

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**“DETERMINACIÓN DE PROGRAMAS DE SECADO Y
CODIFICACIÓN DE HIGRÓMETROS PARA ESPECIES
REFORESTADAS DE *GUAZUMA CRINITA* Y *SIMAROUBA AMARA*”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL**

JAVIER LUIS AHRENS CASTILLO

LIMA – PERÚ

2021

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**“DETERMINACIÓN DE PROGRAMAS DE SECADO Y
CODIFICACIÓN DE HIGRÓMETROS PARA ESPECIES
REFORESTADAS DE *GUAZUMA CRINITA* Y *SIMAROUBA AMARA*”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL**

JAVIER LUIS AHRENS CASTILLO

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Ing. Milciades Leónidas Miguel Castro, Mg.Sc
Presidente

Ing. Martin Araujo Flores
Miembro

Ing. Aldo Joao Cardenas Oscanoa, Mg.Sc
Miembro

Ing. Florencio Teodoro Trujillo Cuellar, Mg.Sc
Asesor

DEDICATORIA

A mi familia, por brindarme siempre todo su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al CITEmadera, por el apoyo para el desarrollo de este trabajo. Igualmente, al Dr. Florencio Trujillo por todas las orientaciones vertidas durante el asesoramiento de este trabajo.

CONTENIDO

PRESENTACIÓN

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I: ASPECTOS GENERALES	2
1.1 Descripción de la empresa.....	2
1.1.1 Ubicación.	2
1.1.2 Actividad.	2
1.1.3 Misión y Visión de la empresa.	2
1.1.4 Organización.	3
1.2 Descripción general de experiencia.....	3
1.2.1 Actividad profesional desempeñada.....	3
1.2.2 Propósito del puesto.	4
1.2.3 Nombre original del producto o estudio.....	4
1.2.4 Resultados concretos logrados.	4
Capítulo II: SECADO DE LA MADERA	5
2.1 Contribución en la solución de situaciones problemáticas presentados durante su estancia en la empresa o institución	5
2.1.1 Definición de secado de la madera.....	5
2.1.2 Secado convencional de madera	6
2.1.3 Importancia del secado de madera	6
2.1.4 Propiedades físicas de la madera.....	9
2.1.5 Contenido de humedad (codificación de higrómetros)	9
2.2 Descripción de metodología.....	10
2.2.1 Propiedades físicas de la madera.....	10
2.2.2 Punto de saturación de las fibras (PSF).....	10
2.2.3 Codificación de higrómetros.	11
2.2.4 Determinación de programas de secado.....	12
Capítulo III: RESULTADOS	17
3.1 Determinación de las propiedades físicas	17
3.1.1 Densidad.....	17
3.1.2 Contracción.	19

3.2 Determinación del punto de saturación de las fibras (PSF).	21
3.3 Codificación de higrómetros	22
3.5 Determinación de programas de secado.	25
3.5.1 Secado de cargas de madera.....	25
3.5.2 Calificación y evaluación de la calidad del secado.	28
3.5.3 Programas de secado obtenidos.....	31
CONCLUSIONES	37
RECOMENDACIONES	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
ANEXOS.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de cargas por especie para secado experimental.	14
Tabla 2. Calificación de la Calidad (C) Según los Valores del Índice de Calidad calculados. 15	
Tabla 3. Densidades de la madera de “Bolaina blanca” y “Marupa” de bosque natural y plantación	18
Tabla 4. Resultados de ensayos de Contracción de las maderas “Bolaina blanca” y “Marupa”.	19
Tabla 5. Punto de saturación de la fibra determinado para “Bolaina Blanca” y “Marupa”	21
Tabla 6. Códigos determinados por higrómetro y por especie para la medición apropiada de la humedad de la madera.	24
Tabla 7. Información general de las cargas de madera ensayadas en el horno de 20 pt.	29
Tabla 8. Información general de las cargas de madera ensayadas en el horno de 500 pt.	30
Tabla 9. Programa de secado obtenido para la madera de “Bolaina blanca” de 1” de espesor proveniente de plantaciones.	31
Tabla 10. Programa de secado obtenido para la madera de “Bolaina blanca” de 1” de espesor proveniente de bosque natural.	32
Tabla 11. Programa de secado obtenido para la madera de “Bolaina blanca” de 2” de espesor proveniente de plantaciones.	33
Tabla 12. Programa de secado obtenido para la madera de “Bolaina blanca” de 2” de espesor proveniente de bosque natural.	34
Tabla 13. Programa de secado obtenido para la madera de “Marupa” de 1” de espesor proveniente de bosque natural.	35
Tabla 14. Programa de secado obtenido para la madera de “Marupa” de 2” de espesor proveniente de bosque natural.	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Organigrama de la institución.....	3
Figura 2: Cámara para determinación del PSF.....	11
Figura 3: Láminas de madera de Bolaina blanca para ensayo de PSF.	11
Figura 4: Pintado de testas de una carga de madera de 1” previo al ingreso al horno experimental.....	13
Figura 5: Prueba del tenedor.	16
Figura 6: Densidades de la madera de “Bolaina blanca” y “Marupa”.	17
Figura 7: Contracción de la madera de “Bolaina blanca” y “Marupa” de bosque natural y plantación.	20
Figura 8: Punto de Saturación de Fibra de la madera de “Bolaina blanca” y “Marupa” de bosque natural y plantación.	22
Figura 9: Medición del contenido de humedad de una probeta utilizando un higrómetro de clavos o pines.	23
Figura 10: Probetas utilizadas para la determinación de códigos de higrómetros	24
Figura 11: Carga de madera de 1” apilada para prueba en horno de 20 pt.	26
Figura 12: Carga de madera de Bolaina de 1” en horno experimental de 500 pt.....	27
Figura 13: Carga de madera de Marupa de 1” en horno de 5 000 pt.	27

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Resultados de ensayo de codificación de higrómetros para la madera de “Bolaina blanca” y “Marupa” de plantación y bosque natural.....	42
ANEXO 2: Características técnicas de higrómetros de contacto y clavos utilizados en el estudio	53
ANEXO 3: Formato de evaluación previa y posterior al secado experimental	55
ANEXO 4: Ficha técnica de hornos de secado utilizados en la determinación de programas	56
ANEXO 5: Clasificación de la madera según densidad básica y contracción volumétrica.....	58

RESUMEN

Contenido: El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar una metodología para el secado experimental de maderas de Bolaina Blanca (*Guazuma crinita*) y Marupa (*Simarouba amara*), establecer programas de secado para ambas especies de madera y la codificación para seis modelos de higrómetros para la medición de humedad de las especies mencionadas. El desarrollo del trabajo se hizo de acuerdo con una metodología planteada, la cual incluyó la determinación de las propiedades físicas como densidad, contracción y punto de saturación de las fibras; luego se realizó la codificación de higrómetros para la selección del código idóneo según el modelo y marca de equipo utilizado, y finalmente se realizó la determinación de los programas de secado en espesores de 1 y 2 pulgadas. Como resultado, se determinaron las propiedades físicas mencionadas, obteniendo valores de densidad y contracción considerados como bajos, y se logró determinar el punto de saturación de las fibras de ambas especies. Se seleccionaron códigos de higrómetros en seis modelos de equipos y se establecieron programas de secado para ambas especies. Finalmente, se concluye que la metodología propuesta puede ser utilizada para establecer programas de secado, así como la determinación de las propiedades físicas relacionadas al proceso.

Palabras claves: Secado / Propiedades físicas / Madera / Perú / Higrómetro.

Descripción: Trabajo de suficiencia profesional en secado de la madera perteneciente a la sección de Preservación y Secado.

El autor presenta el trabajo de suficiencia profesional acerca de la determinación de programas de secado y códigos de higrómetros de maderas de dos especies, entre los años 2017 - 2019.

ABSTRACT

Content: The aim of the present work was to develop a methodology for the experimental drying of Bolaina Blanca (*Guazuma crinita*) and Marupa (*Simarouba amara*), establish wood drying programs for both species and determine the appropriate codes for six models of moisture meters. The present work was carried out according to a proposed methodology, which included the determination of physical properties such as density, shrinkage and fiber saturation point; also the selection of the ideal hygrometer code for moisture meters according to the model and brand used, and finally the determination of the drying programs for 1 and 2 inches wood. As a result, the aforementioned physical properties were determined, obtaining density and contraction values considered as low, as well as the determination of fiber saturation point of both species. Also, hygrometer codes were selected for six models of equipment and the drying programs were established for both species. Finally, it is concluded that the proposed methodology can be used to establish wood drying programs, as well as the determination of the physical properties related and the establishment of drying programs to the process.

Keywords: wood drying, properties, hygrometer, drying programs.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo se elaboró con base en las funciones desempeñadas como Analista de Laboratorio Químico y de Acabados de la Madera para el Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera – CITEMadera, las cuales incluyeron lo siguiente:

- Realizar ensayos en acabados en productos de madera y derivados.
- Realizar ensayos en propiedades físicas y mecánicas, así como la ejecución de servicios de secado de madera.
- Realizar los ensayos correspondientes a investigaciones propuestas por el área de laboratorio.
- Registro de datos de ensayos realizados en los formatos correspondientes

Dentro de las actividades mencionadas, se aplicaron conocimientos adquiridos en las áreas de propiedades físicas, secado y transformación mecánica de la madera, los cuales se desarrollaron de la siguiente manera:

- Propiedades físicas: En la investigación planteada se determinaron las propiedades físicas de la madera (contracción, densidad y punto de saturación de la fibra) con la finalidad conocer el comportamiento de las especies objeto de estudio como paso previo a realizar el secado de la madera.
- Determinación del contenido de humedad: Existe una diversa variedad de productos para la medición del contenido de humedad. En este caso se realizó la determinación del contenido de humedad de la madera como parte de la codificación de tres higrómetros de contacto de marca Wagner, Proscan y Nigos, y tres de clavos de marca Gann, Nigos y CET; para determinar el código más adecuado para la medición de la humedad de la madera de Bolaina y Marupa.
- Secado de la madera: Se realizó el secado de la madera de las especies *Guazuma crinita* (Bolaina) y *Simarouba amara* (Marupa) mediante cargas sucesivas y en hornos de distintas capacidades para determinar la idoneidad de un programa de secado que permita cumplir con las especificaciones mínimas requeridas por el usuario.

INTRODUCCIÓN

La cadena de transformación de la madera requiere mejorar la calidad de productos maderables proveniente tanto de bosque natural como de plantaciones, a través de un proceso de secado artificial que permita que el producto final cumpla con las especificaciones y requerimientos de uso.

Es así que la determinación de los programas de secado para la madera toma especial importancia para la industria, de manera que permita asegurar su estabilidad, funcionalidad y durabilidad durante el procesamiento y en el producto final.

Las actividades desarrolladas en el presente trabajo contribuyeron de forma directa a mejorar la técnica de secado de madera de bosque natural y plantación para mejorar la calidad de estas, así como darles valor a especies nativas de rápido crecimiento, lo que permitirá en el futuro obtener productos de mayor valor agregado al actual.

Así mismo, la selección de códigos de higrómetro idóneos para medición de la humedad, como paso previo a la evaluación de secado en sí, permitirá verificar la humedad de la madera con precisión adecuada de acuerdo a la especie y al uso correcto de los equipos de medición de acuerdo a la especie de madera a trabajar.

Finalmente, los objetivos del trabajo fueron desarrollar una metodología para el secado experimental de maderas tanto de bosque natural como de plantación de Bolaina Blanca (*Guazuma crinita*) y Marupa (*Simarouba amara*), establecer programas de secado para ambas especies de madera y seleccionar los códigos de higrómetros más adecuados para seis modelos de equipos para la medición de humedad de las especies mencionadas.

Capítulo I: ASPECTOS GENERALES

1.1 Descripción de la empresa

El Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera (CITEmadera) es una institución creada en el año 2000 por el Ministerio de la Producción y desde el año 2013 forma parte de la red CITE del Instituto Tecnológico de la Producción, la cual busca el cumplimiento de las metas de la política productiva impulsada por el Ministerio de la Producción; la cual consiste en atender a los productores con un enfoque de la demanda y dándoles soluciones concretas a cada una de sus necesidades.

1.1.1 Ubicación. CITEmadera Lima se encuentra ubicado en Jirón Solidaridad cuadra 3. Parcela II Mz. F,Lt 11-A Parque Industrial de Villa El Salvador.

1.1.2 Actividad. CITEmadera tiene como objetivo el promover la innovación y mejorar la calidad en las diferentes etapas de transformación e industrialización de la madera y productos afines en el sector madera y muebles, y cuenta con las siguientes áreas:

- Asistencia técnica
- Capacitación
- Soporte productivo
- Certificación de competencias laborales
- Ensayos de laboratorio
- Información tecnológica

1.1.3 Misión y Visión de la empresa.

Misión: “Promover la innovación en la cadena productiva madera - muebles con el impulso de servicios tecnológicos especializados y con un equipo de trabajo competente, creativo y motivado con lograr la confianza y satisfacción de los clientes”. **Visión:** “Ser el ente rector referente a la innovación de la cadena madera - muebles, acorde con la demanda nacional e

internacional del sector, con clientes competentes, competitivos y satisfechos con los servicios prestados que atienden a sus diferentes necesidades”.

