., Martins, S. M., y Santos, I. F. F. (2020). Densidade básica da madeira de clones de eucalipto em diferentes espaçamentos / Basic density of wood of eucalyptus clones in different spacing. *Brazilian Journal of Development*, 6(4), 19435–19445.

MARENA (Ministerio de Recursos Naturales y del Ambiente) y INAFOR (Instituto Nacional Forestal). (2002). *Guía de especies forestales de Nicaragua (1.ª ed.)*. Editora de Arte, S.A.

- Miranda, I., y Pereira, H. (2015). Variation of wood and bark density and production in coppiced *Eucalyptus globulus* trees in a second rotation. *iForest*, 270-275. doi:doi:10.3832/ifor1442-008
- Orwa, C., Mutua, A., Kindt, R., Jamnadass, R., y Simons, A. (2009). *Agroforestry Database: a tree reference and selection guide version 4.0*. World Agroforestry Centre. Obtenido de <http://apps.worldagroforestry.org/treedb2/>
- Panshin, A., y De Zeeuw, C. (1980). *Textbook of Wood Technology* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Pinilla, J., Molina, M., y Aguilera, M. (2007). Antecedentes para el uso del monte bajo de *Eucalyptus globulus* en Chile. *Ciencia e Investigación Forestal*, 13(01). Obtenido de <http://biblioteca1.infor.cl/DATAFILES/21701-2.pdf>
- Pomachagua, G. (1993). *Propiedades y usos de especies madereras de corta rotación*. Corporación de Fomento y Producción (CORFO).
- Prado, J., y Barros, S. (1989). *Eucalyptus: Principios de silvicultura y manejo*. INFOR/CORFO.
- Riesco, G. (OCTUBRE de 2015). Variación de la densidad de la madera a lo largo del fuste en *Eucalyptus globulus*: Influencia de los incendios forestales. En M. J. Ginzo Villamayor, J. M. Alonso Meijide, y L. A. Ramil Novo (Eds.), *XII Congreso Galego de Estatística e Investigación de Operacións: Lugo*.
- Ríos
- Saucedo, J. C., Acuña-Carmona, E., Cancino-Cancino, J., Rubilar-Pons, R., Corral-Rivas, J. J., y Rosales-Serna, R. (2017). Dinámica de brotación y densidad básica de la madera en rebrotes de tres especies dendroenergéticas. *Agrociencia*, 51(2), 215-227.

Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000200215

Rosales - Solórzano, E. (2020). Ecuaciones de niveles de humedad relacionada a la densidad básica de la madera de especies forestales tropicales en Madre de Dios, Perú. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 17(40), 14-22. doi:<https://doi.org/10.18845/v17i40.4905>

Salazar, E. (2016). Influencia de altas densidades de plantación en el poder calorífico y propiedades físicas de la madera para la especie *Gmelina arborea* Roxb. Ex Sm. *Kurú: Revista Foresta*, 13(30), 6.

Silva, J. (2005). *Determinación de las características anatómicas y propiedades físicas de la madera de la especie forestal madero negro (Tabebuia billbergii) o guayacán* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Ucayali.

Solano, O. (1998). *Seminario sobre diseño ingeniería y proceso de secado de maderas tropicales*. Centro Nacional de la Madera; Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA).

Sotomayor, J. R., García, L. J., Moya, C. E., y Olguín, J. B. (2010). Higroscopía y anisotropía de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 6(3), 32.

Torres, P. (2009). *Determinación de las propiedades físicas a tres niveles del fuste de cetico (Cecropia sciadophylla Mart.) en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Ugarte, J., y Stoffler, K.-H. (2017). *Manual para Operadores de Secadores Convencionales*. Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la madera., 76.

Vignote, S., y Martínez, I. (2006). *Tecnología de la madera*. Ediciones Mundi-Prensa.

Vittoria, M. (2010). *La madera: De su conocimiento a su conservación*. Gente Común.

