



Universidad Nacional de Misiones
Facultad de Ciencias Exactas,
Químicas y Naturales



**CALIDAD ESTRUCTURAL DE LA MADERA DE PINO
HÍBRIDO F₁ *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var.
hondurensis BASADA EN MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS**

Mgter. Rosa Angela WINCK

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y
Naturales de la Universidad Nacional de Misiones para optar al grado
académico de

DOCTOR EN CIENCIAS APLICADAS

Posadas, República Argentina

2023.

Director

Dra. María Elena GAUCHAT

Co-director

Dra. María Cristina AREA

TRIBUNAL EXAMINADOR (Resolución Consejo Directivo N° 543/22)

Dr. Alejandro Gabriel MARTINEZ MEIER	Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias Bariloche (IFAB)-INTA- CONICET
Dr. Patricio MAC DONAGH	Universidad Nacional de Misiones
Dr. Mario Roberto ROSENBERGER	Universidad Nacional de Misiones

DEFENSA ORAL Y PÚBLICA (Disposición N° 0907/23)

Posadas, jueves 06 de julio de 2023.

**CALIDAD ESTRUCTURAL DE LA MADERA DE PINO HÍBRIDO F₁ *Pinus elliottii*
var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* BASADA EN MÉTODOS NO
DESTRUCTIVOS**

Mgter. Rosa Angela WINCK

Lugar de desarrollo del trabajo de tesis

Laboratorio de Microscopía de la Estación Experimental Agropecuaria-INTA

Montecarlo

Av. El Libertador N° 2472, Montecarlo, Misiones, Argentina.

Laboratorio de Tecnología de la Madera (IMAM, CONICET, UNaM, FCF)

Bertoni N° 124, Eldorado, Misiones, Argentina.

COMISIÓN DE SUPERVISIÓN (Resolución Consejo Directivo N° 353/18)

Dra. Juana Graciela MOGLIA Universidad Nacional de Santiago del Estero

Dr. Mario Roberto ROSENBERGER Universidad Nacional de Misiones

Dra. Silvia Estela MONTEOLIVA Universidad Nacional de la Plata

CARRERA DE DOCTORADO EN CIENCIAS APLICADAS

Carrera Acreditada con Categoría "A", por Resolución de la Comisión Nacional de
Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU) N° RESFC-2021-503-APN-
CONEAU#ME.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarme siempre, por permitir que todo suceda según su voluntad y por acompañarme a lo largo de mi vida.

A mi esposo Ramón Silva y a mis hijos Maximiliano y Luana por el ánimo en cada instante, estímulo para emprender este desafío y amor incondicional.

A mis padres que me inculcaron siempre el compromiso, la responsabilidad y perseverancia, estas fueron premisas fundamentales para que no baje los brazos a lo largo de estos años de formación.

A mi directora de tesis, Dra. María Elena Gauchat y a mi co-directora de tesis Dra. María Cristina Area por acompañamiento en el desarrollo de la tesis, asesoramiento y corrección del manuscrito, y, por la buena predisposición en todo momento que me permitió afrontar el arduo trabajo experimental.

Al Mgter. Hugo Enrique Fassola, por su apoyo a lo largo de mi formación, y por transmitir sus admirables conocimientos y experiencias.

A la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) de Montecarlo, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) por el financiamiento para el desarrollo de la investigación, a través de los Proyectos, INTA 2019-PE-E6-I146-001 "Mejoramiento genético de especies forestales cultivadas de rápido crecimiento: un desarrollo clave para el fortalecimiento de la foresto industria nacional", INTA 2019-PE-E7-I148-001 "Procesos y tecnologías sostenibles para el agregado de valor en las cadenas y regiones" e INTA 2019-PE-E1-I016-001. "Desarrollo de una silvicultura sostenible de bosques implantados de alta productividad" y por facilitarme el uso del Laboratorio de microscopía para la evaluación de las características anatómicas, las instalaciones edilicias y equipamientos para efectuar los ensayos no destructivos de la madera.

Al Instituto de Materiales de Misiones (IMAM, CONICET, UNaM, FCF, Laboratorio de Tecnología de la Madera) por facilitarme las instalaciones y equipamientos para la realización de los ensayos mecánicos de la madera.

A la empresa Pindó S.A., quien facilitó el sitio donde oportunamente se instaló uno de los ensayos de progenies y por su colaboración en el mantenimiento del mismo, en el apeo de árboles, transporte, aserrado y secado de la madera.

A los técnicos de la EEA INTA, Cristian Rotundo, Tomas Haberle, Diego Bogado, Jorge Visentini, Marcos Costa, Roberto Kobs y Otto Knebel por la cooperación en las tareas de campo, a Iris Figueredo por la colaboración en las labores de laboratorio. Y muy especialmente a Diego Aquino quien me acompañó en todo el proceso con las tareas de campo, aserrado, ensayos no destructivos y destructivos, y en la preparación de disociados en el laboratorio de microscopía.

A la comisión de supervisión, Dra. Silvia Estela Moteoliva, Dra. Juana Graciela Moglia y Dr. Mario Roberto Rosenberger, por el tiempo dedicado en las correcciones de plan de trabajo y evolución del desarrollo de la tesis, por sugerencias brindadas y sus valiosos aportes en la temática.

A la Mgter. Fidelina Silva, por sus palabras de aliento a lo largo de estos años en el desarrollo de la tesis como compañera de oficina.

A la profesora Mgter. Teresa María Suárez y al profesor Mgter. Constantino Zaderenko por la generosidad en aclarar dudas que fueron surgiendo a lo largo del desarrollo de esta investigación.

A la Ing. Lucía R. Winck por su colaboración en la lectura y correcciones del manuscrito.

A mis compañeros de trabajo del INTA y de la FCF que colaboraron en el desarrollo de otras actividades institucionales, debido a mi mayor dedicación al desarrollo de la tesis.

INDICE

LISTADO DE ABREVIATURAS	VII
LISTADO DE FIGURAS.....	X
LISTADO DE TABLAS	XIII
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT	XVI
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 FUNDAMENTACIÓN RESONANCIA ACÚSTICA PARA MEDIR	2
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1 PLANTACIONES FORESTALES EN ARGENTINA	7
2.2 LA MADERA.....	8
2.2.1 <i>Estructura jerárquica de la madera</i>	8
✓ Nivel molecular (polimérico)	8
✓ Nivel submicroscópico (pared celular).....	9
✓ Nivel microscópico	11
✓ Nivel macroscópico	11
2.3 PROPIEDADES ANATÓMICAS, FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA	11
2.4 CALIDAD DE LA MADERA PARA USOS ESTRUCTURALES.....	13
2.5 MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS COMO HERRAMIENTAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	17
2.6 EVALUACIÓN DE LA MADERA CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS	17
2.7 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS.....	18
2.8 DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EMPLEADOS EN ESTA TESIS.....	19
2.8.1 <i>Clasificación visual estructural</i>	19
2.8.1.1. Normas de clasificación visual estructural.....	20
2.8.2 <i>Descripción de métodos acústicos</i>	21
2.8.2.1 Tiempo de vuelo (TOF del inglés <i>time of flight</i>) para medir el módulo de elasticidad de los árboles en pie.....	22
2.8.2.2 Resonancia acústica para medir el módulo de elasticidad dinámico de los roliizos y piezas aserradas	25
2.8.2.2 Vibración transversal para medir el módulo de elasticidad dinámico de las piezas aserradas...28	
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.....	29
3.2 ESTRATEGIA DE SELECCIÓN DE LAS FAMILIAS.....	30
3.4 ESTRATEGIA DE MUESTREO Y MEDICIÓN DE VARIABLES	33
3.4.1 <i>Selección de muestras (tarugos) para la caracterización morfológica</i>	33
3.4.2 <i>Selección de árboles para apeo (muestreo destructivo) y caracterización física y mecánica de la madera</i>	34

3.4.2.1 Selección de rodajas	35
3.4.2.2 Selección de rollizos y determinación de módulo dinámico en rollizos por resonancia	36
3.4.2.3 Determinación de módulo de elasticidad dinámico en piezas aserradas de escuadrías comerciales con tres técnicas acústicas.....	37
✓ Medición del módulo dinámico por vibración transversal y densidad de la pieza.....	38
✓ Medición del módulo dinámico por el tiempo de vuelo (TOF) de la onda de impacto	40
✓ Medición del módulo dinámico por resonancia acústica	40
3.4.2.4 Determinación del módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática con máquina universal de ensayos en piezas aserradas con escuadrías comerciales.....	41
3.4.2.5 Clasificación visual estructural.....	43
3.4.2.6 Determinación del contenido de humedad, contracción axial radial tangencial y volumétrica del estado estacionado al anhidro y del estado saturado al anhidro, coeficiente de retracción y anisotropía	43
3.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	46
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA EN PIE A LOS 10 Y 11 AÑOS	53
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA A NIVEL ROLLIZOS A LOS 11 AÑOS DE EDAD	59
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA ASERRADA A LOS 11 AÑOS DE EDAD.....	62
4.3.1 Volumen total de las piezas aserradas	62
4.3.2 Clasificación visual estructural y rendimientos por grados de calidad según las normas IRAM 9662-3, IRAM 9670 y SPIB	63
4.3.3 Módulo de elasticidad dinámico obtenido con distintos métodos. Módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática y densidad estacionada medida con el equipo Metriguard®.....	66
4.3.4 Módulos de elasticidad dinámico y estático. Módulo de rotura y densidad estacionada medida con el equipo Metriguard® según sitios estudiados.....	71
4.3.5 Módulos de elasticidad dinámico y estático. Módulo de rotura y densidad estacionada medida con el equipo Metriguard® según familias	72
4.3.6 Módulos de elasticidad dinámico y estático. Módulo de rotura y densidad estacionada medida con equipo Metriguard® según el tipo de pieza (madera interna y externa)	73
4.3.7 Comparación de métodos de medición del módulo de elasticidad.....	75
4.3.8 Modelos de predicción del módulo de elasticidad estático a partir del módulo dinámico..	79
Módulo de elasticidad estático estimado a través del módulo dinámico por resonancia.....	80
4.3.9 Variación del módulo de elasticidad y de rotura según las características visuales.....	84
4.3.10 Correlación entre la velocidad acústica, el módulo de elasticidad (estático y dinámico), el módulo de rotura y la densidad	86
4.3.11 Contracciones, coeficiente de retracción y anisotropía.....	89
4.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA MADERA EN RODAJAS OBTENIDAS DE DIFERENTES ALTURAS DE FUSTE	96
4.4.1 Densidad aparente en probetas pequeñas estandarizadas para la altura de 1,30 m	96
4.4.2 Densidad aparente en probetas pequeñas estandarizadas para las alturas de 0,1 m 1,3 m y 4,5 m.....	101
4.4.3 Variación radial y axial de la densidad aparente básica, anhidra y estacionada para el material de pino híbrido F ₁ INTA-PINDO para los sitios 1 y 2.....	103

4.4.4 Caracterización de los anillos de crecimiento y coloración de la madera.....	107
4.5 COMPARACIÓN DE LOS VALORES EXPERIMENTALES PARA LA RESISTENCIA, RIGIDEZ Y DENSIDAD CON LOS VALORES CARACTERÍSTICOS ESTABLECIDOS POR LA NORMA IRAM 9662-3 PARA PINOS RESINOSOS	110
4.6 CARACTERIZACIÓN MICROSCÓPICAS DE LAS TRAQUEIDAS.....	112
4.6.1 Angulo microfibrilar, ancho, lumen, espesor y proporción de pared celular	112
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	124
5.1 CONCLUSIONES SOBRE MEDICIONES DE ÁRBOLES EN PIE.....	124
5.2 CONCLUSIONES SOBRE MEDICIONES DE CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS.....	124
5.3 CONCLUSIONES SOBRE EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES EN ROLLIZOS	125
5.4 CONCLUSIONES SOBRE CLASIFICACIÓN VISUAL ESTRUCTURAL DE LA MADERA ASERRADA.....	125
5.5 CONCLUSIONES SOBRE LAS PROPIEDADES RESISTENTES DE LA MADERA ASERRADA OBTENIDAS CON DIFERENTES MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS (VIBRACIÓN TRANSVERSAL, RESONANCIA ACÚSTICA Y ONDA DE IMPACTO), Y DESTRUCTIVOS	126
5.6 CONCLUSIONES SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, PORCENTAJE DE ÁREA COLOREADA, ANCHO Y ÁREA DE ANILLOS DE CRECIMIENTO.....	128
5.7 CONCLUSIONES SOBRE RELACIONES ENTRE MÉTODOS DE MEDICIÓN Y DIFERENTES VARIABLES ESTUDIADAS	129
5.8 CONCLUSIONES GENERALES.....	130
CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	132
PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DERIVADA DE LA TESIS	135
PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN QUE ENMARCARON LA TESIS.....	136
FUENTES DE FINANCIAMIENTO DE LA TESIS	137
ANEXOS.....	138
ANEXO 1. CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN VISUAL Y VALORES CARACTERÍSTICOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DENSIDAD POR CLASE DE RESISTENCIA SEGÚN LAS NORMAS IRAM 9662-3 E IRAM 9670. .	138
ANEXO 2. TABLA 1: CARACTERIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DE PROGENIES DE PINO HÍBRIDO F ₁ INTA-PINDO.	143
ANEXO 3. FIGURA 1: RODAJAS PARA CALCULAR EL ÁREA COLOREADA.	144
ANEXO 4. IMÁGENES ILUSTRATIVAS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA EVALUADA.....	145
ANEXO 5. MODELOS PRBADOS Y SELECCIONADOS PARA ESTIMAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO Y LA VELOCIDAD ACÚSTICA DE ÁRBOLES EN PIE A LOS 10 Y 11 AÑOS.....	146
ANEXO 6. SALIDAS DEL INFOSTAT® DE LOS MODELOS PRBADOS PARA EVALUAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN ROLLIZOS.....	155
ANEXO 7. FIGURA 1. GRÁFICO DE CAJAS MEDIAS Y DISPERSIÓN PARA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR VIBRACIÓN TRANSVERSAL (MOEV), POR RESONANCIA (MOER), POR ONDAS DE IMPACTO (MOEI) Y MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO (MOEe) DE PIEZAS INTERNAS Y EXTERNAS.	161
ANEXO 8. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA PARÁMETROS ESTRUCTURALES, MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MÓDULO DE ROTURA A LA FLEXIÓN ESTÁTICA, DENSIDAD ESTACIONADA AL 12 % DE HUMEDAD Y ÁNGULO MICROFIBRILAR SEGÚN SITIOS Y FAMILIAS A LOS 11 AÑOS.....	162

ANEXO 9. MODELOS SELECCIONADOS PARA EL ANÁLISIS DE LOS MÓDULOS DINÁMICOS POR VIBRACIÓN (MOÉV), RESONANCIA (MOÉR) E IMPACTO (MOÉI), MÓDULO DE ELASTICIDAD A LA FLEXIÓN ESTÁTICA (MOÉE), MÓDULO DE ROTURA (MOR) Y DENSIDAD CON EL EQUIPO METRIGUARD® (DENS MET). VALORES CORREGIDOS AL 12 % DE CONTENIDO DE HUMEDAD.	166
ANEXO 10. CORRELACIONES DE PEARSON ENTRE VARIABLES OBTENIDAS A PARTIR DE ÁRBOLES EN PIE, EN PIEZAS ASERRADAS Y EN PROBETAS PEQUEÑAS.....	172
ANEXO 11. MODELOS SELECCIONADOS PARA EL ANÁLISIS DE LAS DENSIDADES BÁSICA, ANHIDRA Y ESTACIONADA AL 12 % DE CONTENIDO DE HUMEDAD A LA ALTURA DE 1,30 M.	173
ANEXO 12. ÁREA PROMEDIO DE ANILLOS DE CRECIMIENTO POR FAMILIAS.....	176
ANEXO 13. FIGURA 1. DISPERSIÓN DE TODOS LOS DATOS DE LAS MEDICIONES DE LOS CARACTERES ANATÓMICOS.	177
ANEXO 14. TABLA 1: SALIDAS DEL INFOSTAT® DEL MODELO UTILIZADO PARA EL ANÁLISIS DEL ÁNGULO MICROFIBRILAR A LOS 7 AÑOS PARA EL SITIO 1.....	178
ANEXO 15. VARIACIÓN DEL ÁNGULO MICROFIBRILAR POR EDAD Y FAMILIA EN AMBOS SITIOS.....	182
ANEXO 16. DELIMITACIÓN DE LA MADERA JUVENIL Y MADURA EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES ANATÓMICAS EVALUADAS.	183
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	184

LISTADO DE ABREVIATURAS

Letras latinas

A, B, C y D: Clase de distancia radial relativa, A=0-25 %, B=25,1-50 %, C=50,1-75 % y D=75,1-100 % del radio, respectivamente.