1.1.4 Organización.

El CITEmadera busca promover el desarrollo de las empresas de transformación de la madera con el propósito de contribuir al incremento de su competitividad y productividad en el mercado, con el respaldo del conocimiento y competencias para la innovación tecnológica de sus departamentos estructurados en niveles jerárquicos (Figura 1).

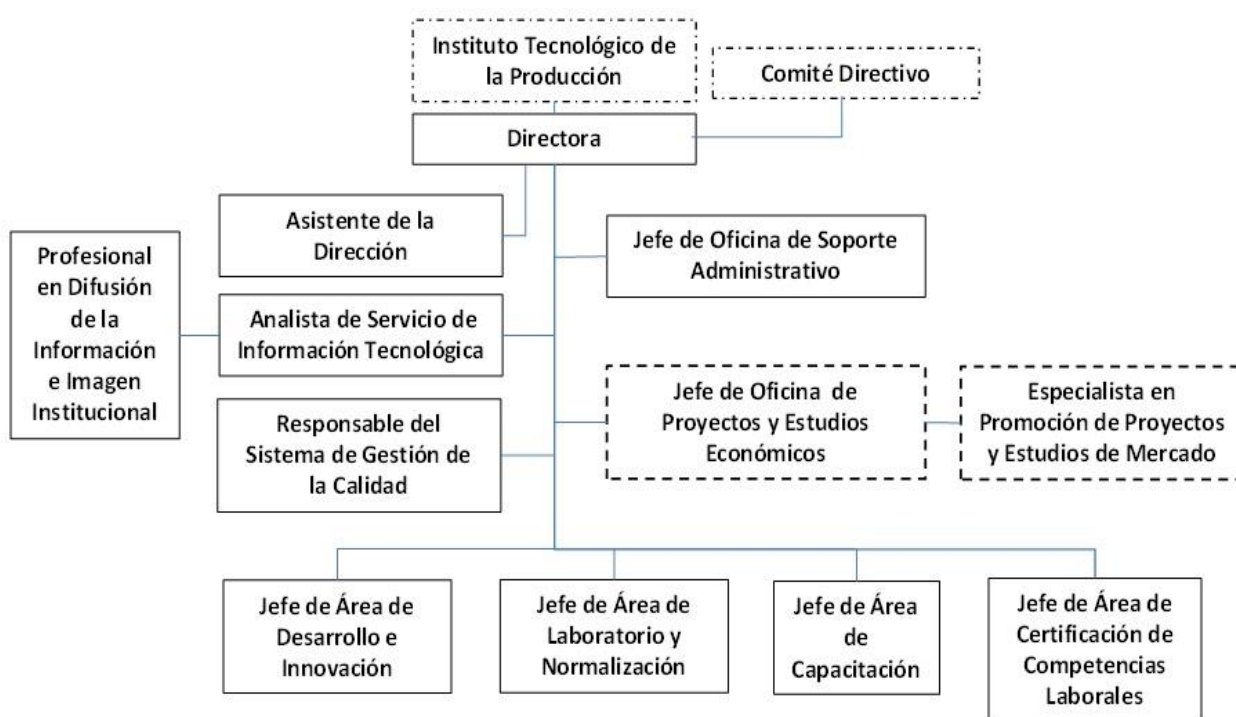


Figura 1: Organigrama de la institución.

Fuente: CITEmadera

1.2 Descripción general de experiencia

1.2.1 Actividad profesional desempeñada. Las funciones desempeñadas en el Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera – CITEmadera para la realización del presente trabajo incluyeron las actividades de determinación de propiedades físicas de la madera, medición del contenido de humedad mediante el uso de higrómetros de

contacto y clavos, y el proceso de secado de madera de las especies Bolaina Blanca (*Guazuma crinita*) y Marupa (*Simaoruba amara*)

1.2.2 Propósito del puesto. El propósito del puesto para el presente trabajo consistió en establecer programas de secado para la madera de Bolaina Blanca (*Guazuma crinita*) y Marupa (*Simarouba amara*)

1.2.3 Nombre original del producto o estudio. Determinación de programas de secado y codificación de higrómetros para *Guazuma crinita* (Bolaina blanca) y *Simaoruba amara* (Marupa)”

1.2.4 Resultados concretos logrados. A través de las actividades desarrolladas se logró determinar las propiedades físicas de las maderas de “Bolaina Blanca” y “Marupa”, permitiendo predecir su comportamiento ante el secado, también se determinaron los códigos de seis medidores de humedad, tres de contacto de marca Wagner, Proscan y Nigos, y tres de clavos de marca Gann, Nigos y CET, para una mayor precisión en la medición del contenido de humedad de las maderas de “Bolaina Blanca” y “Marupa”. Finalmente se determinaron los programas de secado modelo para las especies seleccionadas.

A partir de la investigación desarrollada, el CITEmadera pudo obtener información tecnológica sobre las especies en estudio, así como programas de secado y códigos de higrómetro para seis equipos de medición de humedad para las especies propuestas. Además, el desarrollo de la metodología planteada permitirá realizar otras investigaciones relacionadas y desarrollar programas de secado para obtener materia prima y desarrollar productos de calidad y de esta manera darle un mayor valor agregado, para que así el sector productivo pueda utilizar la información generada y replicar lo realizado de manera que se pueda ampliar su alcance.

Capítulo II: SECADO DE LA MADERA

2.1 Contribución en la solución de situaciones problemáticas presentados durante su estancia en la empresa o institución

Cada madera presenta características y propiedades particulares, y por lo tanto diferentes condiciones de secado; si bien en la industria existen diversas empresas que brindan servicios de secado, incluyendo al CITEMadera, es importante trabajar con un programa que permita secar la madera en el menor tiempo posible y con la menor cantidad de defectos, lo cual también se ve reflejado en una reducción de costos de energía, reprocesos y mayor disponibilidad de cámara de secado para brindar servicios adicionales.

Es así que para el desarrollo de la metodología y las actividades propuestas que incluía la determinación de las propiedades físicas, la codificación de higrómetros y la determinación de programas de secado, la contribución en la ejecución de las actividades mencionadas y la determinación de los parámetros de secado utilizados, así como el ajuste de variables como la temperatura y humedad relativa, cuyo incremento permitió reducir los tiempos de secado, permitió no solo la obtención de los programas para las especies *Guazuma crinita* (Bolaina blanca) y *Simaoruba amara* (Marupa), sino podrá ser utilizado para proponer programas de otras especies tanto para uso a nivel comercial como para investigación y que se vea reflejado en un proceso más eficiente.

2.1.1 Definición de secado de la madera

El secado de la madera se refiere a la eliminación del agua de la madera antes de su uso final y consiste en un complejo sistema de intrincados procesos físicos y mecánicos. Para la industria, el resultado deseado es secar la madera en el menor tiempo posible, minimizando costos y maximizando la calidad. Sin embargo, debido a la complejidad del secado de la madera, estos tres objetivos no son independientes; están relacionados y deben ser equilibrados para optimizar el proceso de secado. El tiempo de secado suele estar limitado por el nivel deseado de calidad seca aceptable (Redman *et al*, 2016, p.1).

2.1.2 Secado convencional de madera

El secado de madera por convección es uno de los más importantes pasos en la fabricación de productos de madera porque mejora las propiedades mecánicas y tecnológicas de la madera. También asegura la protección de la madera contra el ataque de insectos y hongos. (Sova *et al*, 2016, p.1).

El mismo autor menciona que “la rapidez con la que la madera alcanza el contenido de humedad deseado depende de la agresividad del secado, el programa y diseño del horno”(p.1)

Por otro lado, “un programa de secado consta de tres parámetros, a saber, temperatura, humedad relativa y velocidad del aire. El papel de la temperatura es estimular la evaporación del agua de la madera. Su valor se elige en función de la especie y el contenido de humedad de la madera para evitar el estrés durante el secado. La humedad relativa es otro parámetro clave del proceso de secado por convección. Esto se debe al hecho que una humedad relativa demasiado baja conduce a un alto grado de estrés dentro de la madera, que tiene como resultado una mala calidad de la madera seca. Por otro lado, una humedad relativa demasiado alta aumenta el tiempo de secado de la madera. Sin embargo, una humedad relativa demasiado alta podría promover el crecimiento de moho y / o decoloraciones, p. ej. mancha azul. El papel de la velocidad del aire es la más importante hasta que el contenido de humedad de la madera disminuye por debajo del punto de saturación del fibra (FSP), que es aproximadamente el 30% para la mayoría de las especies” (Pérre y Olek, 2007, p.12).

El secado al horno implica la transferencia de la humedad dentro de la madera y la evaporación de sus superficies expuestas, y es crucial mantener estos dos procesos en equilibrio para mantener la velocidad de secado más rápida posible. (Keey *et al*, 2000, p.221)

2.1.3 Importancia del secado de madera

Otros autores como Denig *et al* (2000) mencionan la importancia del secado de la madera para mejorar las propiedades de la misma:

La razón fundamental para secar la madera es mejorar las propiedades de la madera y, por lo tanto, hacer que la madera sea más valiosa. En resumen, el objetivo principal al secar madera dura es producir un producto útil, minimizando cualquier pérdida de calidad, conservando así los recursos naturales y al mismo tiempo obteniendo ganancias. Dicho de otra manera, el secado de maderas duras debería ser un proceso rentable, orientado a la conservación (Denig *et al*, 2000, p.1).

Minea (2019, p.78) menciona las siguientes ventajas de la madera seca sobre la madera verde sin secar:

- Previene la degradación de la madera tras la tala y la esteriliza para la exportación.
- La madera seca es más liviana y se reducen los costos de manipulación, almacenamiento y transporte.
- Los trabajos de madera seca, las máquinas, los acabados y los pegamentos son mejores que en la madera verde.
- Aumenta la resistencia de la madera haciéndola más compatible con las condiciones normales de servicio como material de construcción y, con un contenido de humedad inferior al 20%, la madera es inmune a los microorganismos (como insectos) y a los ataques de hongos, así como a su posterior contracción, hinchamiento, deformaciones y grietas.
- Mejora el soporte mecánico y estructural de edificios y objetos como muebles y ebanistería porque la madera seca es más fuerte que la madera verde.
- Mejora la estabilidad dimensional de las tablas de madera para diversos procesos de acabado, como el pulido y la pintura, mientras que las pinturas duran más en madera seca.
- Mejora las propiedades de aislamiento eléctrico y térmico de la madera.

De la misma manera, el secado está relacionado con otras actividades dentro de la cadena de transformación de la madera, por lo que es importante que se realice de manera adecuada, lo cual permitirá también no solo mejorar la calidad del producto final sino también reducir costos, como a continuación menciona Zanuncio (2017) respecto a otras actividades como es el transporte:

El transporte forestal representa unos de los costos más altos de la madera. (Machado; Lopes, 2000; Alves *et al.*, 2013). Los vehículos para dicho transporte tienen capacidad de carga por masa. Por lo tanto, transportar madera con alta humedad aumenta los costos de esta operación (Tahvanainen; Anttila, 2011). Esto se debe a la gran cantidad de agua en la madera, además de aumentar el número de viajes para satisfacer la demanda de la planta de celulosa. (Zanuncio *et al.*, 2017).

Se menciona también que el secado de la madera es muy importante para la industria ya que permite mejorar la calidad del producto final, y así permitir darle un valor agregado:

La razón fundamental para secar la madera es mejorar las propiedades de la madera y, por lo tanto, hacer que la madera sea más valiosa. En resumen, el objetivo principal al secar madera dura es producir un producto útil, minimizando cualquier pérdida de calidad, conservando así los recursos naturales y al mismo tiempo obteniendo ganancias. Dicho de otra manera, el secado de maderas duras debería ser un proceso rentable, orientado a la conservación. (Denig *et al.*, 2000, p.1)

Otros autores mencionan el efecto que puede tener la humedad que se encuentra debajo del revestimiento y que puede causar defectos en el acabado:

El movimiento dimensional también contribuye de manera importante a la falla del recubrimiento en la exposición exterior, ya que impone una tensión sobre el recubrimiento. La humedad atrapada debajo de un revestimiento puede causar ampollas. Otra consecuencia relacionada con la absorción de agua es el posible crecimiento o descomposición de mohos. Este fenómeno puede producirse cuando la humedad supera valores en torno al 20%. (Bulian y Greystone, 2009, p.185)

La presencia de exceso de humedad afecta también las reacciones del producto utilizado en para el acabado, lo cual afectará al producto final:

Se afirma que, en algunos casos, la presencia de exceso de humedad en la madera crea una capa de defectos en poliéster, poliuretano y algunos otros barnices de curado por reacción. También se afirma que, especialmente en aplicaciones de barniz de poliuretano curado por

formación de alófonos, el alto contenido de humedad inhibe la secado y reacción de barniz (Sonmez, 2009, p.2).