Von, A., Andrés, R., y Alcides, M. (2007). Densidad básica de la madera de *Pinus taeda* L. Marion en función de la densidad arbórea del rodal, altura y posición transversal en el fuste. *YVYRARETÁ*.14, 63-71

Waktole, S., Musa, M., Abara, L., Mezegebu, G., Wale, M., Wubeshet, T., y Tesfaye, A. (2024). Variation of physical properties of *Eucalyptus globulus* grown in Ethiopia. *Indonesian Journal of Innovation and Applied Sciences (IJIAS)*, 4, 198 – 207.

Winck, R. A., Fassola, H. E., Tomazello, M. F., y Area, M. C. (2012). Caso de estudio: Ángulo microfibrilar y su relación con la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* L. con manejo silvopastoril. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, 9(11), 10.

Zobel, B y Sprague, J. . (1998). *Juvenile wood in forest trees*. Springer-Verlag.

ANEXOS

Anexo 1. Formato registro de datos de equipos para la densidad de la madera

1. **Tesista:** Lenin Estiver Julca Orrillo
2. **Tesis:** DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MADERA DE REBROTE DEL *Eucalyptus globulus* Labill. EN TRES SECCIONES, LA ENCAÑADA – CAJAMARCA.
3. **Ubicación del laboratorio:** Unidad Técnica Cajamarca – CITEMadera y del mueble, ITP – PRODUCE.
4. **Dirección:** Jr. San Luis 242 – Cajamarca.
5. **Características de los equipos:**

1. Balanza de precisión	Marca: IIAXIS
	Modelo: ACA6200
	Capacidad 6200 g, división mínima 0.01 g.
	Condición: Operativa y Calibrada
2. Estufa	Marca: Memmert
	Modelo UNB 101
	Capacidad: 14 Litros.
	Condición: Operativa y Calibrada
3. Vernier	Marca: Mitutoyo
	modelo CD-6" – AX – B
	Condición: Operativo y Calibrado

Anexo 2. Registro de datos de dimensiones y pesos de las probetas

Código de Probeta	Masa 1 (g)	Dimensiones (cm)			Masa 2 (g)	Dimensiones (cm)			Observación
		L	A	E		L	A	E	
A1BP1	114.7	10.14	3.28	3.22	59.8	10.13	3.06	2.86	
	2	7	9	6	5	8	9	9	
A1BP2	121.5	10.19	3.39	3.39	64.9	10.17	3.15	2.83	
	7	1	6	0	8	9	0	7	
A1BP3	116.5	10.09	3.35	3.26	63.3	10.06	3.12	2.92	
	9	2	5	0	9	1	8	2	
A1BP4	115.2	10.16	3.31	3.27	66.0	10.16	3.09	3.01	
	6	2	5	0	5	0	2	7	
A1BP5	116.2	10.23	3.30	3.24	61.0	10.20	3.09	2.99	
	7	5	6	5	9	9	8	4	
A1BP6	118.4	10.24	3.33	3.31	63.9	10.16	3.19	2.83	
	6	6	8	3	8	9	0	1	
A2BP7	120.4	10.18	3.34	3.32	58.1	10.13	3.28	3.04	
	3	7	9	3	9	8	3	9	
A2BP8	122.2	10.12	3.37	3.32	75.6	10.11	3.27	3.17	
	4	6	5	8	7	8	0	3	
A2BP9	114.7	10.16	3.29	3.24	76.4	10.13	3.16	3.02	
	4	0	0	3	5	6	8	8	
A2BP10	115.5	10.15	3.34	3.22	74.8	10.15	3.14	3.09	
	5	5	0	7	1	3	0	6	
A2BP11	116.0	10.21	3.30	3.23	62.1	10.21	3.00	3.00	
	7	8	6	5	2	7	3	2	
A2BP12	118.9	10.12	3.35	3.34	65.3	10.10	3.17	2.95	
	1	0	4	9	0	1	0	7	
A3BP13	119.6	10.12	3.37	3.36	66.7	10.11	3.13	3.05	
	0	4	0	0	6	6	8	7	
A3BP14	122.9	10.15	3.32	3.38	61.4	10.15	3.19	3.06	
	9	9	7	2	9	1	6	2	
A3BP15	119.3	10.16	3.35	3.25	67.8	10.30	3.04	2.91	
	7	5	8	8	0	5	6	9	
A3BP16	121.6	10.12	3.38	3.35	65.4	10.12	3.15	2.82	
	9	4	8	8	4	2	3	8	
A3BP17	122.5	10.18	3.39	3.37	65.7	10.21	3.22	2.94	
	7	4	6	9	4	0	3	6	
A3BP18	117.9	10.16	3.32	3.32	61.9	10.15	3.11	2.74	
	3	7	3	3	8	8	3	0	
A4BP19	124.2	10.12	3.40	3.35	73.9	10.12	3.18	3.09	
	6	8	5	7	3	0	3	7	
A4BP20	124.9	10.15	3.39	3.34	66.2	10.15	3.18	2.91	
	7	7	4	1	0	0	0	2	