AMF: ángulo microfibrilar.

An: ancho de traqueidas.

Anis: anisotropía de la contracción.

Ax: axial o longitudinal.

C Vol_{E-An}: Contracción volumétrica del estado estacionado al anhidro (contracción lineal).

CT Vol_{Sat-An}: Contracción total volumétrica del estado saturado al anhidro (contracción máxima).

CH: contenido de humedad.

CR Rd: coeficiente de retracción radial.

CR Tg: coeficiente de retracción tangencial.

CR: coeficiente de retracción.

d: distancia.

DA: densidad anhidra.

DAP: diámetro a la altura de pecho de todos los ejemplares del ensayo.

DB: densidad básica.

DE: densidad estacionada y corregida al 12 % de contenido de humedad.

DensMet: densidad para las piezas de escuadría comercial obtenida con el equipo Metriguard® y corregida al 12 % de contenido de humedad.

DR: distancia relativa del radio respecto a la médula (%).

DS: densidad saturada.

DV: densidad verde.

EEA: Estación Experimental Agropecuaria.

EP: espesor pared celular.

f: frecuencia en Hz.

F₁: material seminal obtenido de la polinización controlada de especies puras (PEE y PCH).

F₂: material seminal obtenido de la polinización libre de híbridos F₁.

FFT: Software Transformada Rápida de *Fourier* (FFT del inglés **Fast Fourier Transform**).

H: altura de todos los ejemplares del ensayo.

HF: altura de fuste de donde se obtuvieron las rodajas (0,10 m; 1,30 m y 4,45 m).

ha: hectárea

Int: interno.

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

IRAM: Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.

L: longitud del cuerpo de prueba.
Lu: lumen de traqueidas.
MLGM: modelos lineales generalizados mixtos.
MLM: modelos lineales generales mixtos.
MND: métodos no destructivos.
MOE: módulo de elasticidad.
MOEd: módulo de elasticidad dinámico.
MOEd10: módulo dinámico de árboles en pie a los 10 años de edad.
MOEd11: módulo dinámico de árboles en pie a los 11 años de edad.
MOEe: módulo de elasticidad global a la flexión estática.
MOEi: módulo de elasticidad dinámico determinado por impacto (TOF).
MOEr: módulo de elasticidad dinámico determinado por resonancia.
MOEv: módulo de elasticidad dinámico determinado por vibración transversal.
MOR: módulo de rotura a la flexión estática.
MOE_k: módulo de elasticidad característico en flexión según la norma IRAM 9662-3.
P: pared celular primaria.
PCH: *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.
PEE × PCH: *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.
PEE: *Pinus elliottii* var. *elliottii*.
PF: punta fina.
PG: punta gruesa.
PP: proporción de pared celular.
r: coeficiente de correlación.
R: coeficiente de determinación.
R1: posición superior del ranking de crecimiento.
R2: posición intermedia del ranking de crecimiento.
R3: posición inferior del ranking de crecimiento.
Rd: radial.
S: pared celular secundaria.
S1, S2 y S3: capas de la pared celular secundaria.
SPIB: Southern Pine Inspection Bureau.
Stg: semitangencial.
T: tiempo.
Tg: tangencial.
TND: técnicas no destructivas.
TOF: tiempo de vuelo de la onda de impacto (TOF del inglés ***time of flight***).
TP: tipo pieza (interna o externa).

Vel res: velocidad acústica determinada por resonancia.

Vol cc: volumen con corteza.

Vol sc: volumen sin corteza.

Vol: volumen.

V: velocidad acústica.

Letra griega

ρ_k : densidad característica según la norma IRAM 9662-3.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Estructura jerárquica de la madera.....	8
Figura 2: a) Estructura de la pared celular de una traqueida. b) Diagrama que muestra la orientación de las microfibrillas en las capas de la pared celular. c) La célula y las capas de la pared celular.....	10
Figura 3: Distribución porcentual aproximada en peso seco de los principales componentes químicos de la pared celular secundaria de una traqueida.....	10
Figura 4: Esquema de una herramienta acústica utilizada para medir el tiempo de vuelo (TOF de su sigla en inglés, time of flight).....	22
Figura 5: Tipos de onda de impacto.....	23
Figura 6: Onda fundamental y ondas derivadas.	26
Figura 7: Diagrama de una herramienta de resonancia acústica utilizada para medir la velocidad acústica en rollizos.....	27
Figura 8: Ubicación de los ensayos 1 y 2 en el país y en la provincia de Misiones.....	31
Figura 9: Esquema de toma de muestras y mediciones de las distintas variables.....	32
Figura 10: a) Marcación de rollizos, b) Trozado y c) Medición de frecuencia natural de vibración resonante de la onda y obtención de rodajas en ambos extremos del rollizo.....	37
Figura 11: a) Medición del contenido de humedad con xilohigrómetro. b) Apilado para posterior medición del moe dinámico.	38
Figura 12: Metriguard® modelo 340 E-Computer.....	39
Figura 13: Esquema de medición del TOF en una pieza de madera aserrada.....	40
Figura 14: a) Pantalla de la tablet con ingreso y salidas de datos; b) Fotografía de la determinación del módulo dinámico por resonancia.	41
Figura 15: Esquema de ensayo para medición del módulo de elasticidad (global) a la flexión estática.	42
Figura 16: Cuerpo de prueba ensayado a la flexión estática.....	42
Figura 17: Marcación de probetas para determinar contenido de humedad y contracciones lineales y volumétricas.	44
Figura 18: Histograma de frecuencias para el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) a los a) 10 y b) 11 años correspondiente al total de árboles en pie.	54
Figura 19: Módulo de elasticidad de los árboles en pie por familias. a) a los 10 años, b) a los 11 años de edad..	55
Figura 20: Histograma de frecuencias para el módulo de elasticidad dinámico determinado por resonancia correspondiente al total de rollizos.....	60
Figura 21: Diagrama de dispersión para el módulo de elasticidad estático vs. módulo de elasticidad dinámico por resonancia. a) con todos datos b) con los datos de piezas internas con resina excluidos del análisis.	68
Figura 22: Histograma de frecuencias para el módulo de elasticidad dinámico obtenido por a) vibración, b) resonancia, c) impacto, d) módulo de elasticidad estático, e) módulo de rotura	

a la flexión estática y f) densidad estacionada obtenida con el equipo Metriguard® correspondiente al total de piezas aserradas y ensayadas.....	70
Figura 23: a) MOE estático versus MOE dinámico por vibración. b) residuos <i>estudentizados</i> para el moee estimado por vibración.....	82
Figura 24: a) MOE estático versus MOE dinámico por resonancia. b) residuos <i>estudentizados</i> para el moee estimado por resonancia.....	83
Figura 25: a) MOE estático versus MOE dinámico por impacto. b) residuos <i>estudentizados</i> para el moee estimado por impacto.....	83
Figura 26: Variación del módulo de elasticidad (a) y módulo de rotura a la flexión estática (b) según el tipo de corte..	85
Figura 27: Variación del módulo de elasticidad (a) y módulo de rotura a la flexión estática (b) según presencia o ausencia de médula..	85
Figura 28: Variación del módulo de elasticidad (a) y módulo de rotura a la flexión estática (b) según cantidad de anillos presentes por piezas.....	86
Figura 29: Histograma de frecuencias para contracción volumétrica del estado estacionado al anhidro correspondiente al total probetas.....	89
Figura 30: Histograma de frecuencias para contracción volumétrica del estado saturado al anhidro correspondiente al total probetas.....	90
Figura 31: Variaciones de las contracciones: axiales, radiales, tangenciales y volumétrica para ambos sitios. A) del estado estacionado al anhidro (lineal), b) del estado saturado al anhidro (máxima).	92
Figura 32: Variación para las contracciones, axiales, radiales, tangenciales y volumétrica del estado estacionado al anhidro por familias, correspondiente al total probetas evaluadas.	93
Figura 33: Variación para las contracciones axiales, radiales, tangenciales y volumétrica del estado saturado al anhidro por familias, correspondiente al total probetas evaluadas.....	94
Figura 34: Variación de los coeficientes de retracción radial y tangencial por familias, correspondiente al total probetas evaluadas..	95
Figura 35: Histograma de frecuencias y curva normal asociada para la densidad básica correspondiente al total de muestras evaluadas a la altura del 1,30 m.	98
Figura 36: Histograma de frecuencias y curva normal asociada para la densidad anhidra correspondiente al total de muestras evaluadas a la altura del 1,30 m.	98
Figura 37: Histograma de frecuencias y curva normal asociada para la densidad estacionada corregida al 12 % de contenido de humedad correspondiente al total de muestras evaluadas a la altura del 1,30 m.....	98
Figura 38: Densidad básica promedio para los sitios 1 y 2 para la totalidad de probetas obtenidas a la altura de 1,30 m... ..	99
Figura 39: Densidad anhidra promedio para los sitios 1 y 2 para la totalidad de probetas obtenidas a la altura de 1,30 m.	100
Figura 40: Densidad estacionada promedio al 12% de contenido de humedad para los sitios 1 y 2 para la totalidad de probetas obtenidas a la altura de 1,30 m.	100

Figura 41: Variaciones de las densidades básica, anhidra y estacionada por familias evaluadas dentro del sitio 1 para la totalidad de probetas (n=516) obtenidas a 3 alturas del fuste (0,1 m, 1,3 m y 4,5 m)..	102
Figura 42: Variaciones de las densidades básica, anhidra y estacionada por familias evaluadas dentro del sitio 2 para la totalidad de probetas (n=519) obtenidas a 3 alturas del fuste (0,1 m, 1,3 m y 4,5 m)..	102
Figura 43: Variación en el sentido radial de las densidades aparentes, básica, anhidra y estacionada para el material de pino híbrido F ₁ inta-pindo para el sitio 1.....	104
Figura 44: Variación en el sentido radial de las densidades aparentes, básica, anhidra y estacionada para el material de pino híbrido F ₁ inta-pindo para el sitio 2..	104
Figura 45: Variación en el sentido axial de las densidades aparentes, básica, anhidra y estacionada para el material de pino híbrido F ₁ inta-pindo para el sitio 1.	105
Figura 46: Variación en el sentido axial de las densidades aparentes, básica, anhidra y estacionada para el material de pino híbrido F ₁ inta-pindo para el sitio 2.	106
Figura 47: Ancho promedio de anillos de crecimiento por familias.....	107
Figura 48: Porcentaje de área coloreada por familia.	109
Figura 49: Porcentaje de área coloreada según altura de fuste.	109
Figura 50: Agrupación de familias similares por a) % de área coloreada. b) por crecimiento.....	109
Figura 51: AMF4 a los 4 años para (a) el sitio 1 y (b) el sitio 2.....	114
Figura 52: AMF11 a los 11 años para (a) el sitio 1 y (b) el sitio 2.....	115
Figura 53: Variación media del ancho, lumen, espesor y proporción de pared celular y ángulo microfibrilar por sitios y edades.	119

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Ranking genético de crecimiento para las 15 familias de ambos sitios.....	31
Tabla 2: Variables medidas sobre árboles en pie a los 11 años de edad para las familias de ambos sitios.	54
Tabla 3: Correlaciones de Pearson para variables medidas en árboles en pie (a nivel árbol, n= 345).	57
Tabla 4: Variables medidas sobre los rollizos basales de 3,15 m de largo de 15 familias de pino híbrido de 11 años de edad provenientes de 2 sitios.	59
Tabla 5: Módulo de elasticidad dinámico por resonancia en rollizos basales a los 11 años de edad para las 15 familias estudiadas provenientes de 2 sitios.....	61
Tabla 6: Correlaciones de Pearson para las variables estudiadas a nivel rollizos (90 rollizos basales).	62
Tabla 7: Cantidad de piezas por escuadría de la madera aserrada.	63
Tabla 8: Clasificación estructural visual por sitios según las normas IRAM 9662-3, IRAM 9670 y SPIB.	64
Tabla 9: Clasificación estructural visual según normas IRAM y SPIB por familias.....	65
Tabla 10: Volumen en % según posición de la pieza y características visuales.	66
Tabla 11: Medidas resúmenes para las propiedades mecánicas y densidad obtenida con el equipo Metriguard® para piezas de escuadrías comerciales.....	69
Tabla 12: Comparación de medias de propiedades físicas y mecánicas para el sitio 1 y 2.....	71
Tabla 13: Comparación de propiedades físicas y mecánicas para piezas de posición interna (tirantes) y externas (tablas).....	74
Tabla 14: Correlaciones de Pearson entre variables obtenidas a partir de árboles en pie, en piezas aserradas y en probetas pequeñas.	87
Tabla 15: Resumen estadístico para los distintos tipos de densidad a la altura de 1,30 m.	96
Tabla 16: Resumen estadístico para los distintos tipos de densidades considerando las 3 alturas de fuste (0,1 m, 1,3 m y 4,5 m).	101
Tabla 17: Comparación de los valores experimentales para la resistencia, rigidez y densidad con los valores característicos especificados por la norma IRAM 9662-3.....	111
Tabla 18: Características microscópicas promedio a los 4, 7, 10 y 11 años de edad para los 150 árboles muestreados.....	113
Tabla 19: Comparación de medias del AMF por edades para los sitios 1 y 2.....	115
Tabla 20: Correlaciones de Pearson para AMF de las 15 familias.....	117

RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis fue evaluar las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de 15 familias de pino híbrido F₁ INTA-PINDO de 11 años de edad, a través de diferentes métodos no destructivos y destructivos. Además, identificar las familias con características estructurales más adecuadas para usos sólidos a edades tempranas, con la finalidad de incorporarlas como criterio de selección en un programa de mejora genética. Y hallar modelos de ajustes predictivos del módulo de elasticidad estático a partir del módulo de elasticidad dinámico obtenido con tres métodos no destructivos. Los materiales estudiados fueron seleccionados en dos ensayos de progenies establecidos en el nordeste argentino, considerando 3 posiciones del ranking genético de crecimiento (superior (R1), medio (R2) e inferior (R3)). Para lograr dicho objetivo, la determinación de las características anatómicas fue realizada sobre una muestra de tarugos radiales de 5 mm de espesor obtenidos de 150 árboles a la altura de 1,30 m, abarcando el rango diamétrico y analizando las edades 4, 7, 10 y 11 años. La evaluación de las propiedades físico-mecánicas se realizó a nivel de árbol en pie, rollizos, madera aserrada de escuadrías comerciales y probetas estandarizadas. A nivel árbol las muestras estuvieron integradas por 345 ejemplares para la medición de la velocidad acústica. A nivel rollizos por 90 unidades (obtenidas inmediatamente por encima de 1,30 m) para la determinación del módulo de elasticidad por resonancia. A nivel piezas aserradas por 274 tablas para la obtención del módulo de elasticidad dinámico (3 métodos acústicos), módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática, y, clasificación visual. A nivel probetas por 270 rodajas obtenidas a las alturas de 0,10 m, 1,30 m y 4,45 m, en las cuáles se estudiaron las características de los anillos de crecimiento y la coloración. Luego, con esas rodajas se prepararon 1.035 probetas estandarizadas para la determinación de la densidad.