2.1.4 Propiedades físicas de la madera

La determinación de las propiedades físicas es de gran importancia para el estudio de la madera previa al desarrollo del secado, como mencionan Shmulsky y Jones (2019), están relacionadas con muchas de las propiedades tanto físicas como mecánicas de la madera: “La densidad de la madera es su propiedad física más importante. La mayoría de las propiedades mecánicas y físicas de la madera están estrechamente relacionadas con la gravedad específica y la densidad” (p.185).

Así mismo, es importante mencionar también la importancia del contenido de humedad en la madera, ya que esta puede afectar las propiedades y la estabilidad dimensional de la misma:

Las propiedades físicas y mecánicas, la resistencia al deterioro biológico y la estabilidad dimensional de cualquier producto a base de madera se ven afectadas por la cantidad de agua presente. Dado que casi todas las propiedades de la madera y los productos de madera se ven afectadas por el agua, es importante comprender la naturaleza del agua en la madera y cómo se asocia con la microestructura y las propiedades de la madera (Shmulsky y Jones, 2019, p.188).

2.1.5 Contenido de humedad (codificación de higrómetros)

Es importante conocer el contenido de humedad de la madera durante el proceso de secado y al final del mismo de una manera rápida y confiable. El contenido de humedad afecta a la mayoría de las propiedades de la madera, y puede variar ampliamente dependiendo del medio ambiente y la procedencia de la madera. El uso eficaz de madera y materiales con base en madera, por lo tanto, requiere métodos de medición de humedad eficientes y fiables, así como el uso adecuado de equipos de medición como higrómetros de contacto y pines, los cuales cuentan con códigos de uso según la madera que será evaluada, y de ahí la importancia de seleccionar el código más adecuado para la especie.

El buen uso de higrómetros para la medición de humedad, junto con la combinación de tecnología para el seguimiento del proceso de secado puede ser de gran utilidad para proporcionar información en la que basar las decisiones de producción y transformación de la madera. Como mencionan Shmulsky y Jones (2019), existen gran variedad de equipos y que pueden ser utilizados para distintas aplicaciones:

Hay una variedad de medidores eléctricos disponibles para medir el contenido de humedad de madera, virutas, partículas y otros productos. Aunque los medidores son generalmente menos precisos que el método de secado al horno, su lectura instantánea, su facilidad de uso y su naturaleza no destructiva los hacen muy adecuados para muchas aplicaciones. (p.225)

2.2 Descripción de metodología

La metodología aplicada para llevar a cabo las actividades planteadas fue la siguiente:

2.2.1 Propiedades físicas de la madera. Se determinaron las propiedades físicas de la madera con la finalidad de conocer el comportamiento de las especies objeto de estudio ante los procesos relacionados al secado. Las propiedades físicas determinadas fueron Densidad (Seca al aire, saturada, seca a estufa y básica), Contracción (Tangencial, radial y longitudinal) y Punto de Saturación de Fibras (PSF), y que fueron determinadas de acuerdo a lo indicado en la NTP 251.010, NTP 251.011 y NTP 251.012 para el contenido de humedad, densidad y contracción respectivamente.

2.2.2 Punto de saturación de las fibras (PSF). Con la madera de ambas especies se determinó el PSF bajo ensayos de laboratorio sobre probetas de madera sin defectos y correctamente orientadas. Siendo el PSF una parte importante en el secado puesto que determina el contenido de humedad en que la madera ha perdido el total de agua libre y desde el cual el proceso de secado debe variar.

Se determinó el PSF en una cámara húmeda que alcance una humedad relativa constante cercana al 100% (Figura 2), lo cual fue verificado con una sonda para medición de humedad, y donde se colocaron láminas de dimensiones 1 mm x 30 mm x 50 mm de las maderas objeto de estudio (Figura 3). A continuación, se pesaron las láminas periódicamente en una balanza analítica de 0,001 g de precisión hasta que alcancen peso constante, luego se estufaron a 103 +/- 2 °C hasta que alcancen peso constante nuevamente.



Figura 2: Cámara para determinación del PSF.

Figura 1. Cámara para determinación del PSF.



Figura 3: Láminas de madera de Bolaina blanca para ensayo de PSF.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.3 Codificación de higrómetros. Esta determinación se realizó como paso previo a la evaluación de secado en sí, lo cual se realizó a través de la comparación de los valores de humedad promedio obtenidos utilizando diferentes códigos de higrómetro con respecto al valor de humedad promedio obtenido con el método gravimétrico, considerándose este último como el valor de referencia.

Ello permitió verificar la humedad de la madera con precisión, siendo los códigos determinados para tres modelos de higrómetros de contacto de marca Wagner, Proscan y Nigos, y tres tipos de higrómetros de clavos de marca Gann, Nigos y CET, requiriéndose para ambas especies un total 600 probetas que se obtuvieron de la madera trabajada

anteriormente. La codificación de higrómetros se realizó de acuerdo con la secuencia mostrada a continuación:

- a) Medición de la humedad de las probetas con diferentes códigos de higrómetros.
- b) Determinación de la humedad de las muestras con el método gravimétrico según norma técnica NTP 251.010.
- c) Determinación y selección del código para cada especie.

2.2.4 Determinación de programas de secado. El objetivo fue determinar el programa de secado optimizado por especie y espesor, y consistió en secar tres cargas sucesivas, ajustando las variables del proceso de secado después de cada carga en función a los defectos que se observaron en la madera luego del mismo, con la finalidad de obtener madera seca en el menor tiempo y con la menor merma posible.

2.2.4.1 Cubicación y evaluación de la madera previa al secado experimental. Previo al secado, todas las tablas utilizadas, tanto de 1" como de 2" fueron codificadas, cubicadas y medidas en su contenido de humedad, para luego evaluar los defectos de estructura que presentaban como grietas y rajaduras tomando como referencia la NTP 251.101, la presencia de otros defectos como hongos y cualquier observación adicional que pudieran presentar. Todos estos defectos fueron clasificados y ponderados de manera visual como leve (1), moderado (2) y severo (3), para lo cual se utilizó un formato de evaluación, el cual se presenta en el Anexo 3.

2.2.4.2 Apilado y pintado de la madera.

El apilado se realizó utilizando separadores de madera seca de 1,5 cm x 2,0 cm x 100 cm. Cada carga se armó sobre tacos de madera de sección 2" x 4", teniendo como dimensiones finales 2,5 m de largo, 1 m de profundidad y 1 m de altura, incluyendo los tacos. Una vez apilada la madera, se pintaron todas las cabezas de las piezas con pintura látex mezclada con cola en ambos extremos de la pila, con el fin de protegerla de los agrietamientos que puedan producirse por la pérdida de humedad, tal como se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Pintado de testas de una carga de madera de 1” previo al ingreso al horno experimental.

Fuente: Elaboración propia.

Posterior al apilamiento, se colocaron cuatro sondas o sensores de humedad en diferentes tablas con el fin de hacer un monitoreo de la humedad de la madera durante el proceso de secado. También se preparó una muestra de control de 30 cm. de longitud y dos probetas de madera de 2,5 cm x 2,5 cm x 20 cm para el monitoreo de la humedad bajo el método gravimétrico, las cuales se obtuvieron de una de las piezas de la carga.

Antes de que la carga ingrese al horno, se colocaron sobre la misma, bloques de cemento, para reducir los defectos de forma que pudiesen producirse durante el proceso de secado

2.2.4.3 Secado de cargas de madera

Primero se realizaron pruebas de secado en hornos de laboratorio de 20 pt donde se obtuvo una primera aproximación a los programas de secado para las especies y espesores objeto de estudio.

Luego de realizadas estas pruebas y una vez verificado el índice de calidad, se determinaron los programas de secado para las especies y espesores objeto de estudio a utilizar en horno de 500 pt.

Finalmente, para la validación del programa de secado obtenido se realizó el secado a nivel industrial de 5 000 pt en un horno convencional para verificar los programas obtenidos. El número de cargas realizadas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Número de cargas por especie para secado experimental.

Especie	Procedencia	Espesor	Número de cargas
Bolaina	Bosque natural	1"	3
	Bosque natural	2"	3
	Plantación	1"	3
	Plantación	2"	3
Marupa	Bosque natural	1"	3
	Bosque natural	2"	3
	Plantación	1"	3
	Plantación	2"	3

2.2.4.4 Cubicación y evaluación de la madera posterior al secado experimental. En la inspección posterior al secado se cubicó nuevamente la madera para hacer un comparativo con relación a la cubicación inicial (contracción) a fin de tener una idea de la disminución del volumen después del secado. También se midió la humedad final de cada pieza de madera y se anotaron los defectos de forma y estructura de la misma manera que en la evaluación previa al secado experimental para lo cual se utilizó nuevamente el formato de evaluación (Anexo 3).

2.2.4.5 Calificación y evaluación de la calidad del secado. Con los datos obtenidos, tanto de la evaluación previa como de la posterior al secado experimental, se determinó el Índice de Calidad (I) de la carga para los defectos de forma y para los de estructura por separado, de acuerdo con lo planteado por Pérez et al (2007), mediante la siguiente fórmula:

$$I = \frac{(Na \times 0) + (Nb \times 0.5) + (Nc \times 2) + (Nd \times 2.5)}{M}$$

Donde:

I = Índice de Calidad,

Na = N° de piezas sin defectos

Nb = N° de piezas con defecto leve,

Nc = N° de piezas con defecto moderado,

Nd = N° de piezas con defecto severo,

M = N° de piezas totales de la carga,

Para la clasificación de los defectos se tomó como referencia la NTP 251.101 y se consideró como defecto leve a las grietas y rajaduras menores a 10 cm, moderado entre 10 cm y 20 cm, y severo mayores a 20 cm.

De acuerdo con el índice de calidad obtenido, se realizó la Calificación de la Calidad (C), tal como se indica en la Tabla 2, para cada lote de madera seca.

Tabla 2. Calificación de la Calidad (C) Según los Valores del Índice de Calidad calculados

Índice de Calidad	Atributo	Calificación de la Calidad (C)
<0.1	Excelente	Adecuada
0.1 – 0.5	Muy Bueno	
0.51 – 1.0	Bueno	
1.1 – 1.5	Satisfactorio	Poco Adecuada
1.51 – 2.0	Regular	
2.1 – 3.0	Defectuoso	Inadecuada
3.1 – 5.0	Malo	
>5.0	Muy Malo	

Fuente: Pérez *et al* (2007),

Se estableció que el programa de secado era satisfactorio para una carga sólo si el atributo determinado posterior al secado no disminuyó más de dos niveles con respecto al atributo determinado antes del secado, tanto para los defectos de forma como de estructura. En este caso, para la siguiente carga experimental a ensayar se pudieron realizar algunos ajustes en el programa con la finalidad de conducirlo con mayor severidad y por lo tanto reducir el tiempo de secado. Caso contrario, se consideró que el programa de secado fue demasiado exigente y generó defectos considerables, debiendo realizarse algunos ajustes en la siguiente carga experimental para conducirlo con mayor suavidad.

2.2.4.6 Verificación de las tensiones secado. En cada lote de secado y luego de la fase de acondicionamiento final, se realizó la prueba del tenedor en dos tablas tomadas al azar, con el fin de detectar las tensiones de secado de la madera, y la cual consistió en cortar una sección de una tabla que está siendo sometida a secado en la etapa de acondicionamiento final. Esta sección se cortó por lo menos a unos 60 cm del extremo de la tabla y debía tener por lo menos 2,5 cm de ancho en la dirección del grano, debiendo ranurarse de forma que tome el perfil de un “tenedor”, de acuerdo con lo mostrado en la Figura 5. Si los “dientes” permanecen rectos después del ranurado, entonces la madera no presenta tensiones de secado y está lista para su enfriamiento y salida del horno.

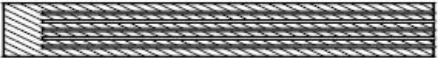

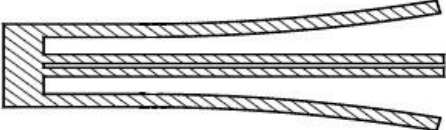

	<p>Se debe eliminar los elementos 2 y 5 de la probeta</p>
	<p>Probeta libre de tensiones</p>
	<p>Probeta mostrando un secado parcial en las partes exteriores – Mayor humedad en el interior que en el exterior</p>
	<p>Probeta mostrando tensiones fuertes en el interior – Mayor humedad en el exterior que en el interior</p>

Figura 5: Prueba del tenedor.

Fuente: Comité Andino de Normalización (2008).