A4BP21	120.6	10.17	3.37	3.34	60.6	10.16	3.10	2.90	
	1	3	8	1	1	0	6	5	
A4BP22	119.5	10.20	3.37	3.32	70.3	10.17	3.18	3.15	
	3	5	4	6	0	9	9	1	
A4BP23	121.7	10.18	3.34	3.28	81.2	10.16	3.16	2.94	
	4	6	4	6	0	9	0	8	
A4BP24	120.2	10.16	3.41	3.32	66.0	10.14	3.20	3.11	
	5	5	0	9	7	9	9	4	
A5BP25	117.2	10.16	3.37	3.31	58.1	10.17	3.22	3.16	
	7	5	6	2	9	4	0	3	
A5BP26	117.5	10.20	3.29	3.29	61.4	10.19	3.14	2.94	
	8	0	9	3	4	3	6	8	
A5BP27	121.4	10.20	3.34	3.29	71.3	10.20	2.99	2.91	
	9	7	5	6	0	0	2	8	
A5BP28	120.6	10.12	3.35	3.34	66.1	10.09	3.18	2.78	
	5	2	8	5	4	9	2	4	
A5BP29	121.8	10.20	3.39	3.34	77.6	10.19	3.10	2.87	
	1	2	3	3	7	8	3	5	
A5BP30	116.2	10.13	3.35	3.24	73.3	10.13	3.12	3.00	
	8	3	9	6	5	3	7	5	
A1MP1	120.9	10.18	3.37	3.37	68.4	10.17	3.22	3.03	
	5	2	6	3	0	4	1	1	
A1MP2	117.8	10.16	3.33	3.26	60.9	10.14	2.80	2.79	
	9	1	2	0	7	2	1	1	
A1MP3	112.7	10.13	3.24	3.22	56.9	10.10	3.03	2.84	
	2	9	5	9	5	9	4	9	
A1MP4	115.3	10.17	3.30	3.25	60.2	10.15	3.18	2.91	
	4	1	0	0	6	6	8	5	
A1MP5	114.4	10.13	3.30	3.24	64.2	10.13	3.20	3.12	Falla estructural (rajadura)
	4	4	0	2	4	2	5	1	
A1MP6	120.2	10.16	3.34	3.29	66.3	10.14	3.29	3.21	Falla estructural (rajadura)
	6	0	5	4	5	0	2	3	
A2MP7	113.7	10.17	3.25	3.25	64.6	10.14	3.12	2.84	
	8	3	9	2	1	7	1	9	
A2MP8	113.7	10.13	3.26	3.23	64.1	10.12	3.12	2.98	
	4	4	7	9	4	7	0	1	
A2MP9	118.5	10.19	3.35	3.26	63.8	10.18	3.14	2.96	
	7	5	0	4	5	6	2	6	
A2MP1 0	117.5	10.14	3.33	3.32	61.6	10.13	3.19	2.93	
	5	6	0	2	5	9	4	6	
A2MP1 1	121.4	10.25	3.34	3.30	74.5	10.22	3.21	3.03	
	6	3	3	5	4	2	3	7	
A2MP1 2	119.6	10.17	3.39	3.33	72.7	10.16	3.19	3.05	
	6	2	1	7	0	6	9	7	