La estabilidad dimensional y el contenido de humedad se determinaron con 320 y 80 probetas, respectivamente, obtenidas de las piezas ensayadas mecánicamente. Se investigó paralelamente, el efecto de los parámetros visuales sobre las propiedades mecánicas, confirmándose que la presencia de nudos, médula, infiltraciones de resinas, posición de la muestra en el rollizo y anillos de crecimiento más ancho constituyen las singularidades de mayor relevancia que influyen negativamente sobre la rigidez y resistencia de la madera estudiada. Se analizaron las diferencias en la calidad de la madera interna y externa. Asimismo, se utilizaron normas vigentes en Argentina y normas extranjeras para la clasificación visual de maderas del género *Pinus*.

En la comparación de este taxón con otras especies de pinos cultivadas en la región del nordeste argentino se verificó que la madera de pino híbrido F₁ INTA-PINDO logra un comportamiento físico mecánico similar. También se compararon las propiedades mecánicas obtenidas con diferentes métodos acústicos, constatándose la efectividad de

estos dispositivos en la predicción del módulo de elasticidad estático, obteniéndose mayor precisión para las piezas externas. Las técnicas acústicas permitieron obtener resultados consistentes comparados con aquellos provenientes de la máquina universal de ensayos. Respecto de la eficiencia de la densidad y de los parámetros mecánicos para predecir la rigidez de la madera a la flexión, se encontró una mayor correlación entre módulo dinámico y estático, que entre el módulo de rotura y densidad.

La normativa argentina vigente demostró ser aplicable a este taxón, aunque son necesarias determinaciones complementarias de otras propiedades. Pero los resultados sugieren que deberían hacerse ajustes para el parámetro módulo de elasticidad por cada clase resistente. A través de métodos no destructivos para evaluación de madera, se identificaron 5 familias pertenecientes a las posiciones 1 y 2 del ranking genético de crecimiento con características deseables (mayor velocidad acústica y menor AMF) para un mejor desempeño estructural, además de mayor crecimiento volumétrico.

El uso del *TreeSonic* permitió detectar variaciones en las propiedades de madera debido al sitio y al material genético.

A futuro, se espera evaluar la calidad estructural de los rollizos y tablas obtenidas en todo el perfil del fuste ejemplares de pino híbrido F₁ INTA-PINDO, considerando el diámetro mínimo aprovechable para la industria del aserrado, abarcando distintos manejos silvícolas y ensayos ubicados en sitios contrastantes.

Palabras clave: Características morfológicas, Densidad, Rigidez, Resistencia, Clasificación visual por resistencia, Estabilidad dimensional.

ABSTRACT

The main objective of this thesis was to evaluate the anatomical, physical and mechanical properties of the wood of 15 families of 11-year-old F₁ INTA-PINDO hybrid pine, through different non-destructive and destructive methods. Additionally, to identify families with more suitable structural characteristics for solid uses at early ages, in order to incorporate them as a selection criterion in a genetic improvement program. And to find predictive adjustment models for the static modulus of elasticity based on the dynamic modulus of elasticity obtained with three non-destructive methods. The materials studied were selected in two progeny trials established in northeastern Argentina, considering three positions of the genetic growth ranking (top (R1), middle (R2) bottom (R3)). The anatomical characteristics determination was carried out on a sample of 5 mm thick radial cores obtained from 150 trees at 1.30 m height, covering the diameter range and analyzing the 4, 7, 10, and 11 years old to achieve this objective. The physical-mechanical properties evaluation was carried out at the level of the standing trees, on logs, and sawn wood from commercial squares and wood-standard samples. At the tree level, the samples were made up of 345 specimens for acoustic velocity measurement. Nineteen units, obtained immediately above 1.30 m, were taken at the log level to determine the modulus of elasticity by resonance. At sawn pieces level were took 274 boards for dynamic modulus of elasticity (3 acoustic methods), modulus of elasticity, and rupture to static bending measurements, and, visual classification. At the wood standard level, the sample consisted of 270 slices obtained at 0.10, 1.30, and 4.45-meter heights, in which growth rings and coloration characteristics were studied. Then, 1035 standardized samples were prepared with these slices for density determination.

Dimensional stability and moisture content were determined on 320 and 80 specimens (respectively) obtained from the mechanical pieces tested. In parallel, the effect of the visual parameters on mechanical properties was studied, confirming that the presence of knots, pith, resin infiltrations, sample position in the log, and wider growth rings constitute the singularities of great relevance that negatively influence on the stiffness and strength of the studied wood. The internal and external wood quality differences were analyzed. *Pinus* genus woods visual classification was accomplished using the current foreign and Argentina regulations.

Comparing this taxon with other cultivated pine species in the northeastern region of Argentina, the F₁ INTA-PINDO hybrid pinewood achieves a similar physical-mechanical behavior. The mechanical properties obtained with different acoustic methods were also compared, confirming the effectiveness of these devices in predicting the static modulus of elasticity, obtaining greater precision for the external pieces. The acoustic techniques allowed consistent results compared with those obtained using the universal testing machine.

Regarding the efficiency of density and mechanical parameters to predict the bending stiffness of wood, was found a higher correlation between dynamic and static modulus than between modulus of rupture and density.

The current Argentine regulations proved to be applicable to this taxon, although complementary determinations of other properties are necessary. But the results suggest that adjustments to the modulus of elasticity should be made for each resistant class.

Through non-destructive methods for wood evaluation, 5 families belonging to positions 1 and 2 of the genetic growth ranking with more desirable characteristics (higher acoustic speed and lower AMF) for better structural performance were identified, in addition to higher volumetric growth.

The TreeSonic allowed us to detect variations in wood properties due to site and genetic material.

In the future, it is expected to evaluate the structural quality of the logs and boards obtained in the entire profile of the hybrid pine F₁ INTA-PINDO shaft, considering the minimum usable diameter for the sawmilling industry, covering different forestry management and from trials located in contrasting sites.

Key words: Morphological characteristics, Density, Stiffness, Strength, Visual strength grading, Dimensional stability.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteo del problema

La utilización de la madera en la construcción presenta ciertas ventajas respecto a otros materiales tradicionales, ya que constituye una materia prima renovable, reciclable, capturadora y fijadora de dióxido de carbono, además de la reducción de los tiempos de ejecución de las obras (1,2). La madera es utilizada en distintas formas, en rollos, aserrada, laminada, contrachapada, tableros reconstituidos, mueblería en general, postes, como así también en la industria de la pulpa y el papel, y más recientemente en biorrefinerías (1). Se puede emplearla con fines multipropósito, como sustituto de otros materiales (acero, cemento, plástico y aluminio) y como fuente de energía renovable para la mitigación del CO₂ (3).

Para satisfacer la demanda de madera, se recurren a los bosques implantados de alta productividad (1), que a su vez cumplan con los requerimientos de acuerdo a su destino final.

En general, se recurre al cultivo de especies de rápido crecimiento y con buena adaptabilidad a distintos sitios. En este sentido, el pino híbrido ha despertado el interés de los productores y de la foresto industria, dado su rentabilidad económica independientemente del destino de su madera. Las generaciones F₁ y F₂ de pino híbrido PEE × PCH producidos en Australia han expresado su potencial de crecimiento en la región Mesopotámica, con una alta tasa de crecimiento medio anual y menores turnos de rotación. Han registrado un incremento medio anual de más de 40 m³/ha/año (4). Además, han demostrado excelentes cualidades de rectitud de fuste, diámetro de ramas y estructura de copa (5). Con calidad de madera intermedia entre las dos especies parentales (6,7). Varias industrias locales valoran positivamente su madera tanto para el mercado internacional como el nacional (8). Por otro lado, su madera resulta atractiva para la producción de pulpa, fabricación de machimbres, tableros reconstituidos y madera contrachapada, adecuándose a la mayoría de los usos. Si, conjuntamente, la madera de pino híbrido F₁ de desarrollo local, lograra los estándares de calidad para fines estructurales, posibilitaría el alcance de un nuevo nicho de mercado para este taxón. Para usos estructurales se requieren de especies que alcancen determinados valores característicos de propiedades físicas y mecánicas especificados en las normas IRAM 9662-3 e IRAM 9670 para pinos resinosos (9,10). Es importante mencionar que al año 2019, los materiales de pino híbrido F₁[♦] más antiguos estaban instalados en ensayos (11 años de edad) y en plantaciones comerciales que no superaban los 7 años de edad.

[♦] F₁: material seminal obtenido de la polinización controlada de especies puras (PEE y PCH).

Esta tesis generó información sobre las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de pino híbrido entre *Pinus elliottii* (Engelm) var. *elliottii* y *Pinus caribaea* (Morelet) var. *hondurensis* (PEE × PCH), en adelante F₁ INTA-PINDO y de la aptitud de la madera para usos estructurales.

1.2 Fundamentación

La existencia de pocos estudios y con resultados parciales referidos al comportamiento estructural del pino híbrido de origen australiano cultivado en la región del nordeste argentino y la escasa o nula información sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de estos materiales “nuevos” PEE × PCH, F₁ INTA-PINDO (11–20), demuestran la necesidad imperiosa de iniciar esta investigación.

Por otra parte, las mayores tasas de crecimiento alcanzadas por el mejoramiento genético y el manejo silvícola adecuado, permiten disminuir el turno de corta con incrementos en la productividad de madera respecto a plantaciones obtenidas a partir de material no mejorado (21,22). Sin embargo, los antecedentes refieren que las especies de rápido crecimiento permiten con frecuencia piezas con mayor presencia de médula y gran proporción de madera juvenil, que se caracteriza por exhibir propiedades físico-mecánicas reducidas respecto a la madera madura (23). Esto conduce a la obtención de piezas con valores bajos de módulo de elasticidad, factor que conlleva a dificultades para alcanzar los estándares propuestos por las normas IRAM 9662-3 y 9670 para pinos resinosos (9,10). Esta particularidad también fue observado por Fank (24) para las especies de *Pinus elliottii* (PE) y *Pinus taeda* (PT) cultivados en la región nordeste argentina, por Ballarin *et al.* (25) y Moya *et al.* (26) en Brasil y Uruguay, respectivamente.

El presente estudio aporta nuevos conocimientos sobre los caracteres de la madera del pino híbrido, complementando los trabajos de investigación anteriormente realizados para el crecimiento, características de copa y rectitud de fuste.

Actualmente existe escasa información y una creciente demanda de madera para uso estructural. Este estudio permite además incrementar el abanico posible de especies que pueden estar insertas en el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (CIRSOC 601), contribuyendo a la promoción de forma masiva al uso de la madera en la construcción.

Por otro lado, debido al costo elevado para determinar las propiedades de la madera por los métodos tradicionales, se recurren a los métodos no destructivos (MND) como tecnologías complementarias de evaluación de maderas. Merlo *et al.* (27); Matheson *et al.* (28), y, Evison

y Apiolaza (29) demostraron la efectividad de los MND en la caracterización de la madera. Los métodos acústicos son ampliamente utilizados en Argentina y en el mundo para la evaluación de distintos materiales, por ser relativamente económicos, rápidos, robustos y fáciles de usar en el campo (30–32). Siendo algunos más automatizados que otros (33,34). Estos pueden ser dispositivos portátiles o instalaciones en aserraderos o plantas de procesamiento de madera, más recientemente, accesorios para cabezal de cosechadoras (35). Eckard *et al.* (36) utilizando el *Tree Sonic* y el Resistógrafo (en *P. taeda*) y Chen *et al.* (37) con la velocidad acústica y el Pilodyn (en abetos) realizaron la selección de los mejores materiales para usos sólidos en base a la determinación indirecta del módulo de elasticidad (MOE), módulo de rotura (MOR) y la densidad de la madera. Asimismo, Chen *et al.* (37) para *Picea abies* observaron correlaciones genéticas (r_g) altas entre velocidad acústica y densidad ($r_g = -0,96$) y con el ángulo microfibrilar (AMF) ($r_g = -0,94$) de la madera. Los autores Eckard *et al.* (36) y Chen *et al.* (37,38) indicaron que la velocidad acústica de árboles en pie puede proporcionar una predicción confiable de la rigidez de la madera. Varios autores han reportado una correlación positiva y significativa entre la rigidez de la madera y la velocidad de la onda acústica (31,35,39,40). A mayor velocidad acústica mayor rigidez de la madera (41). También los autores Gapare *et al.*; Dungey *et al.*; Merlo *et al.*; Yin *et al.*; Wessels *et al.*; Watt *et al.* y Evans e Ilic *et al.* (34,42–47) expresaron que el MOE, MOR, densidad y AMF definen la calidad estructural de madera y son características altamente heredables.

El empleo y la validación de los MND para la evaluación del pino híbrido F₁ desarrollado localmente, que permita predecir los valores de mejora genética de la calidad estructural a temprana edad, contribuye a la mejora de la competitividad del sector forestal y brinda herramientas que permiten evaluar las estrategias de mejoramiento a seguir.

La información generada sobre aspectos tecnológicos de la madera de este taxón permitirá su introducción en los programas de mejora, y de esta manera acortar los turnos de corta sin que las propiedades de resistencia de la madera sean afectadas negativamente. Este es un aspecto que representa un gran aporte para el área de tecnología de la madera y es de relevancia para la región. Beneficiará a la comunidad científica, al área de mejoramiento genético, a la industria de la construcción, a los pequeños, medianos y grandes productores que pretenden cultivar pino híbrido. Asimismo, los conocimientos generados podrían ser de utilidad al momento de la actualización de normativas nacionales vigentes sobre calidad de madera para usos estructurales y/o incluso la posibilidad de la incorporación de este taxón a las normas existentes.