Capítulo III: RESULTADOS

3.1 Determinación de las propiedades físicas

Se determinaron las propiedades físicas de la madera con la finalidad de conocer el comportamiento de las especies objeto de estudio ante los procesos relacionados al secado. Las propiedades físicas determinadas fueron Densidad, Contracción y Punto de Saturación de Fibras (PSF)

3.1.1 Densidad. Se determinaron diferentes tipos de densidades, cuyos resultados se muestran en la Figura 6. Cabe mencionar que aquellos valores relativos a la densidad seca al aire y a la densidad básica son los que tienen mayor aplicación práctica; en el primer caso puede utilizarse para estimar el peso de una carga de madera seca al aire, mientras que en el segundo caso es un indicador utilizado para hacer comparaciones entre diferentes especies.

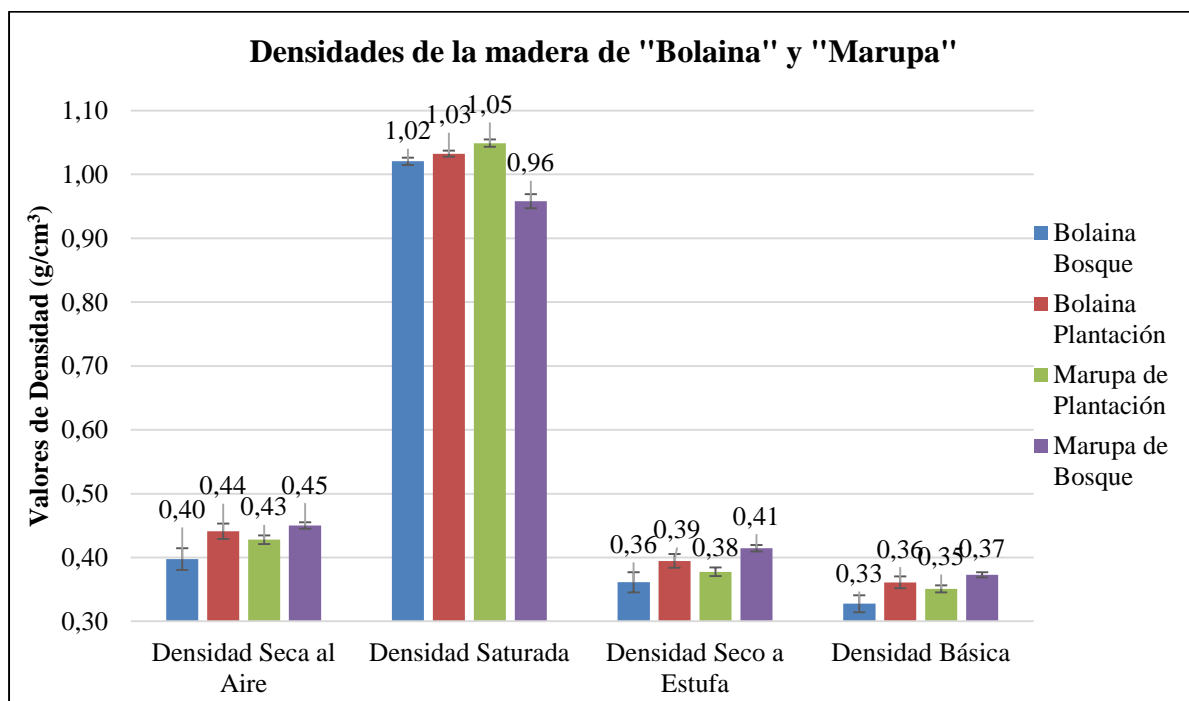


Figura 6: Densidades de la madera de “Bolaina blanca” y “Marupa”.

Fuente: CITEMadera

La determinación de la densidad se basó en la NTP 251.011 “MADERA. Método para determinar la densidad”, en el Tabla 3 se muestran los resultados de densidad obtenidos, donde además se reporta el Intervalo de Confianza (al 95%) y el Coeficiente de Variación de los mismos.

Tabla 3. Densidades de la madera de “Bolaina blanca” y “Marupa” de bosque natural y plantación

Especie	Tipo de Densidad	Contenido de humedad (%)	Densidad Promedio (g/cm ³)	Intervalo de confianza (g/cm ³)	Coeficiente de variación (%)
Bolaina Plantación	DSA	17,38 ± 0,36	0,44	± 0,01	9,6
	DSAT	187,98 ± 6,70	1,03	± 0,005	1,7
	DO	-	0,39	± 0,01	9,8
	DB	-	0,36	± 0,01	9,2
Bolaina Bosque Natural	DSA	16,43 ± 0,23	0,40	± 0,02	17,1
	DSAT	219,57 ± 12,81	1,02	± 0,01	2,2
	DO	-	0,36	± 0,02	17,1
	DB	-	0,33	± 0,01	16,3
Marupa Plantación	DSA	18,10 ± 0,21	0,43	± 0,01	6,3
	DSAT	200,13 ± 5,15	1,05	± 0,006	2,2
	DO	-	0,38	± 0,01	6,9
	DB	-	0,35	± 0,006	6,4
Marupa Bosque natural	DSA	13,84 ± 0,24	0,45	± 0,005	4,4
	DSAT	157,03 ± 9,86	0,96	± 0,011	4,3
	DO	-	0,41	± 0,005	4,8
	DB	-	0,37	± 0,004	4,0

Nota: DSA: Densidad seca al aire, DSAT: Densidad Saturada, DO: Densidad seca a la estufa, DB: Densidad Básica.

Al analizar los valores obtenidos, se aprecia que, para ambas maderas, la Densidad Básica es menor a 0,40 g/cm³ tanto para plantación como para bosque natural, por lo que son consideradas como maderas de densidad baja según la clasificación propuesta por Aróstegui *et al.* (1982), la cual se muestra en el Anexo 5. Estos resultados indican que estas maderas son de fácil secado, procesamiento y trabajabilidad.

Según menciona Aróstegui (1974), la “Bolaina Blanca” de bosque natural posee una Densidad Básica de 0,41 g/cm³, lo que evidencia una variación importante con respecto a los resultados obtenidos para dicha especie (0,33 g/cm³). Esta variación podría ser atribuida al estudio de árboles más jóvenes y de menor diámetro, con respecto al estudio de árboles

de mayor edad y diámetro. Con respecto a los valores reportados en bibliografía, la “Marupa” de bosque natural posee una Densidad Básica de $0,36 \text{ g/cm}^3$, lo que es similar a los resultados obtenidos ($0,37 \text{ g/cm}^3$).

La determinación de la densidad es importante para establecer las variables del proceso de secado, debido a que cuando son valores altos se consideran variables más suaves, mientras que cuando la madera presenta densidad baja como en este caso permite ajustar las condiciones de temperatura y humedad relativa.

3.1.2 Contracción. La contracción permite estimar los cambios dimensionales y volumen de la madera cuando gana o pierde humedad. Se determinaron las contracciones relativas a los diferentes planos de corte (tangencial, radial y longitudinal) así como la contracción en volumen (volumétrica), cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.

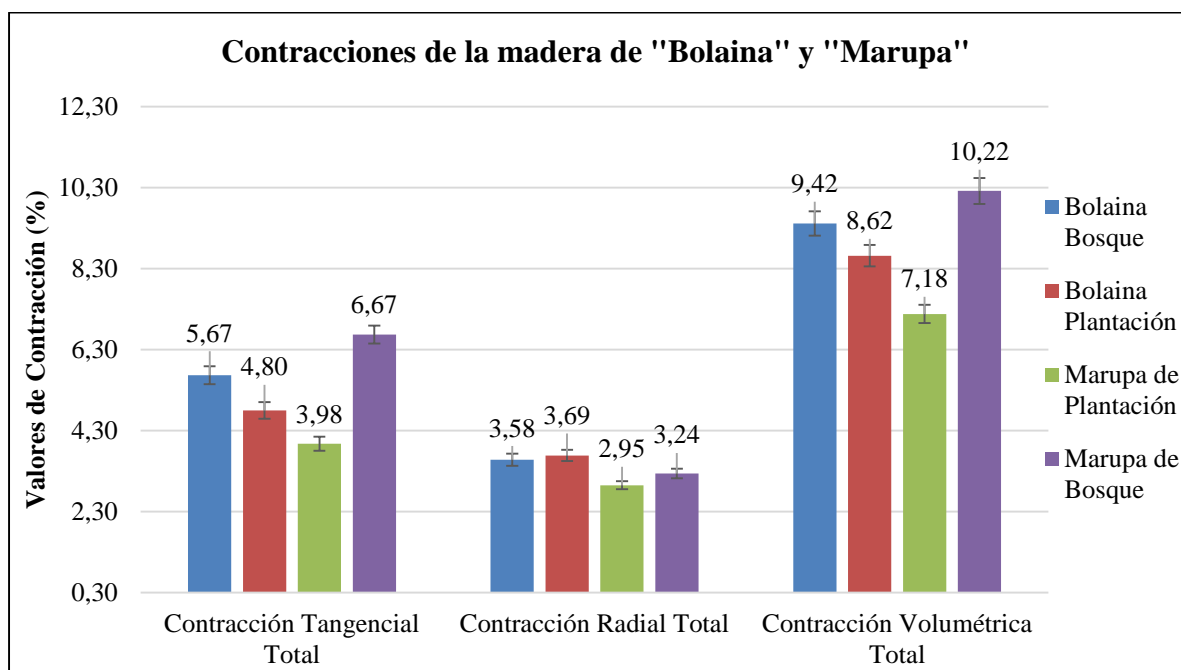
La determinación de la contracción se basó en la NTP 251.012 “MADERA. Método para determinar la contracción”.

Tabla 4. Resultados de ensayos de Contracción de las maderas “Bolaina blanca” y “Marupa”.

Especie	Tipo de Contracción	Contracción Promedio (%)	Intervalo de confianza (%)	Coefficiente de variación (%)
Bolaina Plantación	CTT	4,80	$\pm 0,20$	15,2
	CRT	3,69	$\pm 0,14$	13,3
	CLT	0,13	$\pm 0,02$	51,1
	CV	8,62	$\pm 0,27$	11,0
Bolaina Bosque Natural	CTT	5,67	$\pm 0,15$	10,2
	CRT	3,58	$\pm 0,21$	23,5
	CLT	0,16	$\pm 0,02$	43,6
	CV	9,42	$\pm 0,29$	12,3
Marupa Plantación	CTT	3,98	$\pm 0,18$	17,2
	CRT	2,95	$\pm 0,10$	13,3
	CLT	0,25	$\pm 0,01$	22,4
	CV	7,18	$\pm 0,22$	12,1
Marupa Bosque natural	CTT	6,67	$\pm 0,22$	13,1
	CRT	3,24	$\pm 0,12$	14,0
	CLT	0,30	$\pm 0,03$	41,2
	CV	10,22	$\pm 0,32$	12,6

Nota: CTT: Contracción Tangencial Total, CRT: Contracción Radial Total, CLT: Contracción Longitudinal Total, CVT: Contracción Volumétrica Total

Al evaluar la contracción volumétrica se obtuvo que los valores obtenidos para la “Bolaina” y “Marupa” son considerados como bajos según la clasificación propuesta por Aróstegui *et al.* (1982), la cual se muestra en el Anexo 5, y que indica que ambas maderas poseen buena estabilidad ante la contracción y presentan buen comportamiento en el proceso secado. Los valores obtenidos se pueden apreciar en la Figura 7.



Nota: No se consideró la Contracción Longitudinal Total en la gráfica debido a que presentó valores muy bajos.

Figura 7: Contracción de la madera de “Bolaina blanca” y “Marupa” de bosque natural y plantación.

Fuente: Elaboración propia.

Según información reportada en bibliografía (Aróstegui, 1974), la “Bolaina” de bosque natural posee una contracción tangencial y la radial de 5,5 % y 3,5 % respectivamente, lo que es similar a los resultados obtenidos para la misma especie (contracción tangencial de 5,67 % y contracción radial de 3,58 %).

Con respecto a la “Marupa” de bosque natural, la información encontrada en bibliografía (Sibille *et al.*, 2006) indica una contracción tangencial y radial de 6,70 % y 2,90 % respectivamente, siendo similar a los resultados obtenidos para dicha especie (contracción tangencial de 6,67 %, y contracción radial de 3,24 %).

3.2 Determinación del punto de saturación de las fibras (PSF).

El Punto de Saturación de las Fibras indica el contenido de humedad en el que las fibras de la madera están saturadas de humedad y los lúmenes celulares están libres de agua. Esta propiedad es de mucha importancia para el secado de la madera y para el manejo de las condiciones climáticas durante el proceso de secado.

En la Tabla 5 se muestran los resultados del punto de saturación de fibras obtenidos, donde además se reporta el Intervalo de Confianza y el Coeficiente de Variación de los mismos.

Tabla 5. Punto de saturación de la fibra determinado para “Bolaina Blanca” y “Marupa”

Especie	Punto de Saturación Promedio (%)	Intervalo de confianza (%)	Coeficiente de variación (%)
Bolaina Plantación	28,60	1,47	4,5
Bolaina Bosque Natural	30,81	0,81	2,3
Marupa Plantación	30,97	2,79	8,0
Marupa Bosque Natural	28,06	0,89	3,0

Además, también se pueden apreciar los resultados obtenidos en la Figura 8, donde también se muestra información respecto al PSF encontrada en bibliografía.