A3MP1	120.9	10.14	3.42	3.27	67.4	10.08	3.10	2.89	
3	8	1	2	8	4	9	5	1	
A3MP1	116.6	10.08	3.36	3.27	59.0	10.05	3.20	2.77	
4	6	0	4	4	2	1	3	6	
A3MP1	118.3	10.10	3.39	3.27	65.4	10.09	3.18	3.01	
5	9	3	6	8	3	1	6	4	
A3MP1	118.5	10.05	3.40	3.33	59.5	10.05	3.13	2.90	
6	0	6	2	5	0	0	6	2	
A3MP1	120.2	10.12	3.39	3.32	64.9	10.11	3.19	2.97	
7	4	2	3	9	1	0	3	7	
A3MP1	117.4	10.09	3.36	3.35	61.2	10.08	3.30	2.95	Falla estructural (rajadura)
8	6	8	9	7	5	2	6	4	
A4MP1	121.0	10.10	3.33	3.32	67.5	10.10	3.35	3.21	Falla estructural (rajadura)
9	6	8	4	5	4	4	1	0	
A4MP2	119.7	10.06	3.38	3.37	68.1	10.04	3.22	3.12	Falla estructural (rajadura)
0	6	0	7	4	2	4	5	9	
A4MP2	119.1	10.14	3.39	3.35	61.4	10.13	3.13	2.87	
1	3	2	5	2	9	2	2	9	
A4MP2	111.5	10.16	3.23	3.21	64.1	10.16	3.12	2.89	
2	8	2	2	4	1	2	5	8	
A4MP2	117.7	10.14	3.36	3.26	62.9	10.13	3.20	2.96	
3	3	1	3	3	9	9	2	9	
A4MP2	119.7	10.20	3.32	3.24	63.6	10.20	3.08	3.01	
4	4	6	4	9	1	0	9	9	
A5MP2	120.9	10.13	3.37	3.27	72.0	10.13	3.29	3.23	Falla estructural (rajadura)
5	0	7	0	7	3	5	6	3	
A5MP2	118.4	10.25	3.31	3.29	66.8	10.20	3.17	2.90	
6	7	8	4	0	8	1	0	8	
A5MP2	122.6	10.07	3.36	3.33	66.2	10.06	3.24	3.06	Falla estructural (rajadura)
7	2	9	6	8	3	5	6	9	
A5MP2	115.7	10.15	3.35	3.33	62.8	10.14	3.27	3.00	
8	6	4	2	5	4	2	5	9	
A5MP2	116.4	10.13	3.35	3.26	61.4	10.11	3.19	2.88	
9	6	1	2	8	0	5	0	0	
A5MP3	120.1	10.17	3.37	3.36	65.1	10.17	3.16	2.92	
0	4	4	7	9	3	0	9	9	
A1AP1	111.5	10.16	3.34	3.13	60.8	10.14	3.02	2.89	
	3	0	7	0	6	1	6	2	
A1AP2	119.3	10.11	3.37	3.33	69.8	10.11	3.23	3.14	
	1	5	6	7	9	0	8	2	