Se evaluó la calidad estructural de la madera de pino híbrido F₁ INTA-PINDO, sobre árboles en pie, rollizos y piezas aserradas de escuadrías comerciales, recurriendo a distintas técnicas de medición, con el propósito de verificar su aptitud para uso en construcciones.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de 15 familias (abarcando todo el ranking genético de crecimiento) de pino híbrido F₁ INTA-PINDO de 11 años de edad, a través de diferentes métodos no destructivos y destructivos. Además, identificar familias con características estructurales más adecuadas para usos sólidos a edades tempranas, con la finalidad de incorporarlas como criterio de selección en un programa de mejora genética. También de hallar modelos de ajustes predictivos del módulo de elasticidad estático a partir del módulo de elasticidad dinámico obtenido con tres métodos no destructivos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar la calidad de la madera para uso estructural en árboles en pie de 15 familias de pino híbrido mediante el método no destructivo de la velocidad acústica.
- Evaluar las características morfológicas: ángulo microfibrilar, espesor y proporción de pared celular, lumen y ancho total de las traqueidas a la altura de 1,30 m.
- Determinar el módulo de elasticidad dinámico de los rollizos basales mediante la técnica no destructiva de “resonancia acústica”.
- Evaluar las propiedades tecnológicas resistentes con diferentes métodos no destructivos (vibración transversal, resonancia y ondas de impacto), destructivos, y técnicas de clasificación visual estructural en piezas aserradas de escuadrías comerciales.
- Determinar el porcentaje de área coloreada, ancho de anillos de crecimiento, estabilidad dimensional, densidad básica, estacionada, anhidra y saturada a los 0,10 m, 1,30 m y 4,45 m de la altura del fuste.
- Establecer relaciones entre diferentes variables estudiadas, a nivel árbol, rollizo, piezas aserradas de escuadrías comerciales y probetas.
- Plantear modelos empíricos de regresión lineal simple y múltiple que relacionen el módulo de elasticidad dinámico con el módulo de elasticidad estático, con la finalidad

de constatar la efectividad de los equipos no destructivos para evaluar la calidad estructural de la madera.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Plantaciones forestales en Argentina

Según los datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP), al año 2019 la Argentina contaba con 1,37 millones de hectáreas de plantaciones forestales, de las cuales un 78 % se encuentra en las provincias de las regiones Mesopotámica y Delta del Paraná. Dentro de las principales especies forestales cultivadas se encuentran los géneros *Pinus* (62 %); *Eucalyptus* (26 %); *Salix* y *Populus* (10 %) y el resto agrupa a otras especies (48). Por otro lado, la Secretaría de Agroindustria indica que el 58 % de las extracciones totales de madera (12.589.587 t) corresponden al género *Pinus* (49). Las provincias de Misiones y Corrientes, aportan el 72 % del total de las extracciones de madera en el país. Las coníferas de importancia económica más utilizadas para plantaciones forestales en dichas provincias son *Pinus taeda* L. y *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm (PEE), por su buen crecimiento y adaptación. En menor escala se cultiva F₂* de pino híbrido desarrollada en Australia, por cruzamientos libres de individuos F₁^ del híbrido entre *P. elliottii* var. *elliottii* y *P. caribaea* var. *hondurensis*. Actualmente la superficie implantada con pino híbrido alcanza aproximadamente 21.000 hectáreas (50). En el año 1.997, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) estableció una red de ensayos de productividad con pino híbrido en diferentes sitios de la región mesopotámica. En estos ensayos, los pinos híbridos F₁ y F₂ australianos han demostrado un alto potencial de crecimiento, rectitud de fuste, diámetro de ramas y estructura de copa (5). En el año 2.004 el INTA y la empresa PINDO S.A. iniciaron un programa de hibridaciones para la obtención de familias híbridas mediante cruzamientos controlados entre individuos de *P. elliottii* var. *elliottii* y *P. caribaea* var. *hondurensis* adaptados localmente. Dicho programa al año 2.016 contaba con casi 400 familias F₁, que han sido evaluadas y ordenadas por su desempeño en crecimiento (51). La generación de este “nuevo” híbrido F₁ INTA-PINDO desarrollado localmente implica la realización de diferentes estudios relacionados con el crecimiento y la calidad de su madera. Sin embargo, se ha generado poca información sobre las propiedades de la madera de dicho material genético (11,12). Dado la escasa información existente (11,12,14,15,18–20) relacionado a la calidad estructural de la madera de pino híbrido F₁ INTA-PINDO, esta tesis aborda estudios de las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de estos materiales.

*F₂: material seminal obtenido de la polinización libre de híbridos F₁.

^ F₁: material seminal obtenido de la polinización controlada de especies puras (PEE y PCH).

2.2 La madera

La madera consiste en una estructura jerárquica y sus propiedades pueden ser analizadas en 4 niveles o escalas de observación: molecular, submicroscópico, microscópico y macroscópico. En la Figura 1 se ilustra la estructura jerárquica de la madera a 3 niveles y las respectivas escalas de estudios, macroscópico (árbol, tronco); microscópico y submicroscópico (microfibrillas de celulosa). La madera es un material biológico de carácter anisótropo, que forma un tejido leñoso, fisiológicamente inactivo, basado **en una estructura jerárquica** y compleja, con microfibrillas de celulosa (entre 65 y 70 %) y lignina (entre 25 y 30 %) como sus componentes más básicos, además de hemicelulosas (entre 25 y 30 %) y extractivos (entre 3 y 5 %) (52). Las proporciones de los componentes varían entre latifoliadas y coníferas. La estructura celular interna de estos dos grupos difiere, y consecuentemente, las propiedades físicas y mecánicas son muy distintas entre especies y con variaciones entre y dentro de un mismo árbol. Por su carácter anisotrópico, sus propiedades deben ser analizadas en las tres direcciones, transversal, radial y tangencial.

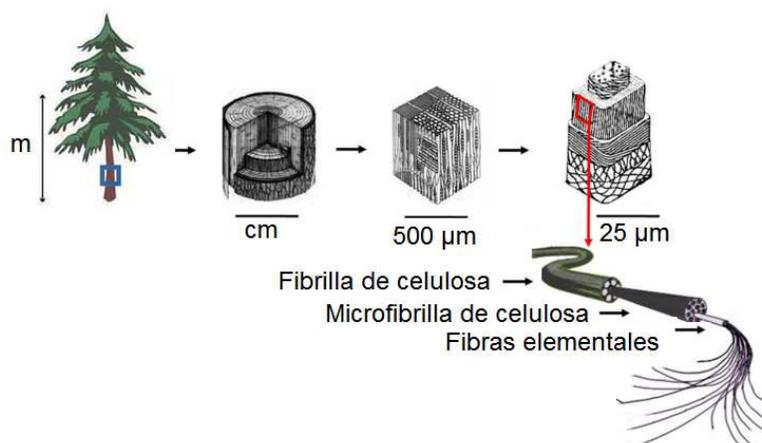


Figura 1: Estructura jerárquica de la madera. Adaptada de Gonzales del Campo, 2017 (53), Rowland y Roberts, 1972 (54).

2.2.1 Estructura jerárquica de la madera

A continuación, se describe la estructura jerárquica de la madera en 4 niveles: molecular, submicroscópico, microscópico y macroscópico.

✓ Nivel molecular (polimérico)

La madera es un material complejo, de **estructura jerárquica** constituida principalmente de polímeros naturales, celulosa, hemicelulosas y lignina. Las propiedades físicas y químicas de los componentes estructurales juegan un rol importante en la resistencia de la madera.

- ❖ Celulosa: es un polímero de glucosa con enlaces β 1-4, formando cadenas lineales dispuestas paralelamente y unidas entre sí por uniones puente de hidrógeno. Es el componente con mayor grado de polimerización, y responsable directo de la resistencia de las fibras.
- ❖ Hemicelulosas: son polisacáridos, poseen cadenas lineales con ramificaciones y de menor grado de polimerización que la celulosa. Se encuentran en estrecha asociación con la lignina, entre fibrillas de celulosa.
- ❖ Lignina: es un polímero tridimensional de unidades fenólicas, constituye el componente más hidrofóbico de la pared celular, de naturaleza adhesiva. Su principal función es mantener unidas a las fibras en la madera y mantener ligados a los polisacáridos en la pared celular. Es el componente fundamental para mantener la resistencia y rigidez de la madera cuando se introduce agua en el sistema, ya que, debido a su naturaleza hidrofóbica, posee la capacidad de limitar el acceso del agua a los carbohidratos y por lo tanto a la estructura uniones puente de hidrógeno.

✓ **Nivel submicroscópico (pared celular)**

La pared celular está constituida de millones de cadenas poliméricas de celulosa, que forman microfibrillas cristalinas rodeadas de hemicelulosas (no cristalinas) e incrustadas en lignina amorfa.

Estructura de la pared celular: Las paredes celulares constan, en general, de dos capas, una capa primaria muy delgada (P) y una capa secundaria (S). Las células están "unidas" entre sí por la lámina media, formada principalmente de lignina. La pared celular secundaria (S) de las fibras y traqueidas, a su vez, se divide en tres capas: la S1 fina y contigua a la pared primaria, la S2 de mayor espesor y la capa S3 de espesor semejante a la S1, cercana al lumen, que constituye la cavidad central de la célula. Las distintas capas de la pared celular presentan características y composición química diferente, así como orientación distinta de las microfibrillas (Figura 2a, 2b y 2c y Figura 3).

La capa S1 representa 5-10 % del espesor de la pared celular secundaria y sus microfibrillas están orientadas en forma prácticamente horizontal. Se considera que la capa S2 es la determinante del comportamiento físico-mecánico de la madera por **tres razones principales**, 1) **ocupa aproximadamente entre el 80-90 % del espesor de pared celular secundaria**; 2) **está constituida mayormente por celulosa**, que puede superar el 50 %; 3) **las microfibrillas están orientadas formando un ángulo entre 15-30° respecto al eje de**

las fibras (denominado ángulo microfibrilar: AMF). La lámina media y la pared primaria (LM+P) están compuestas principalmente por lignina, con bajo contenido de celulosa y hemicelulosa. La pared secundaria S1, presenta mayoritariamente contenido de celulosa y hemicelulosa. La capa S2 presenta el mayor contenido de celulosa, y menor contenido de hemicelulosa y lignina que la S1. La S3 muestra una disminución en el contenido de celulosa y un aumento de la hemicelulosa, pudiendo presentar la misma concentración de lignina que la S2 (Figura 3) (55).

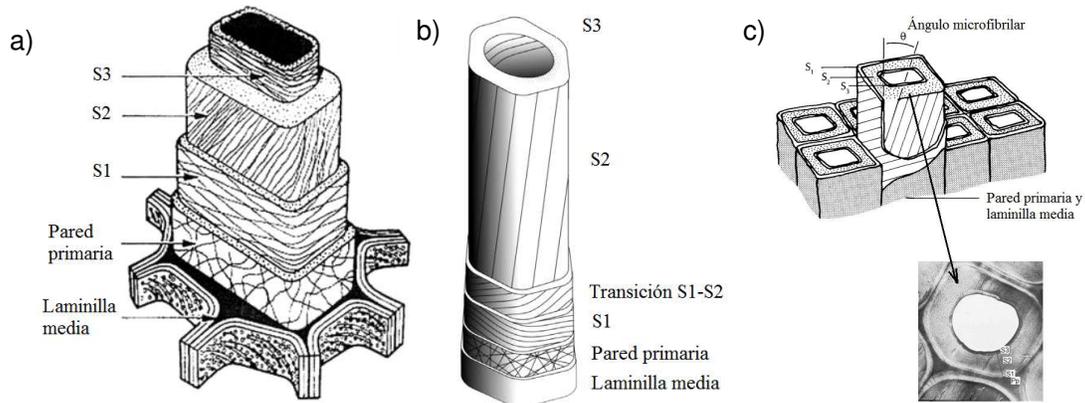


Figura 2: a) Estructura de la pared celular de una traqueida. b) Diagrama que muestra la orientación de las microfibrillas en las capas de la pared celular. c) La célula y las capas de la pared celular. Figuras tomadas de a) Butterfield, 1998 (56), b) Donaldson, 2008 (57) y c) Walker y Butterfield, 1995 (58).

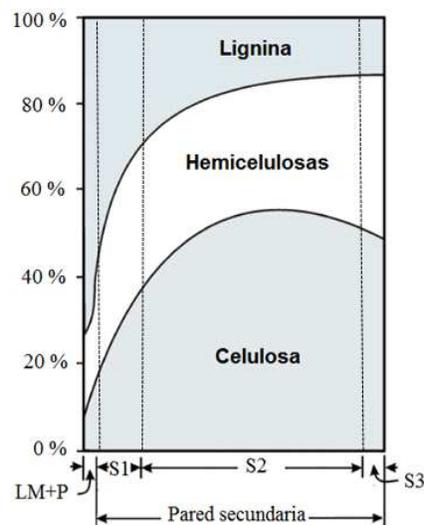


Figura 3: Distribución porcentual aproximada en peso seco de los principales componentes químicos de la pared celular secundaria de una traqueida. Adaptada de Panshin y De Zeeuw, 1980 (55).

✓ Nivel microscópico

A nivel microscópico, el tronco está compuesto por millones de células individuales, alineadas más o menos paralelas al eje del árbol. Las células tienen una relación de longitud a ancho de aproximadamente 100:1 para coníferas. La estructura de la madera de coníferas es mucho más simple en comparación con las latifoliadas. Consta de hasta un 95 % de traqueidas verticales con longitudes desde 2,5 a 7 mm, hasta un 5 % de células de radios horizontales y algunos canales de resina. Las células están organizadas y orientadas para diferentes funciones. En coníferas las traqueidas proporcionan el soporte estructural y la conducción de líquido en la madera (sistema axial). Mientras que, las células parenquimáticas radiales, y en algunas coníferas traqueidas radiales cumplen las funciones de almacenamiento y traslado de sustancias. Esta combinación de células de distintas formas y funciones (soporte, conducción, transformación y almacenamiento) hace que la madera sea considerada como un material heterogéneo y le confiere un comportamiento anisotrópico.

✓ Nivel macroscópico

Igual que al nivel microscópico, macroscópicamente la madera también debe ser estudiada en las tres direcciones de corte, transversal, radial y tangencial.

La estructura macroscópica de un árbol de coníferas, está compuesto por a) corteza externa, constituida por células muertas, b) corteza interna o líber cuya función consiste en la circulación de la savia descendente, c) cambium, radica en una capa delgada de células vivas responsables del crecimiento del árbol, que produce la madera o xilema hacia el interior y el floema hacia el exterior, y d) leño del árbol, formado por distintos tipos y disposiciones de elementos celulares, con variaciones radiales desde la médula hacia la corteza y longitudinalmente desde la base a la copa del árbol. En coníferas, macroscópicamente es posible visualizar en el corte transversal los anillos de crecimiento, cuyas características influyen en la densidad y en propiedades mecánicas de la madera.