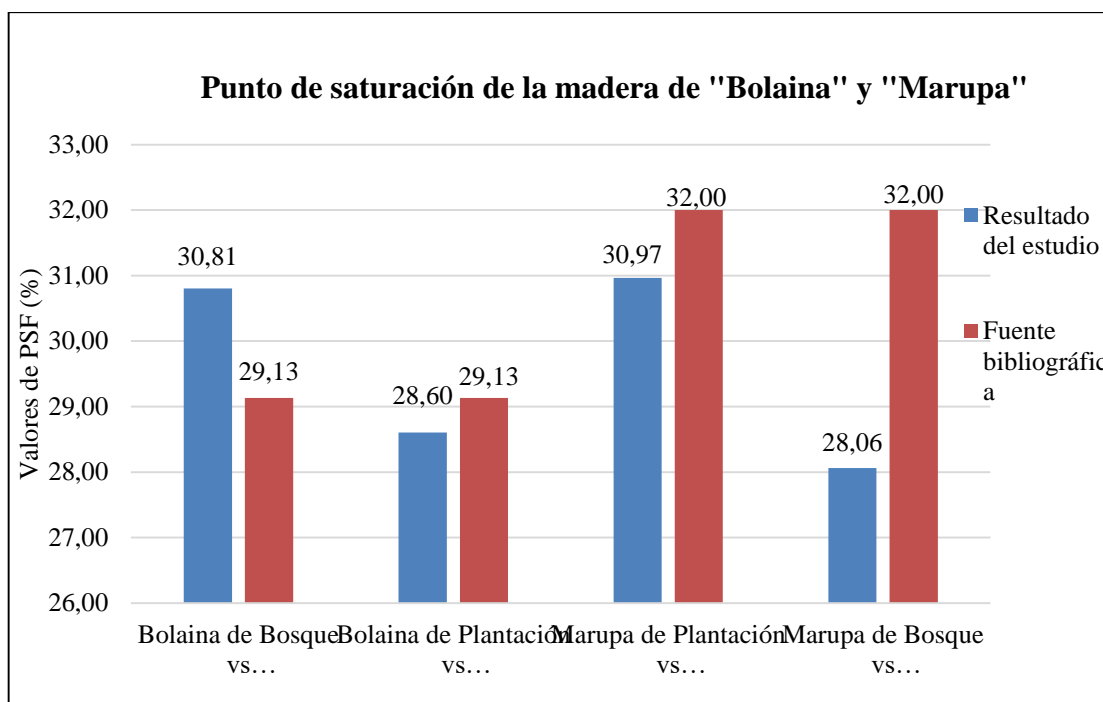


Figura 8: Punto de Saturación de Fibra de la madera de “Bolaina blanca” y “Marupa” de bosque natural y plantación.

Fuente: Elaboración propia.

Según información reportada en bibliografía (Fuentes, 2000), la “Bolaina blanca” posee un PSF de 29,13 %, lo que difiere ligeramente con el valor de 30,81 % obtenido para dicha especie de bosque natural, sin embargo, es similar al 28,60 % obtenido para la madera de plantación. Para el caso de la “Marupa”, la bibliografía (CIRAD, 2016) reporta un valor de 32,00 % lo que difiere con el valor de 28,06 % obtenido para la madera de bosque natural, aunque es similar al 30,97 % obtenido para dicha especie de plantación.

A pesar de las diferencias encontradas entre los resultados obtenidos y aquellos encontrados en la bibliografía, para fines prácticos se puede considerar que el PSF para ambas especies se encuentra alrededor del 30 %.

3.3 Codificación de higrómetros

Los higrómetros son equipos que nos permiten conocer el porcentaje de humedad a la que se encuentra una pieza de madera. Para ser utilizados adecuadamente cada uno de ellos debe ser programado para ser utilizado según la especie que será ensayada, y para lo cual es

necesario contar con un código al momento de realizar la medición, tal como se muestra en la Figura 9.

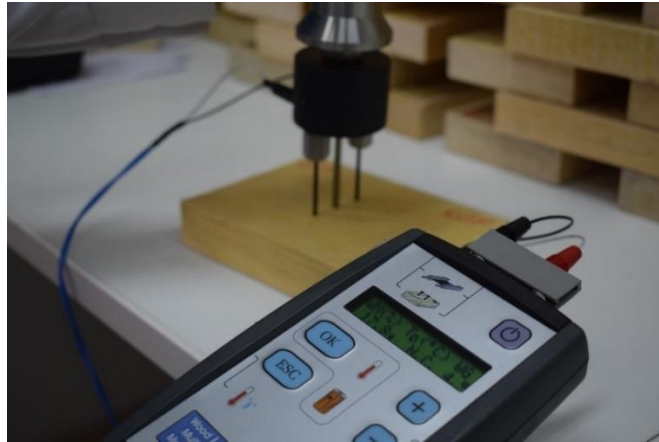


Figura 9: Medición del contenido de humedad de una probeta utilizando un higrómetro de clavos o pines.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que no se contaba con los códigos para las especies en estudio, estos fueron determinados previo al secado en horno con la finalidad de poder obtener valores precisos de humedad. Para la comprobación de los códigos determinados se tomo como referencia el valor de humedad obtenido a través del método gravimétrico. Para la determinación de los códigos se seleccionaron al azar 10 tablas de cada especie, a partir de las cuales se prepararon 100 probetas libres de defectos (sin nudos, rajaduras, medula incluida, pudrición, entre otros) como se muestra en la Figura 10.

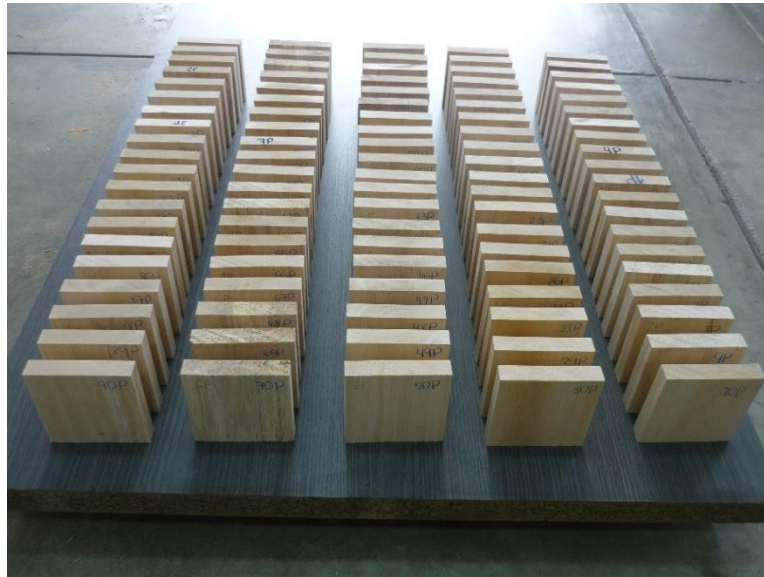


Figura 10: Probetas utilizadas para la determinación de códigos de higrómetros

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6 se muestra el resumen de los resultados obtenidos, donde se indican los códigos determinados para cada higrómetro y para cada especie objeto de estudio.

Tabla 6. Códigos determinados por higrómetro y por especie para la medición apropiada de la humedad de la madera.

Especie	Higrómetros de Contacto			Higrómetros de Clavos/pines		
	PROSCAN D310	NIGOS MCD-50	WAGNER MMC 220	GANN RTU 600	NIGOS RVD-904	CET KIT- PRO
Bolaina Plantación	39	41	41	X3-Y5	2	2,0
Bolaina bosque Natural	43	41	44	X3-Y5	2	1,9
Marupa Plantación	47	46	48	X4-Y5	2	2,0
Marupa Bosque Natural	46	43	51	X3-Y5	2	2,1

Los resultados obtenidos indican que para el higrómetro de contacto NIGOS MCD-50 y para los higrómetros de clavos GANN RTU 600 y NIGOS RVD-904 no hay diferencia entre los códigos determinados para la madera de “Bolaina” de bosque natural y para la misma especie proveniente de plantación. En el caso del primer higrómetro mencionado, el código de

medición obtenido fue “41”; para el segundo se obtuvo el código “X3 – Y5”, mientras que para el tercero fue “2”.

Para los demás higrómetros evaluados, si bien el código determinado no fue el mismo para la madera “bolaina” de plantación y de bosque natural, estos son bastante próximos considerando la escala de códigos de dichos equipos.

En el caso del equipo NIGOS RVD-904, la codificación realizada con el higrómetro de clavos indica que no hay diferencia entre la madera de “Marupa” de plantación y de bosque natural.

Para los higrómetros GANN RTU 600, CET KIT-PRO, PROSCAN D310 y NIGOS MCD-50, si bien el código determinado no fue el mismo para la madera “Marupa” de plantación y de bosque natural, estos son bastante próximos considerando la escala de códigos de dichos equipos, a excepción del higrómetro WAGNER MMC 220 el cuál se obtuvo el valor más alto en la madera de “Marupa” de bosque natural, siendo el código de medición obtenido “51”.

En el Anexo 1 se muestran los valores promedio de humedad obtenidos utilizando los diferentes códigos de higrómetros y las marcas de los equipos, tanto de clavos o pines como de contacto. Así mismo, se puede apreciar el código resaltado en color verde, el cual se refiere a la medición de la humedad más cercana al valor determinado por el método gravimétrico que se encuentra resaltado en color azul, y por lo tanto es considerado el código apropiado para determinar la humedad.

En el Anexo 2 se proporciona la información técnica de los modelos de higrómetros utilizados para la determinación de los códigos.

3.5 Determinación de programas de secado.

3.5.1 Secado de cargas de madera

Se realizó el secado experimental de la madera de las especies “Bolaina blanca” (*Guazuma crinita*) y “Marupa” (*Simarouba amara*), proveniente de bosque natural y de plantaciones,

de 1" y 2" de espesor comercial. Para ello, se realizaron pruebas de secado en dos fases. En la primera fase se secaron tres cargas consecutivas de madera en un horno experimental de 20 pies tablares (pt) de capacidad, ajustando las variables del proceso de secado: temperatura (T) y contenido de humedad de equilibrio (CHE) como se muestra en la Figura 11. Dichas variables fueron ajustadas carga tras carga en función a los defectos que presentaron las piezas de madera como consecuencia de cada proceso.



Figura 11: Carga de madera de 1" apilada para prueba en horno de 20 pt.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, en la segunda etapa, se secaron también tres cargas consecutivas de madera, esta vez en un horno convencional de 500 pt de capacidad, donde se utilizaron los mismos programas de secado aplicados previamente en el horno de 20 pt (Figura 12).



Figura 12: Carga de madera de Bolaina de 1” en horno experimental de 500 pt.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que los hornos de secado donde se realizaron los ensayos son de tipo convencional, y los programas aplicados fueron conducidos en modo semiautomático para un mejor control del proceso. Con la finalidad de escalar los programas ensayados a un nivel industrial, se realizó la validación de los mismos a través del secado de una carga de 5 000 pt por especie y procedencia como se aprecia en la Figura 13.



Figura 13: Carga de madera de Marupa de 1” en horno de 5 000 pt.

Fuente: Elaboración propia.

Además, de las cargas programadas, no se pudo llevar a cabo el secado de la madera de “Marupa” proveniente de plantación para el horno convencional de 500 pt en ninguno de sus espesores comerciales. Esto se debió a la carencia de abastecimiento para la procedencia de dicha especie.

Para la determinación del programa inicial de secado aplicado a la primera carga de madera se tomó como referencia información técnica proveniente de fuentes especializadas. Para el caso de la “Bolaina blanca” se utilizó información obtenida del software de “Programas de Secado de Maderas Latifoliadas” del Forest Products Laboratory – FPL de Estados Unidos. Para la madera de “Marupa” se utilizó la “Guía de Procesamiento Industrial. Fabricación de Muebles con Maderas poco Conocidas – LKS”.

3.5.2 Calificación y evaluación de la calidad del secado.

Con los datos obtenidos durante la evaluación previa y posterior al secado experimental, se determinó el Índice de Calidad (I) de la carga para los defectos de forma y para los de estructura por separado. En la Tabla 7 se puede apreciar que, para las pruebas realizadas en el horno de 20 pt, los resultados fueron satisfactorios, menos para la tercera carga de 1” y la segunda carga de 2” de madera de plantación de “Bolaina blanca”. Así mismo, en la Tabla 8 se muestran los resultados para las cargas de 500 pt, donde se puede ver que los resultados fueron satisfactorios en todos los casos a excepción de la segunda carga de 2” de madera de plantación de “Bolaina blanca”, esto debido a que el atributo determinado posterior al secado disminuyó más de dos niveles con respecto al obtenido previo al proceso.

Tabla 7. Información general de las cargas de madera ensayadas en el horno de 20 pt.