A1AP3	116.8	10.15	3.32	3.30	66.1	10.14	3.14	3.14
	9	3	5	4	3	9	1	8
A1AP4	120.0	10.02	3.39	3.37	66.4	10.00	3.09	3.19
	6	1	0	9	9	4	2	4
A1AP5	116.3	10.18	3.31	3.29	65.7	10.15	3.11	3.01
	1	1	6	0	2	3	5	2
A1AP6	122.9	10.14	3.38	3.34	71.6	10.12	3.23	3.06
	9	6	4	6	4	8	6	0
A2AP7	119.6	10.03	3.32	3.30	68.0	10.02	3.15	3.12
	2	2	9	3	3	0	8	7
A2AP8	118.2	10.16	3.34	3.32	70.7	10.15	3.25	3.15
	6	8	4	8	7	8	0	3
A2AP9	117.6	10.11	3.36	3.32	66.6	10.08	3.12	3.09
	1	0	1	4	7	8	1	4
A2AP10	115.3	10.21	3.32	3.32	66.2	10.12	3.14	3.12
	9	8	5	1	0	6	9	5
A2AP11	119.7	10.06	3.38	3.30	68.9	10.04	3.14	3.14
	8	6	8	4	8	6	1	0
A2AP12	117.3	10.17	3.34	3.31	69.1	10.17	3.26	3.22
	1	8	0	4	9	2	6	1
A3AP13	113.9	10.19	3.39	3.24	71.1	10.17	3.16	3.13
	1	2	0	2	4	2	6	7
A3AP14	118.2	10.20	3.32	3.30	62.8	10.18	3.23	3.19
	8	7	6	4	3	1	2	9
A3AP15	111.5	10.11	3.25	3.24	62.9	10.10	3.21	3.19
	3	9	3	1	9	0	1	3
A3AP16	115.5	10.16	3.28	3.26	63.7	10.15	3.21	3.15
	8	6	8	7	0	6	7	4
A3AP17	119.9	10.13	3.34	3.31	66.3	10.11	3.17	3.04
	9	9	2	7	9	9		6
A3AP18	117.0	10.05	3.37	3.19	66.6	10.03	3.31	3.09
	0	7	9	3	5	1	5	1
A4AP19	115.7	10.12	3.32	3.24	65.5	10.07	3.17	2.99
	9	2	8	8	0	8	3	8
A4AP20	122.6	10.09	3.37	3.32	75.9	10.07	3.21	3.21
	8	9	0	9	7	6	4	1
A4AP21	120.6	10.12	3.41	3.32	74.2	10.10	3.27	3.17
		2	3	0	0	7	1	8
A4AP22	119.0	10.10	3.38	3.29	66.2	10.08	3.07	2.98
	5	8	4	2	4	7	5	0
A4AP23	118.2	10.09	3.37	3.39	67.6	10.07	3.19	3.09
	8	6	3	1	6	9	7	2
A4AP24	116.4	10.09	3.26	3.22	65.2	10.07	3.04	3.03
		8	8	7	3	9	4	4
A5AP25	116.1	10.15	3.32	3.28	65.4	10.12	3.05	3.05
	9	2	5	4	0	5	8	4

A5AP26	118.8	10.17	3.35	3.31	66.9	10.08	3.14	3.14
	2	4	6	5	1	5	6	0
A5AP27	122.5	10.17	3.34	3.33	76.8	10.11	3.30	3.21
	9	2	1	9	7	3	5	1
A5AP28	115.0	10.11	3.35	3.27	64.3	10.11	3.17	3.01
	0	7	5	6	6	5	8	3
A5AP29	116.5	10.11	3.29	3.29	69.8	10.11	3.21	3.13
	1	4	7	3	9	2	4	6
A5AP30	111.3	10.17	3.25	3.19	67.4	10.15	3.12	3.06
	4	2	8	0	7	5	6	6

Anexo 3. Formato características dendrométricas y ubicación geográfica de los rebrotes de *Eucalyptus globulus* Labill. seleccionados.

N° rebrote	DAP (cm)	HT (m)	Volumen (m³)	Este (UTM 17 S)	Norte (UTM 17 S)
1	15.87	9.5	0.095	797436	9216483
2	16.94	10.0	0.108	797501	9216476
3	17.85	10.6	0.123	797507	9216453
4	18.18	11.0	0.136	797471	9216477
5	19.41	11.2	0.145	797555	9216471