2.3 Propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de la madera

Las **propiedades anatómicas** se rigen básicamente por la estructura de la pared celular secundaria, teniendo en cuenta la composición química, la disposición y orientación de los elementos que conforman a la pared celular, y principalmente la capa S2. **El ángulo microfibrilar (AMF)** es considerado el más importante por su influencia en las propiedades físicas y mecánicas de la madera por las razones anteriormente mencionadas (59–61). Cada especie vegetal leñosa está constituida por una estructura particular (células de diversas formas, espesores y orientación), lo que le confiere a la madera un comportamiento físico-mecánico diferente. También la influencia de las condiciones particulares de crecimiento debido al clima, suelo y tratamientos silvícolas, explican su naturaleza heterogénea y

anisotrópica, con las consecuentes diferenciaciones en sus propiedades físicas y mecánicas según las direcciones consideradas (35,62).

Las **propiedades físicas** de la madera son aquellas que determinan su comportamiento ante los factores que intervienen en el medio ambiente natural, sin que este actúe química ni mecánicamente en su estructura interna (63). Dentro de las propiedades físicas se encuentran el peso específico aparente o densidad, contenido de humedad, contracción, hinchamiento y anisotropía. **La densidad** es el descriptor de mayor relevancia, independientemente del objetivo industrial, sea producción de madera sólida o pulpa (46,64). Está asociada con el rendimiento y calidad de producto final. La densidad puede variar dependiendo de la especie, individuo y ubicación dentro del árbol, con mayores variaciones en el sentido radial respecto al longitudinal (63).

Las **propiedades mecánicas** hacen referencia al comportamiento de la madera, cuando sobre ella actúan cargas o sollicitaciones externas, principalmente a las deformaciones (63). Se pueden mencionar las propiedades elásticas, de resistencia, dureza y desgaste. El comportamiento mecánico de la madera pueden ser afectado por diferentes factores, como los genéticos, silvícolas, edad, contenido de humedad, componentes químicos y anatómicos (35,65). Debido a la naturaleza ortotrópica de la madera, las propiedades mecánicas son diferentes según la dirección longitudinal, radial y tangencial (66). Dentro de las propiedades mecánicas, los ensayos a la flexión estática son los más utilizados. Consisten en una tensión aplicada a una pieza de madera que produce una deformación proporcional a la tensión (hasta el límite elástico), y la relación entre tensión y deformación se denomina módulo de elasticidad (MOE). Este parámetro expresa una medida de la capacidad de una pieza para resistir a la deflexión. La norma IRAM 9663 (67) presenta 2 métodos para la determinación del módulo de elasticidad a la flexión estática. El módulo de elasticidad a la flexión pura (módulo de elasticidad local) y el módulo de elasticidad global. Los resultados del ensayo de resistencia a la flexión pura están sujetos a errores de medición, debido a la necesidad de una mayor precisión en la determinación de las deformaciones. Además, en este ensayo se tiene en cuenta una fracción pequeña del material. Mientras que, en la determinación del módulo de elasticidad global interviene el esfuerzo de corte, y es representativo de toda la pieza sometida al ensayo. Por lo tanto, sujeto a menores errores de medición y con la ventaja adicional de la facilidad en la medición de la deformación durante el ensayo. Por otra parte, el módulo de rotura (MOR), es la capacidad máxima de carga de la madera en flexión (66). Cuando una pieza de madera es sometida a un ensayo a la flexión estática, se producen en ella tres esfuerzos, de tracción, produciendo un alargamiento en la parte inferior de la pieza, de compresión, ocasionando un acortamiento longitudinal en la parte superior de la misma, y un

esfuerzo de corte o cizalla en el centro del cuerpo de prueba. Ante la aplicación de cargas a la madera, se pueden observar distintos comportamientos. Bajo cargas reducidas, la madera se deforma de acuerdo a la ley Hooke, la deformación es proporcional al esfuerzo o carga por unidad de área. La relación entre esfuerzo y deformación en la región elástica es lineal y en esta zona la madera presenta un comportamiento elástico. Cuando la carga sobrepasa un valor determinado, denominado límite de proporcionalidad o límite elástico, se produce un deslizamiento viscoso del material leñoso siguiendo la ley de Newton. En este escurrimiento o fluencia, la estructura interna permanece continua y los esfuerzos están fundamentalmente relacionados a la velocidad de deformación. En esta etapa la madera comienza a comportarse como un material plástico, con deformación irreversible y el tiempo de duración de la carga es de gran importancia. Al agregarse más carga a la pieza, el deslizamiento del material leñoso ocurre a una mayor velocidad, acentuándose la deformación plástica irreversible. Al seguir aumentando la carga, ocurre la rotura de la pieza. La tensión en que se produce este fenómeno se denomina resistencia máxima de la madera o módulo de rotura (MOR) (68). Tanto las propiedades físicas como mecánicas, están íntimamente vinculadas con la disposición y orientación de los elementos que forman la pared celular (propiedades anatómicas) y con la composición química de las sustancias presentes en la pared celular (propiedades químicas).

2.4 Calidad de la madera para usos estructurales

La palabra “calidad” de la madera resulta muy ambigua si no existe un objetivo claro de uso final de la materia prima. Es un término amplio y generalmente se define por sus propiedades (anatómicas, químicas físicas y mecánicas) que la hace valiosa para un uso final determinado (69–71). En consecuencia, es necesario definir cuáles son las propiedades de mayor importancia de acuerdo a cada uso.

Para **usos estructurales**, se deben tener en cuenta las propiedades anatómicas de la madera dado su influencia sobre las propiedades físico-mecánicas. Resultan más atractivos un bajo valor de **AMF** y una alta **densidad**, ambos son indicadores de la **rigidez y resistencia** de la madera (61,70,72). Para la ingeniería estructural, “madera de calidad” significa piezas con una gran rigidez, que es la propiedad considerada más importante para vigas y tirantes en la industria de la construcción. Asimismo, para un tecnólogo de la madera, la densidad es un factor importante, ya que un aumento en su valor puede resultar en una mayor resistencia de la madera, sin embargo, esto varía con la especie (73,74).

El **AMF** fue mencionado por diversos autores (7,45,61,75–77) como una de las propiedades anatómicas más influyentes en el comportamiento físico-mecánico de la madera. Xu *et al.*

(78,79) demostraron que el AMF es muy sensible al clima, más que al ancho de los anillos de crecimiento y la densidad de la madera. Más recientemente, Xu *et al.* (80) destacaron que la variación anual en el AMF y el diámetro de las traqueidas están fuertemente relacionadas a factores climáticos, como temperaturas y precipitaciones. Los árboles podrían cambiar las características del AMF en respuesta al estrés ambiental (80,81). También, aspectos como el sitio (82,83), la densidad de plantación (59), el manejo silvícola (84), la edad (61,72,75,85) y material genético (65,72), contribuyen a la variación del AMF, dentro del leño juvenil y maduro. Por lo tanto, pueden tener una influencia trascendental en las propiedades estructurales de la madera. La variación radial del AMF permite la determinación del límite entre la madera juvenil y madura (18,60,86,87). Los valores altos de AMF en madera juvenil le confieren poca rigidez y proporcionan al árbol joven la flexibilidad que necesita para sobrevivir a los vientos fuertes sin rotura (81).

Si bien existen antecedentes referidos al AMF para el pino híbrido F₁ (PEE × PCH) cultivado en Australia (7,72), localmente existe un vacío en el área del conocimiento de esta temática para el material del híbrido F₁ INTA-PINDO. Consecuentemente, este trabajo propone conocer el grado de variación radial del AMF para este material genético.

La **densidad** es el índice más comúnmente utilizado como indicador para determinar el uso final de la madera. Además, es relativamente económica y fácil de medir, incluso en muestras pequeñas como tarugos extraídos de árboles en pie (7,69,88). Sumado a lo antedicho, la densidad es el resultado combinado de varias características anatómicas, incluida la densidad celular, espesor de la pared, diámetro de la célula, ancho del anillo de crecimiento, cantidad de elementos de radios medulares y vasos, y proporción de madera temprana-tardía en un anillo de crecimiento. Es por ello, que los métodos de predicción de la resistencia y rigidez de la madera consideran a esta variable como buen indicador del comportamiento mecánico de la misma (34). Esta propiedad generalmente es afectada por las intervenciones que aumentan la productividad y/o reducen la edad de cosecha, debido al incremento de madera juvenil. Un estudio realizado por Moore *et al.* (89) demostró que los residuos de cosecha y la adición repetida de fertilizantes (particularmente nitrógeno) a lo largo de la rotación, dio como resultado impactos adversos en la densidad y rigidez de la madera. En concordancia, Wang *et al.* (90) determinaron una reducción significativa en la densidad de la madera, con el mayor suministro de N en los biosólidos. En contraposición, Watt y Trincado (91), encontraron una relación lineal positiva entre la densidad básica con el suministro Boro (B) y Carbono-Nitrógeno (C:N). El B y la relación C:N explicaron un 32 % y 20 % del aumento en la densidad, respectivamente.

La **rigidez** es una característica cualitativa de la madera. Esta propiedad se mide en términos del **módulo de elasticidad (MOE) o coeficiente de elasticidad**. Es decir, **el módulo de elasticidad** expresa una medida de la rigidez de la madera. El MOE es un parámetro que indica la capacidad de una pieza (tabla/tirante) para resistir la deformación al ser sometida a fuerzas externas. Es utilizado para la caracterización de especies forestales maderables, constituye una propiedad muy importante para la construcción, entre más alto sea su valor, más rígida será la madera. Si un material tiene un alto módulo de elasticidad estático, se deformará menos que un material con un módulo de elasticidad más bajo en respuesta a una carga aplicada en la misma dirección. El módulo de elasticidad estático es una propiedad importante para la ingeniería y el diseño de estructuras, ya que permite predecir cómo se deformará un material bajo carga y cómo afectará esto al comportamiento y la estabilidad de la estructura en su conjunto. Se expresa en unidades de presión, como pascal (Pa), Newton por milímetro cuadrado (N/mm^2) o kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm^2). La rigidez es una propiedad cualitativa y el MOE es una medida cuantitativa, no obstante, en la caracterización tecnológica de la madera son utilizadas como sinónimos. El MOE se puede determinar con diferentes métodos, denominándose módulo de elasticidad estático o dinámico según la metodología utilizada.

El **módulo de elasticidad dinámico** es especialmente importante en la caracterización de materiales utilizados en aplicaciones como la construcción de puentes, edificios y estructuras, ya que en estos usos la madera puede estar sujeta a vibraciones y cargas dinámicas. El conocimiento del módulo de elasticidad dinámico permite a los ingenieros diseñar estructuras que sean capaces de resistir estas cargas dinámicas y evitar fallas por fatiga. El **módulo de elasticidad estático** y el **módulo de elasticidad dinámico** son dos propiedades diferentes que miden la rigidez de un material de diferentes maneras. A continuación, se presentan las diferencias fundamentales entre el módulo de elasticidad estático y el módulo de elasticidad dinámico:

Método de medición y carga aplicada: el módulo de elasticidad estático mide la capacidad de un material para resistir deformaciones con la aplicación de una carga constante o estática. Mientras que, el módulo de elasticidad dinámico determina la capacidad de un material para resistir deformaciones bajo cargas dinámicas o variables. Y se calcula a partir de la medición de la frecuencia natural de vibración del material bajo una carga dinámica.

Frecuencia de carga: El módulo de elasticidad estático se mide a frecuencias muy bajas o nulas, mientras que el módulo de elasticidad dinámico se mide a frecuencias muy altas y variables.

Valores obtenidos: El módulo de elasticidad estático y el módulo de elasticidad dinámico pueden tener valores diferentes para el mismo material.

Resumiendo, el MOEe y el MOEd miden diferentes aspectos de la rigidez de un material y se determinan mediante ensayos diferentes. El MOEe es importante para diseñar estructuras que soporten cargas estáticas, mientras que el MOED es importante para diseñar estructuras que soporten cargas dinámicas. Ambos módulos de elasticidad son importantes para la ingeniería y el diseño de estructuras y sus componentes.

Las piezas con mayor valor de MOE son más valiosas debido a su capacidad de ser utilizadas en tramos más largos en servicio. Los tirantes con propiedades de alta rigidez también pueden ser utilizados en una dimensión de sección transversal más pequeña que aquellos con menores valores.

El MOE de una pieza de madera es función de otras propiedades combinadas, principalmente contenido de humedad, densidad y AMF. Evans e Ilic (46) encontraron que la densidad y AMF, explicaban el 70 % y 86 % de la variación en el MOE. Mientras que, la combinación de ambas variables permitió predecir con mayor exactitud (96 %) la variación en el MOE.

La calidad del producto final puede modificarse positiva o negativamente con la intervención del hombre (selección del material genético y el manejo silvícola). La aplicación de podas y raleos realizados de manera progresiva y distribuidas uniformemente en el tiempo, conducen a resultados altamente beneficiosos, con mejoras sustanciales en las propiedades de la madera (41,92,93). Por otro lado, el mejoramiento genético ha permitido acortar el turno de corta, generando una gran proporción de madera juvenil (94). La calidad estructural de la madera juvenil es inferior al de la madera madura. Puede interferir negativamente en el proceso de industrialización y transformación de la madera en productos derivados. Sin embargo, numerosos estudios (42,95,96) han visualizado esta problemática como una oportunidad de mejora de las principales especies forestales, debido a que existe una mayor heredabilidad en la madera juvenil para la rigidez (MOE) y resistencia (MOR), que en la madera adulta, superando la heredabilidad para los rasgos de crecimiento (H, DAP) (37,38,42–44). Wu *et al.* (72) para *P. elliotii* (PEE), *P. caribaea* var. *hondurensis* (PCH) y para pino híbrido F₁ (PEE × PCH) de 11 años de edad cultivado en Australia, determinaron altos valores de heredabilidad para la densidad, ángulo microfibrilar y módulo de elasticidad, siendo máxima en los 3 primeros años. Otro aspecto muy importante a ser considerado es que la selección en madera juvenil basada en el AMF y la densidad conduce a resultados exitosos. Por el contrario, la selección por rigidez resulta más compleja, debido a que esta propiedad

en madera juvenil se rige por el AMF, y en madera madura depende principalmente de la densidad (42,72). En coníferas la variación de la densidad desde la médula a la corteza es prácticamente lineal, mientras que el MOE aumenta de forma no lineal (97).

Estos saberes otorgan la posibilidad de incorporar estas nuevas características de la calidad estructural de la madera a los programas de mejora, permitiendo acortar el turno de cosecha, sin generar alteraciones negativas en las propiedades tecnológicas.