Especie	Procedencia	Espesor	Carga	Tiempo de secado (h)	Idoneidad de programa de secado	Observaciones		
Bolaina blanca	Plantación	1"	1	50	Satisfactoria	Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 5 h (de 50 h a 45 h).		
			2	45	Satisfactoria			
			3	28	No satisfactoria			
		2"	1	158	Satisfactoria		Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 47 h (de 158 h a 111 h).	
			2	122	Poco satisfactoria			
			3	111	Satisfactoria			
	Bosque natural	1"	1	26	Satisfactoria			Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 1 h (de 26 h a 25 h).
			2	26	Satisfactoria			
			3	25	Satisfactoria			
2"		1	108	Satisfactoria	Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 62 h (de 108 h a 46 h).			
		2	69	Satisfactoria				
		3	46	Satisfactoria				
Marupa	Plantación	1"	1	51		Satisfactoria	Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 23 h (de 51 h a 28 h).	
			2	50		Satisfactoria		
			3	28		Satisfactoria		
		2"	1	109	Satisfactoria	Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 27 h (de 109 h a 82 h).		
			2	47	Satisfactoria			
			3	82	Satisfactoria			
	Bosque natural	1"	1	39	Satisfactoria			Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 12 h (de 39 h a 27 h).
			2	36	Satisfactoria			
			3	27	Satisfactoria			
2"		1	57	Satisfactoria	Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 16 h (de 57 h a 41 h).			
		1	51	Satisfactoria				
		2	41	Satisfactoria				

Nota 1: El tiempo de secado incluye las horas de acondicionamiento final.

Nota 2: En el caso de la "Bolaina blanca" de 1" de espesor proveniente de plantación para la evaluación en horno de 20 pt, a pesar de que el tiempo de secado de la 3ª carga fue menor al de la 2ª, se produjeron defectos considerables en la madera. Por ello, el programa resultante de dicha carga no se consideró como óptimo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Información general de las cargas de madera ensayadas en el horno de 500 pt.

Especie	Procedencia	Espesor	Carga	Tiempo de secado (h)	Idoneidad de programa de secado	Observaciones	
Bolina blanca	Plantación	1	1	26	Satisfactoria	Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 5 h (de 26 h a 21 h).	
			2	22	Satisfactoria		
			3	21	Satisfactoria		
		2	1	88	Satisfactoria		Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 44 h (de 88 h a 44 h).
			2	48	No satisfactoria		
			3	44	Satisfactoria		
	Bosque natural	1	1	35	Satisfactoria	Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 5 h (de 35 h a 30 h).	
			2	33	Satisfactoria		
			3	30	Satisfactoria		
		2	1	156	Satisfactoria		Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 22 h (de 156 h a 134 h).
			2	144	Satisfactoria		
			3	134	Satisfactoria		
Marupa ^[**]	Bosque natural	1	1	140	Satisfactoria	Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 68 h (de 140 h a 72 h).	
			2	90	Satisfactoria		
			3	72	Satisfactoria		
		2	1	215	Satisfactoria		Como resultado del ajuste de las variables de secado en cada carga, se redujo el tiempo de secado en 113 h (de 215 h a 102 h).
			2	159	Satisfactoria		
			3	102	Satisfactoria		

Nota 1: El tiempo de secado incluye las horas de acondicionamiento final.

Nota 2: No se pudo llevar a cabo el secado de la madera de "Marupa" proveniente de plantación para el horno convencional de 500 pt en ninguno de sus espesores comerciales debido a la carencia de abastecimiento para la procedencia de dicha especie.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3 Programas de secado obtenidos

3.5.3.1 Programas de secado de “Bolaina blanca” obtenidos

“Bolaina blanca” de 1” de espesor proveniente de plantaciones

En la Tabla 9 se aprecia el programa óptimo obtenido de las evaluaciones de “Bolaina blanca” de 1” de espesor comercial, proveniente de plantaciones. Aplicando dicho programa se consiguió secar la madera hasta en 21 horas a nivel experimental, desde un contenido de humedad de alrededor de 62% hasta un 8%. Por otro lado, a nivel industrial la madera se secó en 90 horas.

Tabla 9. Programa de secado obtenido para la madera de “Bolaina blanca” de 1” de espesor proveniente de plantaciones.

Etapas	CH (%)	T (°C)	HR (%)	CHE (%)	Gradiente de secado
1	70-60	60	75	12	2,5
2	60-50	60	63	9,5	3,2
3	50-40	60	55	8	3,8
4	40-35	60	45	7	4,3
5	35-30	63	46	7	4,3
6	30-25	65	47	5	5,5
7	25-20	70	35	5	4,5
8	20-15	75	38	5	3,5
9	15	80	25	3,5	4,3
Acond: 6 h (T=-5°C; CHE=+5%) *	-	75	-	8,5	-

Nota: Los valores de humedad relativa (HR) se obtuvieron de la “Tabla de humedad relativa y contenido de humedad para diferentes temperaturas del bulto seco y depresiones del bulbo húmedo” del Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas (1989).

Nota 2: Los valores de acondicionamiento indicados se refieren al ajuste de la Temperatura y CHE con respecto a la última etapa del programa de secado. Dicho acondicionamiento se realiza con la finalidad de reducir las tensiones de secado que posee la madera.

Fuente: Elaboración propia.

“Bolaina blanca” de 1” de espesor proveniente de bosque natural

En la Tabla 10 se aprecia el programa óptimo obtenido de las evaluaciones de “Bolaina blanca” de 1” de espesor comercial, proveniente de bosque natural. Aplicando dicho programa se consiguió secar la madera hasta en 25 horas a nivel experimental, desde un contenido de humedad de alrededor de 50% hasta un 8%. Por otro lado, a nivel industrial la madera se secó en 68 horas.

Tabla 10. Programa de secado obtenido para la madera de “Bolaina blanca” de 1” de espesor proveniente de bosque natural.

Etapas	CH (%)	T (°C)	HR (%)	CHE (%)	Gradiente de secado
1	70-60	60	75	12	2,5
2	60-50	60	63	9,5	3,2
3	50-40	60	55	8	3,8
4	40-35	60	45	7	4,3
5	35-30	63	46	7	4,3
6	30-25	65	47	5	5,5
7	25-20	70	35	5	4,5
8	20-15	75	38	5	3,5
9	15	80	25	3,5	4,3
Acond: 6 h (T=-5°C; CHE=+5%)	-	75	-	8,5	-

Nota 1: Los valores de humedad relativa (HR) se obtuvieron de la “Tabla de humedad relativa y contenido de humedad para diferentes temperaturas del bulbo seco y depresiones del bulbo húmedo” del Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas (1989).

Nota 2: Los valores de acondicionamiento indicados se refieren al ajuste de la Temperatura y CHE con respecto a la última etapa del programa de secado. Dicho acondicionamiento se realiza con la finalidad de reducir las tensiones de secado que posee la madera.

Fuente: Elaboración propia.

“Bolaina blanca” de 2” de espesor proveniente de plantaciones

En la Tabla 11 se aprecia el programa óptimo obtenido de las evaluaciones de “Bolaina blanca” de 2” de espesor comercial, proveniente de plantaciones. Aplicando dicho programa se consiguió secar la madera hasta en 44 horas a nivel experimental, desde un contenido de humedad de alrededor de 55% hasta un 10%. Por otro lado, a nivel industrial la madera se secó en 162 horas.

Tabla 11. Programa de secado obtenido para la madera de “Bolaina blanca” de 2” de espesor proveniente de plantaciones.

Etapas	CH (%)	T (°C)	HR (%)	CHE (%)	Gradiente de secado
1	70-60	62	83	14	2,1
2	60-50	62	74	12	2,5
3	50-40	62	74	11	2,7
4	40-35	62	60	8,5	3,5
5	35-30	65	58	8	3,8
6	30-25	67	44	6	4,6
7	25-20	73	46	6	3,8
8	20-15	77	46	5	3,5
9	15	80	40	5	3
Acond: 10 h (T=-5°C; CHE=+5%)	-	75	-	10	-

Nota 1: Para el programa de secado empleado, los valores de humedad relativa (HR) se obtuvieron de la “Tabla de humedad relativa y contenido de humedad para diferentes temperaturas del bulto seco y depresiones del bulbo húmedo” del Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas (1989).

Nota 2: Los valores de acondicionamiento indicados se refieren al ajuste de la Temperatura y CHE con respecto a la última etapa del programa de secado. Dicho acondicionamiento se realiza con la finalidad de reducir las tensiones de secado que posee la madera.

Fuente: Elaboración propia.

“Bolaina blanca” de 2” de espesor proveniente de bosque natural

En la Tabla 12 se aprecia el programa óptimo obtenido de las evaluaciones de “Bolaina blanca” de 2” de espesor comercial, proveniente de plantaciones. Aplicando dicho programa se consiguió secar la madera hasta en 46 horas a nivel experimental, desde un contenido de humedad de alrededor de 60% hasta un 10%. Por otro lado, a nivel industrial la madera se secó en 168 horas.

Tabla 12. Programa de secado obtenido para la madera de “Bolaina blanca” de 2” de espesor proveniente de bosque natural.

Etapas	CH (%)	T (°C)	HR (%)	CHE (%)	Gradiente de secado
1	70-60	62	83	14	2,1
2	60-50	62	74	12	2,5
3	50-40	62	74	11	2,7
4	40-35	62	60	8,5	3,5
5	35-30	65	58	8	3,8
6	30-25	67	44	6	4,6
7	25-20	73	46	6	3,8
8	20-15	77	46	5	3,5
9	15	80	40	5	3
Acond: 10 h (T=-5°C; CHE=+5%)	-	75	-	10	-

Nota 1: Para el programa de secado empleado, los valores de humedad relativa (HR) se obtuvieron de la “Tabla de humedad relativa y contenido de humedad para diferentes temperaturas del bulbo seco y depresiones del bulbo húmedo” del Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas (1989).

Nota 2: Los valores de acondicionamiento indicados se refieren al ajuste de la Temperatura y CHE con respecto a la última etapa del programa de secado. Dicho acondicionamiento se realiza con la finalidad de reducir las tensiones de secado que posee la madera.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3.2 Programas de secado de “Marupa” obtenidos

“Marupa” de 1” de espesor proveniente de bosque natural

En la Tabla 13 se aprecia el programa óptimo obtenido de las evaluaciones de “Marupa” de 1” de espesor comercial, proveniente de bosque natural. Aplicando dicho programa se consiguió secar la madera hasta en 27 horas a nivel experimental, desde un contenido de humedad de alrededor de 50% hasta un 10%. Por otro lado, a nivel industrial la madera se secó en 125 horas.

Tabla 13. Programa de secado obtenido para la madera de “Marupa” de 1” de espesor proveniente de bosque natural.

Etapas	CH (%)	T (°C)	HR (%)	CHE (%)	Gradiente de secado
1	>40	58	83	14	2,1
2	40-30	58	68	10,5	2,9
3	30-25	65	60	8	3,4
4	25-20	78	46	6	3,8
5	20-15	78	39	5	3,5
6	15-12	78	25	3,5	3,9
7	12	78	25	3,5	3,4
Acond: 8 h (T=-5°C; CHE=+5%)	-	73	-	8,5	-

Nota 1: Para el programa de secado empleado, los valores de humedad relativa (HR) se obtuvieron de la “Tabla de humedad relativa y contenido de humedad para diferentes temperaturas del bulto seco y depresiones del bulbo húmedo” del Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas (1989).

Nota 2: Los valores de acondicionamiento indicados se refieren al ajuste de la Temperatura y CHE con respecto a la última etapa del programa de secado. Dicho acondicionamiento se realiza con la finalidad de reducir las tensiones de secado que posee la madera.

Fuente: Elaboración propia.

“Marupa” de 2” de espesor proveniente de bosque natural

En la Tabla 14 se aprecia el programa óptimo obtenido de las evaluaciones de “Marupa” de 2” de espesor comercial, proveniente de bosque natural. Aplicando dicho programa se consiguió secar la madera hasta en 55 horas a nivel experimental, desde un contenido de humedad de alrededor de 62% hasta un 11%. Por otro lado, a nivel industrial la madera se secó en 180 horas.

Tabla 14. Programa de secado obtenido para la madera de “Marupa” de 2” de espesor proveniente de bosque natural.

Etapa	CH (%)	T (°C)	HR (%)	CHE (%)	Gradiente de secado
1	70-60	62	79	13	2,3
2	60-50	65	75	12	2,5
3	50-40	68	65	9,5	3,2
4	40-35	68	58	8	3,8
5	35-30	68	54	7	4,3
6	30-25	72	44	6	4,6
7	25-20	75	46	6	3,8
8	20-15	77	38	5	3,5
9	15	77	38	5	3,0
Acond.: 12 h (T=-4°C; CHE=+5%)	-	73	-	8	-

Nota 1: Para el programa de secado empleado, los valores de humedad relativa (HR) se obtuvieron de la “Tabla de humedad relativa y contenido de humedad para diferentes temperaturas del bulbo seco y depresiones del bulbo húmedo” del Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas (1989).