2.5 Métodos no destructivos como herramientas para la caracterización de materiales

El mejoramiento genético dirigido a la obtención de productos estructurales deberían tener en cuenta la densidad, AMF y MOE (29). Sin embargo, las mediciones tradicionales de estos rasgos son costosas o destructivas, particularmente para AMF y MOE. La medición microscópica directa del AMF en fibras individuales es extremadamente lenta y costosa, y la representatividad de las mediciones obtenidas y/o resultados son discutibles a menos que se examine un gran número de fibras. Por ello, la caracterización de árboles en pie a través de técnicas acústicas podría proporcionar estimaciones indirectas del AMF (98). También, la posibilidad de predecir el MOE de la madera de árboles en pie posee múltiples propósitos (por ejemplo, clasificación de árboles para diferentes destinos de procesamiento, evaluación del efecto del sitio y de la silvicultura sobre la calidad de la madera, selección de material genético de calidad superior en árboles jóvenes) (32,99–101).

Bailleres *et al.* (7) predijeron niveles similares de información respecto al MOE de la madera de PEE, PCH, F₁ y F₂ empleando para ello distintas herramientas acústicas. Aunque obtuvieron valores absolutos de media, mínimo y máximo de MOE muy diferentes entre métodos. Indicaron que la caracterización de los materiales fue posible independientemente de la plataforma tecnológica empleada.

2.6 Evaluación de la madera con métodos no destructivos

La evaluación no destructiva “es la disciplina que identifica las propiedades físicas y mecánicas de un material sin alterar sus capacidades de uso final” (102). Posteriormente, Ross presenta una definición más amplia. Indica que la evaluación no destructiva “es la ciencia capaz de identificar las propiedades físicas y mecánicas de un material sin alterar sus capacidades de uso final y luego utilizar esta información para la toma de decisiones con respecto a las aplicaciones más apropiadas” (103). Se denomina ensayo no destructivo END (en inglés NDT: non destructive testing) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. La evaluación no destructiva, supera los problemas de las pruebas estáticas

que requieren mucho tiempo, son más costosas y destructivas. Existen técnicas para medir características estructurales de madera de árboles en pie, en rollizos y en madera aserrada (88,104).

2.7 Clasificación de los métodos no destructivos

Los métodos no destructivos utilizados para la evaluación de las propiedades de los materiales pueden clasificarse de muy diversos modos. Teniendo en cuenta la naturaleza técnica de los equipos, los MND pueden agruparse de la siguiente manera (104):

- **Mecánicos:** son aquellos que se basan en la aplicación de fuerzas y medición de las deformaciones. Estas pruebas consisten en un ensayo no destructivo a partir del cual se calcula un parámetro clasificador estrechamente relacionado con la resistencia (usualmente el módulo de elasticidad), a partir del cual se le asigna a la pieza su correspondiente grado de calidad resistente (109).

- **Electromagnéticos:** son aquellos basados en las mediciones efectuadas mediante corrientes eléctricas o campos magnéticos (xilohigrómetros de resistencia eléctrica, termografía).

- **Técnicas nucleares:** consisten en dispositivos que emplean los rayos X, los rayos Gamma y la resonancia magnética para la caracterización del material.

- **Métodos acústicos:** la acústica es una rama de la física que estudia el sonido, infrasonido y ultrasonido, es decir cómo se propagan ondas mecánicas a través de la materia, tanto sólida como líquida o gaseosa (no pueden propagarse en el vacío). Los métodos acústicos se basan en la determinación de la velocidad de transmisión del sonido en el material.

- Existen distintas metodologías para determinar la velocidad acústica.
 - **Tiempo de vuelo**, emplea una onda sónica en el rango de frecuencias entre 20 Hz y 20.000 Hz (rango de frecuencia que el oído humano es capaz de percibir el sonido). Cabe aclarar que 1 Hz significa un ciclo (u onda) por segundo. La onda sónica es ocasionada generalmente por impacto de un martillo, denominándose “onda de impacto”. También pueden utilizar una onda ultrasónica (frecuencias superiores a los 20.000 Hz, generada mecánicamente mediante un acelerómetro piezoeléctrico).
 - **Vibración** (vibration) (longitudinal, transversal, torsión)
 - **Ultrasonido** (ultrasonic), onda ultrasónica, emplean frecuencias entre 15.000-300.000 Hz.
 - **Emisión acústica** (acoustic emission): es el fenómeno producido por una onda en el rango del ultrasonido, generalmente entre los 20.000 Hz y 1.000.000 Hz, que es generada por la

disipación energía dentro del material. La emisión acústica (EA) es un método de ensayos no destructivos que se utiliza para detectar defectos en materiales sometidos a la tensión. Este tipo de ensayo (EA) permite detectar defectos evolutivos (daño en progreso) y activos en el material sometido a la tensión. Este método consiste en registrar la perturbación elástica que se propaga en el material. La captura se registra mediante transductores piezoeléctricos fijados a la superficie del material (104). Esta técnica acústica es muy utilizada en la evaluación de la de tableros de partículas (calidad del adhesivo y la resistencia). La emisión acústica describe las ondas de impacto acústico que surgen como resultado de una rápida liberación de energía debido a los cambios microestructurales que ocurren en los materiales (105). Es una tecnología muy efectiva para evaluar para el comportamiento de fracturas y la detección de fatiga en metales, fibra de vidrio, madera, compuestos, cerámica, concreto y plásticos (106).

- **Resonancia:** ocurren con todo tipo de vibraciones u ondas: existe resonancia mecánica, resonancia acústica, resonancia electromagnética y resonancia magnética nuclear (RMN).

Algunos equipos utilizados en el mundo para evaluar de forma indirecta las propiedades la madera son: a) el **SilviScan** (107) estima el MOE midiendo el ángulo promedio de las microfibrillas mediante difracción de rayos X, utilizando muestras obtenidas con barrenos de árboles en pie (46). Presenta la desventaja de ser más costosa que las técnicas acústicas. b) La **espectroscopía de infrarrojo cercano** (NIR) utilizada para realizar perfiles de la distribución del MOE y es de aplicación en aserraderos (108). c) La **tomografía de rayos X** ha demostrado la capacidad de proporcionar buenas imágenes de la densidad y de la estructura interna de la madera, como los nudos. Es una tecnología relativamente costosa y no adecuada para las mediciones a campo (109).

A continuación, se describen algunas de estas técnicas empleadas en la evaluación de maderas en esta tesis.

2.8 Descripción de los métodos no destructivos empleados en esta tesis

2.8.1 Clasificación visual estructural

La clasificación visual, es considerado el método no destructivo más antiguo y extendido utilizado en madera aserrada, y sigue siendo aplicado en la categorización de madera en aserradero. Su principio consiste en la inspección visual de la madera evaluando las singularidades que la misma presenta en su aspecto exterior. Estas características están relacionadas normalmente a las dimensiones para determinado uso, contenido de humedad,

anomalías relacionadas a la anatomía (médula, nudos, desviación de fibras), defectos que aparecen durante el procesamiento de la madera (rajadura, grietas, aristas faltantes, deformaciones, alabeos) y ataques biológicos (manchas, pudriciones). La clasificación visual por resistencia se fundamenta en la existencia de una correlación conocida entre los parámetros visuales y las propiedades mecánicas. Donde los grados de calidad asignados están asociados a ciertos valores característicos de resistencia, rigidez y densidad para finalmente asignarle una determinada calidad (110). La eficiencia de un determinado parámetro de detección visual o mecánica, se verifica por su capacidad para predecir el comportamiento estructural del mismo (24). En este sentido, en algunos casos contribuye a mejoras en la predicción de las propiedades (104), mientras que, en otras oportunidades, no ha logrado una mejora importante (24).

2.8.1.1. Normas de clasificación visual estructural

Las normas de clasificación visual por resistencia tienen en común la asignación de una cantidad de grados de calidad. La norma española (111) destinada a la clasificación de madera aserrada proveniente de especies de coníferas, fija tres calidades. La norma norteamericana (112) desarrollada para pinos amarillos del sur prescribe cuatro grados estructurales. Por otro lado, las normas argentinas, IRAM 9662-3 (9) para tablas e IRAM 9670 (10) para vigas, formuladas para pinos resinosos del nordeste establecen dos calidades. Ambas fijan dos grados estructurales y establecen los requisitos que deben reunir las piezas para integrar la clase 1 o clase 2. El procedimiento a seguir con cada pieza consiste en ubicar visualmente la sección más débil y determinar sobre ésta la clase correspondiente. Es decir, la asignación a una determinada calidad queda definida por la situación más desfavorable y de mayor incidencia.

2.8.1.1.A) Normas IRAM 9662-3

La norma IRAM 9662-3 (9), se basa en la clasificación visual por resistencia de tablas aserradas para uso estructural (Anexo 1. Tabla 1) cuando se encuentren flexionadas de plano y para aquellas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural (MLEE). Esta norma, también establece los límites de los defectos que las piezas deben cumplir para ser asignadas a cada clase y es aplicable a tablas cuyo espesor sea menor o igual a 50 mm (en bruto, sin cepillar) y cuya relación espesor ancho sea menor o igual a 1:2. El contenido máximo de humedad de las piezas no debe superar el 16 % de humedad. Esta norma establece dos clases resistentes, que se denominan Clase 1 (mayor resistencia) y Clase 2 (menor resistencia). Las piezas que no clasifican para estos dos grupos corresponde a descarte. Los valores característicos que se espera presenten las piezas de madera que cumplan con esta clasificación en cuanto a las propiedades mecánicas (resistencia a la flexión

y a la tracción y módulo de elasticidad a la flexión) y densidad de las tablas, correspondientes a las dos clases resistentes se exponen en el Anexo 1. Tabla 2.

2.8.1.1.B) Norma IRAM 9670

La norma IRAM 9670 (10) es aplicable sobre aquellos elementos estructurales ubicados de canto y sometidos principalmente a esfuerzos de flexión, cuyas escuadrías nominales van de 1 a 3 pulgadas de espesor por 3 a 10 pulgadas de ancho. Las piezas al momento de la clasificación deben arrojar un valor de contenido de humedad del $15 \% \pm 3 \%$. En el Anexo 1. Tabla 3 se presenta un resumen de los criterios de clasificación según la mencionada norma. Se establecen los defectos admisibles, las unidades de medida y los límites pertinentes que debe cumplir cada pieza para pertenecer a una clase determinada. Distingue dos clases, clase 1 (calidad superior) y clase 2 (menor calidad). Toda la madera que no cumpla con estas dos clases (1 o 2), corresponde a descarte. Esta norma también brinda los valores correspondientes a la resistencia característica en flexión, tracción, compresión paralela y perpendicular a las fibras, corte y módulo de elasticidad a la flexión para los grados de calidad definidos (Anexo 1. Tabla 4).

2.8.1.1.C) Norma SPIB (Southern Pine Inspection Bureau)

La norma SPIB (Standard Grading Rules For Southern Pine Lumber) contempla los requisitos esenciales y los grados de calidad para la madera estructural de 2" de espesor, 4", 6" y 8" de ancho y largos de 8', 10', 12', 14' y 16' de medidas nominales. El contenido de humedad admisible es de 8 %, 15 % y 19 % de mínima, media y máxima respectivamente. También, para cada grado de calidad, establece las limitaciones para todos los defectos y atributos naturales y/o de procesos. En el Anexo 1. Tabla 5, se muestra la relación entre los grados de calidad de las normas IRAM 9670 (10) y SPIB (113).

Debido a las dificultades que se presentan para la utilización de los métodos visuales, es habitual que se recurran a los métodos acústicos (previamente calibrados) para evaluar la calidad de la madera de una determinada especie.

2.8.2 Descripción de métodos acústicos

Los **métodos acústicos** por su practicidad son más difundidos y comúnmente utilizados para la evaluación de maderas. Se basan en la determinación de la velocidad de transmisión del sonido a través del material (árboles en pie, en rollizos y piezas aserradas) (31). Las técnicas de ultrasonidos y de vibraciones longitudinales y transversales son las más empleadas en madera aserrada (35,63,104). Existen numerosas técnicas basadas en la propagación de

ondas acústicas. Se diferencian en la fuente del impulso, configuración del ensayo, en las características de la respuesta medida y en la forma de procesar la señal recibida.

A continuación, se describen las técnicas acústicas utilizados en esta tesis para la evaluación del módulo de elasticidad de la madera de árboles en pie, en rollizos y en madera aserrada. La velocidad acústica se puede obtener a través de a) **Tiempo de vuelo** (TOF de su sigla en inglés, time of flight), b) **Resonancia** y c) **Vibración** (longitudinal, transversal).

2.8.2.1 Tiempo de vuelo (TOF del inglés *time of flight*) para medir el módulo de elasticidad de los árboles en pie

Los métodos acústicos pueden utilizar una **onda ultrasónica** (frecuencias superiores a los 20.000 Hz, generada mecánicamente mediante un acelerómetro piezoeléctrico) o **una onda sónica** (frecuencias entre 20 Hz y 20.000 Hz), ocasionada por el impacto de un martillo, denominándose “onda de impacto”. La **ventaja** de las **ondas sónicas** frente a las **ultrasónicas**, consiste en que, al ser de una **frecuencia más baja**, su **alcance es mayor**, lo que **permite evaluar distancias de gran longitud**. Entre los distintos equipos basados en técnicas acústicas existentes en el mercado, las principales diferencias básicamente radican en el tipo de señal generada y recibida de acuerdo a las aplicaciones. Dentro de los métodos acústicos existentes para madera, basados en la onda de impacto, se puede mencionar el dispositivo portátil “Microsecond Timer” o “**TreeSonic**” de la empresa Fakopp®. Este equipo se basa en el principio de transmisión de una onda acústica, y realiza la medición del tiempo de vuelo (TOF), es decir el “tiempo que demora una **onda sónica** en desplazarse entre dos puntos de distancia conocida”, o “velocidad acústica”. En la Figura 4 se puede observar un esquema de una herramienta acústica utilizada para medir el TOF. El método consiste en insertar dos sensores enfrentados en el mismo lado del árbol. Los mismos deben estar orientados en un ángulo de 45° con respecto al eje del fuste y separados verticalmente por una distancia de 1 metro (114). El emisor es golpeado con un martillo, el tiempo que tarda la onda de impacto en desplazarse hasta el receptor es registrado (Figura 4).

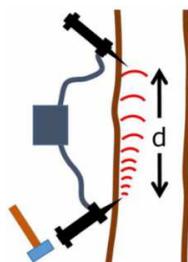


Figura 4: Esquema de una herramienta acústica utilizada para medir el tiempo de vuelo (TOF de su sigla en inglés, Time of Flight). Tomada de Legg y Bradley, 2016 (35).

La velocidad acústica (V) a partir del TOF es calculada usando la ecuación (1):

$$V = \frac{d}{TOF} \quad (1)$$

Donde V = velocidad acústica (m/s), d = es la separación entre sensores (igual a 1 metro), TOF = tiempo de vuelo (μ s). La relación entre la velocidad acústica y el tiempo de vuelo es inversa, es decir, a menor tiempo para desplazarse una onda de impacto de un punto a otro, mayor será la velocidad acústica.

Es importante mencionar que cuando se aplica un impacto a la superficie de la madera, la perturbación que se genera, se desplaza a través de la madera como **ondas de impacto** (Figura 5). En general, se inician tres tipos de ondas por dicho impacto, a) **Onda longitudinal o de compresión (onda P)**, b) **Onda transversal o de corte (onda S)** y c) **Onda superficial u onda de Rayleigh (onda R)**.

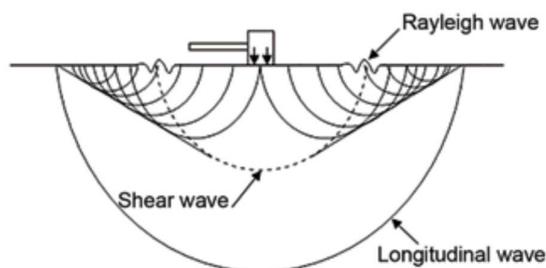


Figura 5: Tipos de onda de impacto. Tomada de Wang, 2013 (31).

Una onda **P** se caracteriza por la dirección del movimiento de las partículas, o sea, paralela a la dirección de propagación, de manera que la velocidad de las partículas es paralela a velocidad de onda. En una onda **“S”**, el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de la propagación de la onda. Una onda **“R”** generalmente está restringida a la región adyacente a la superficie; y el movimiento de las partículas es elíptico. Las ondas **“P”** se asocian a tensiones normales y las ondas **“S”** a tensiones tangenciales. La mayor parte de la energía que resulta de un impacto es transportada por ondas de corte y ondas superficiales, no obstante, la **onda longitudinal viaja más rápido y es la más fácil de detectar** (son las más utilizadas para la caracterización de las propiedades de los materiales) (115). Las ondas **“P”** pueden propagarse en todo tipo de medio, las ondas **“S”** solo medios sólidos y las ondas **“R”** se propagan a lo largo de la superficie del sólido. La velocidad de propagación de cada tipo de onda depende de las propiedades elásticas y de la densidad del medio. La propagación de ondas de impacto en un **medio heterogéneo, como es la madera**, es un fenómeno complejo. Además, el desarrollo básico de la teoría de propagación de onda, supone un

medio, infinito, isótropo y elástico, por lo tanto, la validez de estos supuestos está sujeto a las particularidades de la madera.

La **velocidad de propagación de las ondas “P” en medios sólidos infinitos y elásticos** se puede calcular con la ecuación (2) de Graff (116).

$$V_p = \sqrt{\frac{\mathcal{E} \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad (2)$$

Donde V_p es la velocidad de propagación, \mathcal{E} es el módulo de elasticidad (longitudinal), ν es el coeficiente de Poisson, ρ es la densidad del material.

La **velocidad de propagación de las ondas “P”, en medios sólidos finitos y elásticos**, como son las **placas o barras**, la velocidad de propagación de las ondas longitudinales varía en función de la geometría, y depende de la relación entre las dimensiones transversales de la pieza y de la longitud de la onda propagada. Sin embargo, en piezas donde la dimensión transversal es mucho más pequeña que la longitud de la onda propagada, la velocidad de onda es independiente del coeficiente de Poisson, por lo tanto, la ecuación de Graff (116) se reduce a (3):

$$V_L = \sqrt{\frac{\mathcal{E}}{\rho}} \quad (3)$$

Donde V_L es la velocidad de propagación de la onda longitudinal, \mathcal{E} es módulo de elasticidad (longitudinal), y ρ es la densidad del material.

Estas ecuaciones suponen medios isótropos, mientras que la madera es un material anisótropo. Consecuentemente, el empleo de una u otra ecuación para estimar la velocidad de propagación de una onda longitudinal va depender de la relación entre la longitud de onda propagada y de las dimensiones de los defectos en la probeta en estudio. Para que el defecto pueda ser detectado, su tamaño deber ser igual o superior a la longitud de onda. Para obtener valores más reales, aunque más complejos de calcular la velocidad, se podría recurrir a las ecuaciones de Christoffel (117).

La velocidad de propagación de las ondas “S” en medios sólidos elásticos se calcula mediante la siguiente ecuación (4):

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4)$$

Donde V_s es la velocidad de propagación de la onda transversal, G es módulo de elasticidad (transversal) y ρ es la densidad del material.

Por otra parte, la velocidad de propagación de la onda “**R**” o Rayleigh se calcula con la ecuación (5):

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12 \cdot \nu}{1 + \nu} \cdot V_S \quad (5)$$

Donde V_R es la velocidad de propagación de la onda Rayleigh, ν es el coeficiente de Poisson, V_S es la velocidad de la onda transversal.

Por otro lado, la propagación de la onda de impacto en los diferentes materiales está sujeta a la atenuación de la propia señal en ese medio, y será mayor cuanto mayor sea su frecuencia (menor longitud de onda). El uso de frecuencias bajas (grandes longitudes de onda) permite barrer mayores distancias. Sin embargo, la sensibilidad del método es menor, o sea, aumenta el tamaño mínimo de la discontinuidad capaz de identificarse.

Para calcular el módulo de elasticidad dinámico (MOE_d) del árbol en pie (33) a partir de la medición de la velocidad acústica (V) se recurre a la ecuación (6).

$$MOE_d = V^2 * \rho \quad (6)$$

Donde MOE_d es el módulo de elasticidad dinámico (en GPa), V es la velocidad acústica (km/s) calculada con la ecuación (1) y ρ es la densidad de la madera verde (kg/m³). La densidad se determina por el método de humedad máxima, las muestras de madera pueden ser obtenidas con barrenos (37). Generalmente se considera que la velocidad puede ser la principal fuente de error en los valores rigidez, ya que el MOE dinámico es proporcional al cuadrado de la velocidad. Esto debe notarse, que la ecuación (3) es una aproximación de un tipo de vibración que ocurre en **medios finitos**, como **placas o barras** donde el **material es isotrópico, homogéneo y delgado**. Sin embargo, en realidad el fuste de los árboles son ortotrópicos, no homogéneos y tienen una dimensión dada y una conicidad finita (35,118). Esto puede conducir a errores en la medición de la rigidez.

2.8.2.2 Resonancia acústica para medir el módulo de elasticidad dinámico de los rollizos y piezas aserradas

La *resonancia acústica* es una rama de la resonancia mecánica que se ocupa de las vibraciones en el rango de frecuencia del oído humano (20 – 20.000 Hz).

Uno de los posibles métodos para determinar las frecuencias fundamentales consiste en generar un impacto en un extremo de la pieza con un martillo, propiciando que la misma

comience a vibrar en su frecuencia natural. La amplitud y frecuencia de la vibración de resonancia son obtenidas utilizando un analizador de espectro que determina las frecuencias relativas mediante la transformada rápida de *Fourier*, conocida por la abreviatura **FFT** (del inglés **Fast Fourier Transform**). El principio de funcionamiento de la transformación rápida de *Fourier* (FFT) consiste en que, es posible descomponer una onda continua (pero no senoidal), en una forma fundamental, que se corresponde a la frecuencia del sistema, más una serie de ondas senoidales que se añaden y son múltiplos de la onda fundamental. El FFT es un algoritmo matemático para la transformación de una función del tiempo en una función de la frecuencia. Se describe como la transformación del dominio del tiempo al dominio de frecuencia (Figura 6).

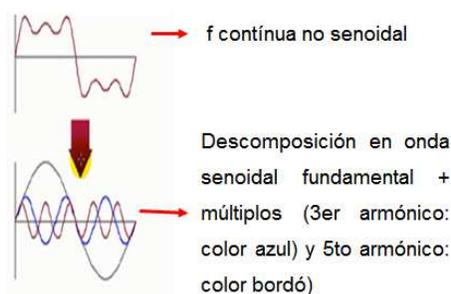


Figura 6: Onda fundamental y ondas derivadas.

El principio se basa en generar una fuerza axial y determinar las primeras frecuencias usando un acelerómetro conectado a un software de computadora. La velocidad acústica longitudinal se puede calcular a partir de enésima frecuencia de resonancia. Las ondas de compresión longitudinales son generadas para obtener la frecuencia de resonancia y sus armónicos. En las mediciones realizadas por técnicas de resonancia acústica los picos de resonancia medidos pueden variar para cada armónico. Chauhan y Walker (119) informaron que la velocidad acústica medida usando el primer y segundo armónico podría variar hasta en un 11 %. En general se ha sugerido que el segundo armónico es el más preciso y fue utilizado por la empresa Hitman en el desarrollo del equipo HM200 para mediciones en rollizo a partir de resonancia. El enfoque acústico se basa en la observación de cientos de pulsos acústicos resonando longitudinalmente en una pieza de madera y proporciona una velocidad acústica promedio ponderada. Las herramientas acústicas basadas en resonancia cuentan con un software incorporado (FFT). Este es capaz de analizar y devolver las frecuencias naturales de vibración de las señales acústicas (103). La velocidad acústica es calculada a partir de la frecuencia resonante (segundo armónico) y la longitud de la pieza. Este método solo se puede aplicar cuando la muestra posee dos extremos libres. Se introduce una onda de impacto en un extremo de la muestra, la onda se desplaza en movimientos elípticos entre las dos caras

de la troza/pieza introduciendo ondas estacionarias. La señal generalmente se recoge con un micrófono o un acelerómetro en el otro extremo troza/pieza.

El método de resonancia proporciona mayor información y más confiable que el método TOF, principalmente debido a que la velocidad de la onda es calculada en varios cientos de pases a través de la muestra (120). Se basa en el principio de que cuando una onda de impacto se desplaza a través de una muestra de madera y alcanza el extremo opuesto, se refleja y comienza a desplazarse en la dirección opuesta. Los extremos libres de la muestra vibran y se puede medir la frecuencia de esta vibración. Este enfoque se conoce como el método de resonancia. Las ondas de impacto longitudinales son generadas por el impacto de un martillo en un extremo de la troza (Figura 7). La forma en que la onda de impacto se propaga a través de un cuerpo se correlaciona con las propiedades intrínsecas del material.



Figura 7: Diagrama de una herramienta de resonancia acústica utilizada para medir la velocidad acústica en rollizos. Tomada de Legg y Bradley, 2016 (35).

Con la frecuencia natural de vibración de la onda (f) obtenida para el rollizo y su longitud (L) se calcula la velocidad de desplazamiento de la onda o velocidad acústica (V), ecuación (7):

$$V = 2 \cdot L \cdot f \quad (7)$$

A su vez, conociendo la densidad se puede estimar la rigidez del rollizo con la ecuación (6).

Entre los equipos conocidos que funcionan por resonancia existe el Hitman HM200 de Fibre gen (121) para rollizos, y, los de Fakopp® (122) el “graduador de troncos” para rollizos y el “clasificador de madera por resonancia” para piezas aserradas. También, se han desarrollado herramientas de resonancia acústica para clasificar rollizos en instalaciones de aserraderos como la patente mencionada por Legg y Bradley (35).

2.8.2.2 Vibración transversal para medir el módulo de elasticidad dinámico de las piezas aserradas

Estas técnicas consisten en generar vibraciones transversales por un impacto aplicado a la mitad de la pieza, y luego se podrá utilizar la frecuencia natural de vibración para determinar la rigidez de la madera.

La frecuencia natural de vibración de todo material elástico es una importante propiedad dinámica. Es utilizada para estimar la rigidez de una pieza prismática de densidad y dimensiones conocidas. Existe una relación entre frecuencia de vibración y rigidez suponiendo un medio sólido, homogéneo, isótropo y perfectamente elástico. Sin embargo, esta expresión es utilizada también para medios heterogéneos como la madera, cuando las piezas son grandes en relación al tamaño de los elementos constitutivos del material (103). Para la realización del ensayo, la probeta es sometido a vibraciones de distintas formas, en función de las condiciones de apoyo y del lugar de aplicación del impacto. Si el golpe es aplicado en los extremos, la vibración originada permite medir la frecuencia en la dirección longitudinal. El módulo de elasticidad dinámico obtenido a partir de la frecuencia natural de vibración será calculado con la ecuación (8):

$$MOE_d = (2 \cdot L \cdot f)^2 \cdot \rho \quad (8)$$

Donde MOE_d es el módulo de elasticidad dinámico, L es la longitud de la pieza, f es la frecuencia natural de vibración longitudinal, ρ es la densidad del material.

Sin embargo, si el impacto es aplicado de manera transversal, el modo de vibración más marcado es el de flexión. Por lo tanto, se puede medir la frecuencia natural de vibración a la flexión mediante la ecuación simplificada de Euler (9) (123), en la cual no se considera la deformación por cortante incluida en la vibración a la flexión. No obstante, para obtener una precisión razonable, la relación longitud/altura de la probeta debe ser superior a 15.

$$MOE_d = \left(\frac{2 \cdot f_n}{\gamma_n \cdot \pi} \right)^2 \cdot \frac{m \cdot L^3}{I} \quad (9)$$

Donde MOE_d es el módulo de elasticidad dinámico, f_n es la frecuencia natural de vibración a la flexión, n es el modo, (si $n=1$, se denomina modo básico o fundamental), m es la masa de la pieza, L es la longitud de la pieza, γ_n es la constante igual a $(n+0,5)^2$, para $n \geq 1$ $\gamma_n = 2,267$, I es el momento de inercia de la sección.

Uno de los equipos basados en la técnica en vibración trasversal, es el Metriguard® Modelo E-Computer 340 (<https://www.Metriguard.com>) (124), este es utilizado por distintos institutos en todo el mundo para evaluar el rendimiento potencial de la madera estructural (103).

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Caracterización de los ensayos

El material genético utilizado corresponde a pino híbrido F₁ *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PEE x PCH) de 11 años de edad, F₁ INTA-PINDO. Este material corresponde a familias que fueron generadas a través cruzamientos controlados realizados durante el año 2004, dentro del programa de mejoramiento de INTA-PINDO. Las cruzas se realizaron en el Huerto Semillero Clonal (HSC) de PEE situado en el INTA San Antonio, Misiones, Argentina. Los árboles de dicho huerto actuaron como madres (13 madres), mientras que los padres fueron individuos de PCH (8 padres) seleccionados fenotípicamente en ensayos de orígenes-procedencias del INTA y en plantaciones comerciales de la empresa PINDO SA. Los plantines provenientes de estos cruzamientos fueron llevados a campo en el año 2007 en dos ensayos (sitio 1 y sitio 2) (Figura 8). El primero implantado en el campo perteneciente al INTA, Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Montecarlo (26° 33' latitud S y 54° 40' longitud O, sitio 1) con 37 familias y el segundo establecido en propiedad de la empresa PINDO SA (26° 09' latitud S y 54° 26' longitud O, sitio 2) con 66 familias, compartiendo 37 familias entre ensayos. El diseño de plantación fue bloques completos, con tratamientos distribuidos al azar y parcelas lineales de 5 árboles, correspondientes a hermanos completos. El uso de la tierra previo a la instalación del ensayo, pertenecía a monte nativo para el sitio 1 y plantación de pino (tercera rotación) para el sitio 2. Un mayor detalle de la caracterización de estos ensayos se proporciona en el Anexo 2. Tabla 1. En el Anexo 2. Figura 1 se muestra una fotografía de la poda aplicada a los 3 años de edad. El clima de la región de estudio se caracteriza por presentar precipitaciones medias anuales de 1.864,5 mm, con temperaturas medias en los meses más cálidos y fríos de 26,4 °C y 14,9 °C en enero y julio, respectivamente, con valores extremos de temperaturas de 40,6 °C y -5,6 °C (125).