Nota 2: Los valores de acondicionamiento indicados se refieren al ajuste de la Temperatura y CHE con respecto a la última etapa del programa de secado. Dicho acondicionamiento se realiza con la finalidad de reducir las tensiones de secado que posee la madera.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se logró desarrollar y validar la metodología propuesta para el secado experimental de maderas tanto de bosque natural como de plantación de Bolaina Blanca (*Guazuma crinita*) y Marupa (*Simarouba amara*).

La metodología establecida permitió desarrollar los programas de secado para las maderas de Bolaina Blanca (*Guazuma crinita*) y Marupa (*Simarouba amara*) en 1 y 2 pulgadas de espesor mediante el ajuste de variables de temperatura y humedad relativa,

Los programas de secado establecidos para la madera de Bolaina Blanca (*Guazuma crinita*) y Marupa (*Simarouba amara*) tanto en 1 como en 2 de espesor, permitieron reducir el tiempo de secado manteniendo la clasificación de la calidad de la madera como adecuada.

Los códigos determinados para tres higrómetros de contacto y tres de clavos permitieron la medición de humedad de madera de Bolaina Blanca (*Guazuma crinita*) y Marupa (*Simarouba amara*) en 1 y 2 pulgadas de espesor.

La determinación de las propiedades físicas de las especies estudiadas permitió programar las variables de secado y un mejor control del proceso.

RECOMENDACIONES

Desarrollar investigaciones adicionales sobre el secado de la madera, codificación de higrómetros y determinación de propiedades asociadas al secado artificial para otras especies de interés comercial, tanto para investigación como para fines comerciales, lo cual favorecerá a la mejora de la cadena de transformación de la madera, así como la promoción del uso de madera seca para la elaboración de productos.

Para la selección de un programa de secado es importante contar con la información tecnológica de la especie en estudio para complementar los resultados obtenidos durante el proceso y establecer los parámetros de secado adecuados de acuerdo al tipo de madera propuesta.

Previo a iniciar cualquier proceso de secado, verificar el funcionamiento de los equipos con el fin de evitar cualquier falla técnica que pueda producirse durante el secado. Así mismo es importante conocer las especificaciones de los equipos para ajustar los parámetros de secado como temperatura y humedad para acelerar el proceso de secado.

La madera seca presenta grandes ventajas respecto a la madera húmeda, es por ello que se recomienda la difusión de la importancia del secado de madera como un proceso para la mejora de la calidad, así como promover los beneficios que tiene este proceso para la cadena de transformación de la madera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, R. T.; Fiedler, N. C.; Silva, E. N.; fLopes, E. S. y Carmo, F.C.S. (2013) *Technical analysis and transportation costs of wood with different types of vehicles*. *Revista Árvore*, v. 37, n. 5, p.897-904.
- Aróstegui, A. (1974). *Estudio tecnológico de maderas del Perú (Zona Pucallpa): características tecnológicas y usos de la madera de 145 especies del país*. Lima, PE, UNALM. v.1, 483 p.
- Aróstegui, A. (1982). *Recopilación y análisis de estudios tecnológicos de maderas peruanas*. Lima, PE, PNUD/FAO/PER/71/511. (Documento de trabajo N°2). 57 p.
- Bulian, F. y Graystone, J. (2009). *Wood Coating: Theory and Practice*. Elsevier B.V. 320 p.
- CIRAD. 2016. *The Main Technological Characteristics of 245 Tropical Woods Species Tropix 7*. Disponible en: <http://tropix.cirad.fr/en/list-of-data-sheets-available>
- Comité Andino de Normalización. (2008). Norma Andina NA 0049. *Procedimiento para el secado artificial de madera húmeda (verde)*. 16 p.
- Denig, J; Wengert, E, M. y Simpson, W, T. (2000). *Drying hardwood lumber*. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–118. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 138 p.
- Fuentes, M. 2000. *Estimación del punto de saturación de la fibra (PSF) de las maderas*. División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 6(1): 79-81.

- INACAL. (2014). NTP 251.011:2014. *Método para determinar la densidad*. 14 p.
- INACAL. (2014). NTP 251.012:2015. *Método para determinar la contracción*. 14 p.
- INACAL. (2011). NTP 251.101:2011. *MADERA ASERRADA. Defectos. Definiciones y clasificación*. 12 p.
- Junta del Acuerdo de Cartagena. (1989). *Manual del Grupo Andino para el secado de maderas*. JUNAC. Proyecto Subregional de Promoción Industrial de la Madera para Construcción. PRID – Madera. 124 p.
- Keey, R; Langrish, T y Walker, J. (2000). *Kiln-Drying of Lumber*. Springer Series in Wood Science. 10.1007/978-3-642-59653-7. 330 p.
- Machado, C. C.; Lopes, E. S. (2000). *Analysis of the effect of eucalypt log length on the productivity and cost of wood harvesting and transport*. *Cerne*, v. 6, n. 2, p. 124-129.
- Minea, V. (2019). *Industrial Heat Pump-Assisted Wood Drying*. CRC Press; Primera Edición. 725 p.
- Pérez Guerrero, P; Ananias, R y Hernandez, G. (2007). *Estudio experimental del secado de renovales de Canelo drimys winteri*. *Maderas: Ciencia y Tecnología*. 9. 59-70. 10.4067/S0718-221X2007000100005.
- Pérre, P. y Olek, W. (2007). *From fundamentals to practice: the interaction chain*. In: P. Pérre (Editor) *Fundamentals of Wood Drying*. A.R.BO.LOR., Nancy, p. 1-20
- Redman, A.L., Bailleres, H. y Turner, I. (2016). *Characterization of wood–water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade*. *Wood Sci Technol* 50, 739–757. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0818-0>
- Shmulsky, R y Jones, D. (2019). *Forest Products and Wood Science an Introduction*, Seventh Edition. 490 p.

- Sibille A. M. (2006). *Guía del Procesamiento Industrial para la fabricación de muebles con maderas poco conocidas - LKS*. USAID-PROMPEX. Lima, Perú. 73 p.
- Sonmez A. (1989). *Durability of Varnishes Used on Surfaces of Wood Furniture Against Important Physical, Mechanical, and Chemical Effects*, Ph.D. Thesis, Department of Furniture and Decoration, Gazi University, Ankara,
- Sova, D., Bedeleian, B. y Sandu, V. (2016). *Application of Response Surface Methodology to Optimization of Wood Drying Conditions in a Pilot-Scale Kiln*. *Baltic Forestry* 22(2): 348-356
- Tahvanainen, T.; Anttila, P. (2011). *Supply chain cost analysis of long-distance transportation of energy wood in Finland*. *Biomass and Bioenergy*, v. 35 n. 8, p. 3360–3375.
- Zanuncio, A; Carvalho, A; Silva, M y Lima, J. (2017). *Importance of wood drying to the forest transport and pulp mill supply*. *CERNE*. 23. 147-152. 10.1590/01047760201723022223.

ANEXOS

ANEXO 1: Resultados de ensayo de codificación de higrómetros para la madera de “Bolaina blanca” y “Marupa” de plantación y bosque natural

Tabla 1

Humedad con Higrómetro de contacto PROSCAN D310 vs Humedad Gravimétrica – Bolaina de bosque natural.

PROBETA S	Promedio de CH - Por Código de Higrómetro (%)																				Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)	
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		51
Promedio de las 100 probetas	16,6	16,4	16,1	15,8	15,6	15,4	15,1	14,7	14,5	14,4	13,9	13,6	13,3	12,8	13,9	12,0	11,7	11,2	11,0	10,8	10,5	13,3

Tabla 2

Humedad con Higrómetro de contacto NIGOS MCD-50 vs Humedad Gravimétrica – Bolaina de bosque natural.

PROBETA S	Promedio de CH - Por Código de Higrómetro (%)																				Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)	
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		51
Promedio de las 100 probetas	15,2	15,1	15,2	14,8	14,6	14,7	15,0	15,0	14,0	14,0	13,1	12,7	12,8	12,4	12,1	11,8	11,8	11,4	11,0	10,8	10,8	13,3

Tabla 3

*Humedad con Higrómetro de contacto WAGNER MMC 220 vs Humedad Gravimétrica –
Bolaina de bosque natural.*

PROBETAS	Promedio de CH - Por Código de Higrómetro (%)																				Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)	
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		51
Promedio de las 100 probetas	16,4	16,4	15,6	15,7	15,9	16,0	15,7	15,5	15,4	15,1	14,3	14,2	13,9	13,1	13,0	12,5	12,4	12,1	12,1	12,0	11,7	13,3

Tabla 4

*Humedad con Higrómetro de contacto PROSCAN D310 vs Humedad Gravimétrica –
Bolaina de plantación.*

PROBETAS	Promedio de CH - Por Código de Higrómetro (%)																				Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)	
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		51
Promedio de las 100 probetas	16,0	15,5	15,3	15,0	14,7	14,4	14,2	13,9	13,2	13,7	12,9	12,7	12,4	12,1	11,9	11,5	11,3	10,9	10,7	10,3	10,1	13,2

Tabla 5

*Humedad con Higrómetro de contacto NIGOS MCD-50 vs Humedad Gravimétrica –
Bolaina de plantación.*

PROBETAS	Promedio de CH - Por Código de Higrómetro (%)																				Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)	
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		51
Promedio de las 100 probetas	15,9	15,2	15,5	15,0	14,6	14,2	13,9	13,7	13,7	14,0	13,1	12,7	12,8	12,4	12,1	11,8	11,8	11,4	11,0	10,8	10,8	13,2

Tabla 6

*Humedad con Higrómetro de contacto WAGNER MMC 220 vs Humedad Gravimétrica –
Bolaina de plantación.*

PROBETAS	Promedio de CH - Por Código de Higrómetro (%)																				Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)	
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		51
Promedio de las 100 probetas	16,4	16,4	15,6	15,7	15,9	16,0	15,7	14,3	15,4	14,0	13,2	14,2	13,9	13,1	13,0	12,5	12,4	12,1	12,1	12,0	11,7	13,2

Tabla 7

*Humedad con Higrómetro de contacto PROSCAN D310 vs Humedad Gravimétrica –
Marupa de bosque natural.*

PROBETAS	Promedio de CH - Por Código de Higrómetro (%)																				Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)	
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		51
Promedio de las 100 probetas	18,0	17,7	17,4	17,1	16,8	16,6	16,3	16,0	15,7	15,4	15,1	14,9	14,6	14,4	14,1	13,8	13,5	13,3	13,0	12,7	12,4	13,8

Tabla 8

*Humedad con Higrómetro de contacto NIGOS MCD-50 vs Humedad Gravimétrica –
Marupa de bosque natural.*

PROBETAS	Promedio de CH - Por Código de Higrómetro (%)																				Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)	
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		51
Promedio de las 100 probetas	16,2	15,8	15,8	15,5	15,2	15,0	14,9	14,7	14,7	14,4	14,0	14,1	13,6	13,4	13,3	12,9	12,8	12,4	12,2	12,1	11,7	13,8

Tabla 9

Humedad con Higrómetro de contacto WAGNER MMC 220 vs Humedad Gravimétrica – Marupa de bosque natural.

PROBETAS	Promedio de CH - Por Código de Higrómetro (%)																				Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)	
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		51
Promedio de las 100 probetas	19,2	19,0	18,7	18,6	18,4	18,1	17,8	17,6	17,2	16,7	16,2	16,5	16,3	16,1	15,8	15,6	15,3	15,0	14,8	14,6	14,3	13,8

Tabla 10

Humedad con Higrómetro de contacto PROSCAN D310 vs Humedad Gravimétrica – Marupa de plantación.

PROBETAS	Promedio de CH - Por Código de Higrómetro (%)														Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
Promedio de las 100 probetas	18,4	18,4	17,8	18,4	17,1	16,9	16,6	16,4	16,1	18,4	15,5	15,2	14,9	14,5	14,8

Tabla 11

Humedad con Higrómetro de contacto NIGOS MCD-50 vs Humedad Gravimétrica – Marupa de plantación.

PROBETAS	Promedio de CH - Por Código de Higrómetro (%)												Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	
Promedio de las 100 probetas	12,8	12,8	12,3	12,0	12,0	12,0	11,7	11,5	11,1	10,5	10,4	9,9	10,02

Tabla 12

*Humedad con Higrómetro de contacto WAGNER MMC 220 vs Humedad Gravimétrica –
Marupa de plantación.*

PROBETAS	Promedio de CH - Por Código de Higrómetro (%)														Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)	
	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48		49
Promedio de las 100 probetas	19,3	19,1	18,8	18,5	18,3	18,0	17,7	17,1	16,8	16,4	16,8	16,4	15,7	15,0	14,3	14,8

Tabla 13

*Humedad con Higrómetro de clavos/pines GANN RTU 600 vs Humedad Gravimétrica –
Bolaina de plantación.*

Código	Frecuencia	Promedio de CH - Por código de Higrómetro (%)	Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
X2-Y5	2	13,3	13,1
X3-Y4	6	12,4	12,8
X3-Y5	71	13,1	12,9
X3-Y6	1	13,4	13,0
X4-Y4	2	12,7	13,0
X4-Y5	18	13,2	13,0

Tabla 14

*Humedad con Higrómetro de clavos/pines NIGOS RVD-904 vs Humedad Gravimétrica –
Bolaina de plantación.*

Código	Frecuencia	Promedio de CH - Por código de Higrómetro (%)	Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
1	3	11,7	13,0
2	96	13,0	12,9
3	1	14,5	13,2

Tabla 15

*Humedad con Higrómetro de clavos/pines CET KIT-PRO vs Humedad Gravimétrica –
Bolaina de plantación.*

Código	Frecuencia	Promedio de CH - Por código de Higrómetro (%)	Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
1,4	1	13,1	13,0
1,6	1	12,9	12,9
1,7	8	12,8	12,9
1,8	10	13,0	13,0
1,9	14	13,0	13,0
2,0	18	13,0	13,0
2,1	10	12,8	12,8
2,2	16	13,0	13,0
2,3	10	12,9	12,9
2,4	5	12,9	13,0
2,5	3	12,8	12,8
2,6	3	13,1	13,1
2,8	1	13,3	13,2

Tabla 16

*Humedad con Higrómetro de clavos/pines GANN RTU 600 vs Humedad Gravimétrica –
Bolaina de bosque natural.*

Código	Frecuencia	Promedio de CH - Por código de Higrómetro (%)	Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
X2-Y5	3	13,1	13,5
X2-Y6	6	13,7	13,5
X3-Y4	36	13,2	13,4
X3-Y5	40	13,5	13,4
X4-Y3	2	13,4	13,5
X4-Y4	10	13,5	13,6
X4-Y5	2	13,8	13,7
X5-Y2	1	13,4	13,5

Tabla 17

*Humedad con Higrómetro de clavos/pines NIGOS RVD-904 vs Humedad Gravimétrica –
Bolaina de bosque natural.*

Código	Frecuencia	Promedio de CH - Por código de Higrómetro (%)	Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
1	9	12,2	13,6
2	91	14,1	13,4

Tabla 18

*Humedad con Higrómetro de clavos/pines CET KIT-PRO vs Humedad Gravimétrica –
Bolaina de bosque natural.*

Código	Frecuencia	Promedio de CH - Por código de Higrómetro (%)	Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
1,5	13	13,4	13,4
1,6	13	13,4	13,4
1,7	14	13,4	13,4
1,8	13	13,3	13,3
1,9	17	13,4	13,4
2,0	11	13,5	13,4
2,1	10	13,6	13,6
2,2	7	13,6	13,6
2,3	2	13,8	13,7

Tabla 19

*Humedad con Higrómetro de clavos/pines GANN RTU 600 vs Humedad Gravimétrica –
Marupa de plantación.*

Código	Frecuencia	Promedio de CH - Por código de Higrómetro (%)	Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
X1-Y4	1	9,1	9,2
X3-Y5	22	13,2	13,5
X3-Y6	13	13,9	13,7
X4-Y4	4	13,2	13,5
X4-Y5	60	13,8	13,6

Tabla 20

Humedad con Higrómetro de clavos/pines NIGOS RVD-904 vs Humedad Gravimétrica – Marupa de plantación.

Código	Frecuencia	Promedio de CH - Por código de Higrómetro (%)	Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
1	1	10,6	9,2
2	99	13,6	13,6

Tabla 21

Humedad con Higrómetro de clavos/pines CET KIT-PRO vs Humedad Gravimétrica – Marupa de plantación.

Código	Frecuencia	Promedio de CH - Por código de Higrómetro (%)	Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
0,5	1	9,8	9,2
1,6	1	13,2	13,2
1,7	2	13,7	13,7
1,8	8	13,6	13,6
1,9	7	13,6	13,7
2,0	28	13,5	13,5
2,1	27	13,6	13,6
2,2	16	13,6	13,6
2,3	5	13,9	13,9
2,4	2	13,8	13,8
2,5	2	13,4	13,3
2,7	1	13,7	13,7

Tabla 22

Humedad con Higrómetro de clavos/pines GANN RTU 600 vs Humedad Gravimétrica – Marupa de bosque natural.

Código	Frecuencia	Promedio de CH - Por código de Higrómetro (%)	Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
X1-Y3	1	9,5	9,8
X2-Y5	4	13,2	13,5
X3-Y4	6	13,1	13,6
X3-Y5	88	13,7	13,6
X4-Y4	1	13,0	13,4

Tabla 23

Humedad con Higrómetro de clavos/pines NIGOS RVD-904 vs Humedad Gravimétrica – Marupa de bosque natural.

Código	Frecuencia	Promedio de CH - Por código de Higrómetro (%)	Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
1	1	11,4	9,8
2	99	13,8	13,6

Tabla 24

*Humedad con Higrómetro de clavos/pines CET KIT-PRO vs Humedad Gravimétrica –
Marupa de bosque natural.*

Código	Frecuencia	Promedio de CH - Por código de Higrómetro (%)	Promedio de CH - Método Gravimétrico (%)
0,5	1	10	9,8
1,7	2	13,9	13,8
1,8	2	13,5	13,4
1,9	7	13,6	13,6
2,0	29	13,5	13,6
2,1	31	13,6	13,6
2,2	22	13,6	13,6
2,3	4	13,3	13,4
2,4	2	13,5	13,4

ANEXO 2: Características técnicas de higrómetros de contacto y clavos utilizados en el estudio

Tabla 1

Características técnicas de los higrómetros de contacto usados en el estudio.

Característica	WAGNER MMC 220	PROSCAN D310	NIGOS MCD-50
Sistema de medición de la humedad	Ondas electromagnéticas	Señales de radiofrecuencia	Ondas electromagnéticas
Rango de medición de espesor	¾" a 1 ½" (19 mm a 38 mm)	¾" a 1" (19 mm - 25 mm)	10 mm a 50 mm
Rango de códigos	de 20 a 100, de 1 en 1	de 30 a 80, de 1 en 1	0,2 a 1,10
Rango de medición precisa de la humedad	5 - 30 %	5 - 30 %	menos de 30 %
Materiales en los cuales se puede utilizar	Madera sólida (acabada o sin acabar), madera laminada. También materiales no maderables cuando no se requiere gran precisión de medida	Madera y materiales higroscópicos de la construcción	Madera sólida y láminas de maderas (chapas)
Escala de lectura	0,10 %	0,10 %	0,10 %
Temperatura de operación	Temperatura: -1 °C a 43 °C	-	Temperatura: -40 °C a 85 °C y humedad: 5 %HR a 90 %HR
Efecto de la temperatura	La medición no se ve afectada por la temperatura de la madera o la humedad de la superficie	La medición no se ve afectada por la temperatura de la madera o la humedad de la superficie	La medición no se ve afectada por la temperatura de la madera o la humedad de la superficie
Medición en el sentido del grano o perpendicular al grano	Cualquiera de las dos	Cualquiera de las dos	Medición en el sentido del grano

Tabla 2

Características técnicas de los higrómetros de clavos usados en el estudio.

Característica	GANN RTU 600	NIGOS RVD-904	CET KIT-PRO
Sistema de medición de la humedad	Resistencia	Resistencia	Resistencia
Rango de medición de espesor	Variable	Variable	Variable
Rango de códigos	81 combinaciones de X e Y	Para 4 grupos de madera	de 0,5 a 4,5, de 0,1 en 0,1
Rango de medición precisa de la humedad	5 % - 30 %	5 % - 30 %	5 % - 30 %
Materiales en los cuales se puede utilizar	Madera	Madera	Madera
Escala de lectura	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Temperatura de operación	de 5 °C hasta +40 °C	de -10 °C hasta +50 °C	de 0 °C a 50 °C
Efecto de la temperatura	Colocar el selector de temperatura en la temperatura de la madera	Ajustar a la temperatura de la madera	Ajustar automático de la temperatura con el sensor de temperatura
Medición en el sentido del grano o perpendicular al grano	Perpendicular al grano	Perpendicular al grano	Perpendicular al grano

ANEXO 3: Formato de evaluación previa y posterior al secado experimental

REGISTRO DE EVALUACIÓN POSTERIOR AL SECADO EXPERIMENTAL

Especie: _____ Espesor: _____ Procedencia: Bosque Natural
 Ejecutor: _____ Fecha de Evaluación: _____ Plantación
 N° de carga: _____

N°	Cubicación				Defectos de Estructura		Otros Defectos	Observaciones
	E	A	L	CH%	Grietas	Rajaduras	Hongos	
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								

Evaluar los defectos como:

Sin defecto (S)

Moderado (M)

Leve (L)

Grave (G)

ANEXO 4: Ficha técnica de hornos de secado utilizados en la determinación de programas

FICHA TÉCNICA: HORNO PARA SECADO DE MADERA DE 25 pt	
Características generales	<ul style="list-style-type: none"> – Capacidad: 25 pt de madera. – Dimensiones de la cámara: Ancho: 0,7 m x Fondo: 0,8 m x Alto: 0,9 m (madera hasta 2 pies de largo). – Puerta principal de 1 hoja, con paredes de aluminio de 0,8 mm de espesor y aislante térmico con lana de roca para 300°C. – Estructura de soporte interior del horno en aluminio. – Falso techo en aluminio. – Bandeja inferior para drenaje.
Sistema de calentamiento	<ul style="list-style-type: none"> – Resistencias de acero inoxidable – 1 resistencia eléctrica de 500 W. – Ventilación por la parte superior de resistencia. – Cable para soportar altas temperaturas
Sistema de ventilación y humidificación	<ul style="list-style-type: none"> – Ventilación a través de ventilador con motor de 1/8 hp. – Sistema de extracción mediante ventila automática. – Marcos y soportes de ventilador hechos en aluminio. – Sistema de humectación con vapor de agua generado con resistencia eléctrica. – Sistema de extracción de humedad por ventilas con apertura hasta 90° según controlador.
Controlador para horno:	<ul style="list-style-type: none"> – Controlador marca Nigos puede trabajar en modo automático, semiautomático y manual. – Controlador digital que permita visualizar las variables de secado de la cámara con 1 entrada para medición de temperatura, 1 entrada para medición de humedad de equilibrio y 4 puntos para la medición de humedad de la madera. – Con conexión a computadora para control a distancia de los parámetros de secado a través de software.

FICHA TÉCNICA: HORNO PARA SECADO DE MADERA DE 1 m³	
Características generales	<ul style="list-style-type: none"> – Capacidad: 1 m³ de madera. – Dimensiones de la cámara: Ancho: 2,8 m x Fondo: 1,8 m x Alto: 1,8 m (madera hasta 8 pies de largo). – Puerta principal de 2 hojas, paredes y techo de la cámara de 3 pulgadas de espesor en aluminio con aislamiento compuesto por una primera capa de lana de roca de alta densidad y luego 2 capas de lana de vidrio de 2" de espesor. – Estructura de soporte interior del horno en aluminio. – Falso techo en aluminio.
Sistema de calentamiento	<ul style="list-style-type: none"> – Resistencias de acero inoxidable – 2 bancos de resistencias de 6 000 W cada uno. – Ventilación por la parte superior de cada banco de resistencias. – Soportes de acero inoxidable en la parte superior. – Cable para soportar altas temperaturas.
Sistema de ventilación y humidificación	<ul style="list-style-type: none"> – Ventiladores de diámetro 55 cm, Clase H para altas temperaturas (resiste temperaturas mayores a 80°C), con motores de 0,6 hp. – Marcos y soportes de ventilador hechos en aluminio. – Tablero eléctrico para 2 ventiladores con variador de velocidad y pantalla LCD interna. – Sistema de humidificación con aire y agua a presión para pulverización fina y humectación de la cámara a altas temperaturas. – Sistema de extracción de humedad por ventilas con apertura hasta 90° según controlador.
Controlador para horno:	<ul style="list-style-type: none"> – Controlador marca Nigos puede trabajar en modo automático, semiautomático y manual. – Controlador digital que permita visualizar las variables de secado de la cámara, con 2 puntos de medición de temperatura, 2 de humedad y 4 sensores en simultáneo para la medición de la humedad de la madera dentro de la cámara. – Con programador de velocidades para los ventiladores. – Con conexión a computadora para control a distancia de los parámetros de secado a través de software.

ANEXO 5: Clasificación de la madera según densidad básica y contracción volumétrica

Tabla 1

Clasificación de la madera según la densidad básica

Grupo	Rango	Clasificación
I	Menos de 0,30	Muy baja (MB)
II	De 0,31 a 0,40	Baja (B)
III	De 0,41 a 0,60	Media (M)
IV	De 0,61 a 0,80	Alta (A)
V	Más de 0,81	Muy alta (MA)

Fuente: Aróstegui (1982)

Tabla 2

Clasificación de la madera según la contracción volumétrica.

Grupo	Rango	Clasificación
I	Menos de 9	Muy baja (MB)
II	De 9,1 a 11	Baja (B)
III	De 11,1 a 13	Media (M)
IV	De 13,1 a 15	Alta (A)
V	Mas de 15,1	Muy alta (MA)

Fuente: Aróstegui (1982)