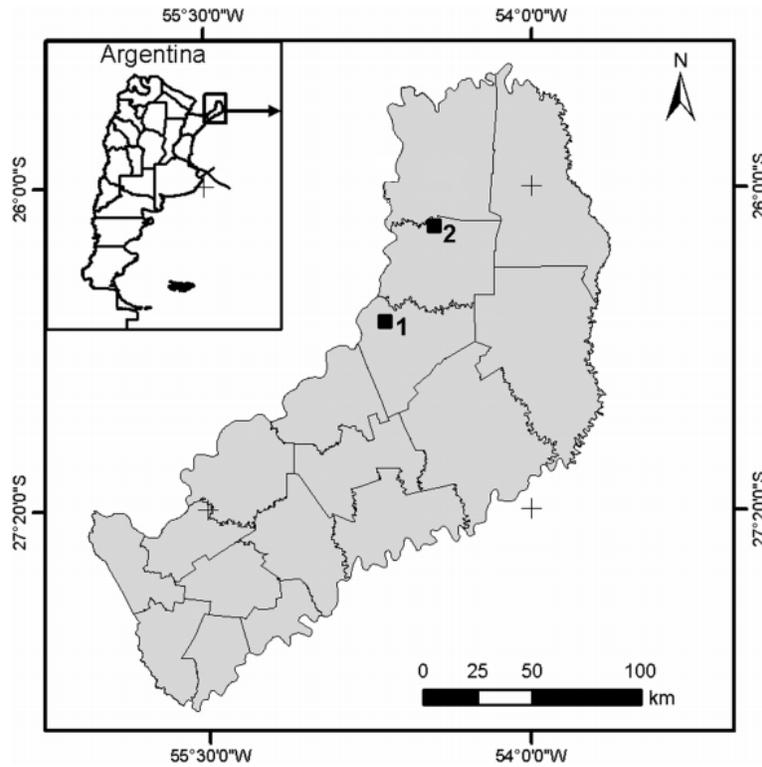


Figura 8: Ubicación de los ensayos 1 y 2 en el país y en la provincia de Misiones. Tomada de Belaber *et al.* 2018 (50).

3.2 Estrategia de selección de las familias

La selección de los árboles implicó dos etapas, primero se utilizó el ranking genético de crecimiento del 7^{mo} año para elegir 15 familias, 5 de la posición superior del ranking (R1), 5 intermedios (R2) y 5 inferior (R3) (Tabla 1). En segundo lugar, se midió el diámetro a la altura de pecho (DAP) y altura total de todos los árboles presentes en ambos ensayos a los 11 años de edad (15 de 37 familias en el sitio 1 y 15 de 66 familias establecidas en el sitio 2). Se ordenó a las familias de forma descendente según su posición en ranking genético de crecimiento y se generó un código para identificarlas.

Tabla 1: Ranking genético de crecimiento para las 15 familias de ambos sitios.

Posición del Ranking	Crecimiento	Familias	Código	DAP (cm)	H (m)
R1	superior	F19	01	30,91	25,00
		F51	02	30,45	22,64
		F20	03	30,97	23,19
		F28	04	31,51	24,28
		F29	05	31,11	23,83
R2	intermedio	F49	06	29,10	21,65
		F4	07	31,06	24,33
		F5	08	26,01	22,51
		F13	09	27,08	20,23
		F33	10	24,19	20,08
R3	inferior	F11	11	25,15	21,00
		F23	12	24,64	21,02
		F59	13	27,30	22,70
		F6	14	23,87	19,53
		F35	15	23,45	20,10

DAP = diámetro promedio a la altura de pecho y H = altura total promedio por familias de los árboles apeados a los 11 años de edad.

En la Figura 9 se puede observar el esquema de toma de muestras y mediciones de las distintas variables.

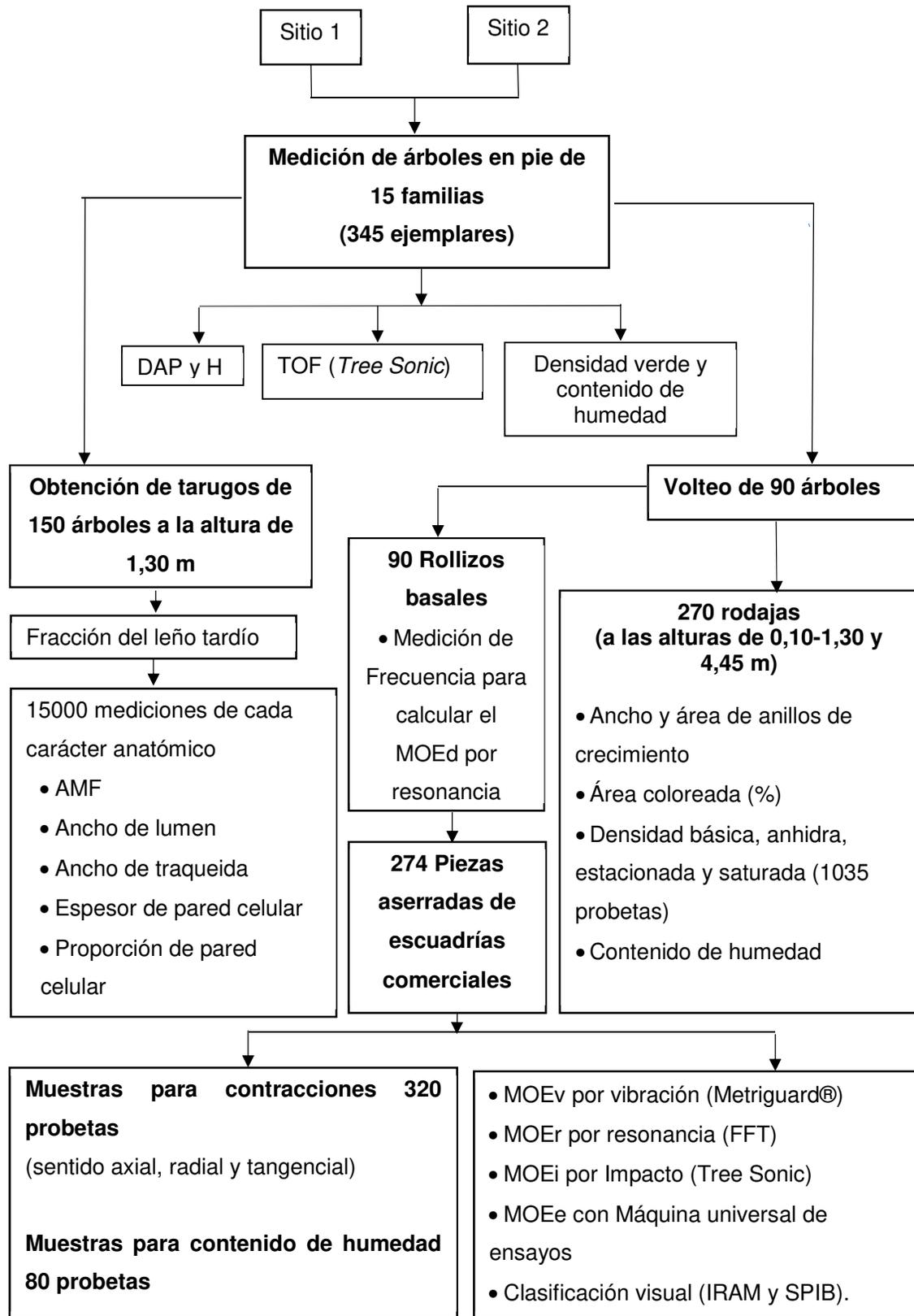


Figura 9: Esquema de toma de muestras y mediciones de las distintas variables.

3.3 Medición de variables de árboles en pie

3.3.1 Medición de variables en todos árboles de los ensayos 1 y 2

Para evaluar la repetitividad en los datos obtenidos con el equipo *TreeSonic* de Fakopp® y validar la metodología para el pino híbrido F₁ INTA-PINDO se realizaron mediciones de tiempo de vuelo (TOF) de la onda de impacto en primavera en 2 años consecutivos (a los 10 y 11 años).

En la medición del TOF se utilizó el *TreeSonic*, cuyos sensores se insertaron equidistantes al DAP, separados por una distancia de 1 metro uno de otro (Figura 4), a un ángulo de 45° respecto al eje del árbol y asegurando una profundidad de penetración de 50 mm. El impacto fue generado con un martillo de acero de 200 g. Se realizaron 8 registros de TOF en microsegundos (μ s), luego se calculó el TOF promedio de cada árbol.

Paralelamente en ambos ensayos a los 10 y 11 años de edad se midió el diámetro a la altura de pecho (DAP) y la altura total (H) de todos los árboles vivos pertenecientes a las 15 familias seleccionadas, para obtener las correlaciones entre el MOEd y los caracteres vinculados al crecimiento.

Por otro lado, de manera simultánea a la medición del TOF, DAP y H, a la altura de 1,30 m, con barreno de Pressler se extrajo una muestra de madera (398 tarugos) de 5 mm de espesor y 30 mm de longitud, de un árbol por familia de cada parcela. Una vez colectados los tarugos, en el laboratorio, se determinó el peso (con una balanza de precisión de 0,001 g) y el volumen. Luego se calculó la densidad verde y el contenido de humedad promedio del árbol en pie en cada uno de los años (10 y 11 años de edad) al momento de la medición del TOF.

La velocidad acústica a partir del TOF para árboles en pie fue calculada con la ecuación 1 y el MOEd de los mismos con la ecuación 6.

3.4 Estrategia de muestreo y medición de variables

3.4.1 Selección de muestras (tarugos) para la caracterización morfológica

Para evaluar las características microscópicas se seleccionó aleatoriamente una muestra constituida por 150 árboles. La cantidad de árboles fue determinada según la expresión indicada por Pérez López (126), ecuación (10) en función al error de muestreo tolerable (en este caso de 4,5 %) y valor medio del diámetro de los ejemplares. Se seleccionaron 75

individuos de cada ensayo, 5 árboles por cada una de las 15 familias en cada sitio teniendo en cuenta la variabilidad en diámetro (mínimo, medio, máximo y percentil 25 % y 75 %).

$$Cant. \text{ \textit{arb}} = \frac{\lambda_{\alpha}^2 NS^2}{(Ne^2) + \lambda_{\alpha}^2 S^2} \quad (10)$$

Donde, Cant. árb= el tamaño de muestra necesario para cometer un error relativo de muestreo (cantidad de árboles); $\lambda_{\alpha} = F^{-1}(1 - \alpha/2)$, siendo F la distribución de una normal (0,1), o sea que λ_{α} es el valor crítico de la normal unitaria al nivel α (valor de tabla), N= es la cantidad de árboles del ensayo, S^2 = variancia del diámetro a la altura de pecho, e=error relativo tolerable de muestreo (para este estudio se admitió un error entre 4,5 y 5,5 %).

De cada árbol muestreado se extrajo un tarugo radial de 5 mm de diámetro tomado a la altura de pecho. Los tarugos fueron secados en estufa a 70 °C por un período de 72 horas hasta alcanzar un contenido de humedad del 12 %. Posteriormente, se pulieron los tarugos, y se tomaron muestras del leño tardío de los anillos de crecimiento 4, 7, 10 y 11 y se disoció utilizando la técnica de Franklin (127), que consiste en una solución de ácido acético y agua oxigenada en partes iguales. Luego se tiñeron con safranina al 1 %. Con estas muestras disociadas se prepararon láminas y se observaron al microscopio óptico trinocular marca Nikon modelo Eclipse LV100DA-U con iluminación por luz transmitida. El sistema cuenta con una cámara digital color, modelo DS-FI2-U3 cuyo software de operación para procesamiento de imágenes es el NIS-Elements D versión 4.13.00 64-bit. La medición del AMF se realizó sobre el leño tardío de traqueidas individuales seleccionadas al azar, empleándose la técnica de Huang *et al.* (128) y utilizada también por Yin *et al.* (129) denominada “a través de la apertura de las puntuaciones presentes en las traqueidas”. Sobre el material disociado, se realizaron 15.000 mediciones para cada una de las tres características anatómicas evaluadas en las traqueidas (es decir: ancho total, ancho de lumen y AMF) constituidas por 25 repeticiones evaluadas en 4 anillos de 5 árboles pertenecientes a 15 familias muestreadas en 2 sitios. Las mediciones fueron realizadas de acuerdo a las recomendaciones de las normas IAWA (130). El valor promedio para el ancho total, ancho de lumen y AMF para cada anillo se determinó a partir de mediciones sobre 25 traqueidas individuales. Mientras que, el espesor de pared celular se obtuvo indirectamente mediante la diferencia entre el ancho total y el ancho del lumen dividido por dos. La proporción de pared celular (%) se obtuvo por la relación porcentual entre el espesor de pared celular y el ancho total de la traqueida.

3.4.2 Selección de árboles para apeo (muestreo destructivo) y caracterización física y mecánica de la madera

Para evaluar las propiedades físicas y mecánicas se seleccionó aleatoriamente una muestra constituida por 90 árboles. La cantidad de árboles fue estimada según la expresión indicada

por Pérez López (126), ecuación (10), en función al error de muestreo aceptable (en este caso fue 5,5 %) y valor medio del diámetro de los ejemplares. Se seleccionaron 45 individuos de cada ensayo, 3 árboles por cada una de las 15 familias en cada sitio teniendo en cuenta la variabilidad en diámetro (mínimo, medio y máximo).

3.4.2.1 Selección de rodajas

De cada árbol apeado se extrajeron 3 rodajas, a los 0,10 m; 1,30 m; y 4,45 m de altura del fuste (3 rodajas x 90 árboles = 270 rodajas). Cada rodaja fue codificada con el número de árbol y la altura del fuste de donde se obtuvo. Las muestras fueron secadas en estufa a 70 °C durante 72 horas, para evitar el desarrollo de hongos. Posteriormente, se lijó la parte céntrica de una de las caras para facilitar la identificación de los anillos de crecimiento y de los falsos anillos. La delimitación de la zona coloreada fue realizada visualmente en cada disco por la diferencia de color. Luego, utilizando una regla se midió sobre dos ejes ortogonales el diámetro con y sin corteza y el diámetro de la zona interna (coloreada) de cada rodaja, en ambos casos se obtuvo el promedio entre las dos mediciones (131). Con el diámetro promedio de la zona coloreada se determinó el área coloreada de la zona interna de cada rodaja (Anexo 3. Figura 1). El porcentaje de área coloreada se obtuvo por la relación porcentual entre el área de la región coloreada y el área total de la rodaja, es decir, la relación entre el área de la zona coloreada y el área total, multiplicada por 100.

La delimitación entre el leño temprano y tardío y entre anillos de crecimiento fue realizado visualmente a cada edad por la diferencia de color. Para estimar el área del leño temprano y leño tardío de cada anillo de crecimiento de las 270 rodajas, se midieron previamente con regla metálica los diámetros al inicio y final del leño temprano y finalización de cada anillo de crecimiento desde el año 1 al 11, el diámetro del leño tardío se calculó por diferencia entre el diámetro total del anillo y el diámetro del leño temprano. Para la medición de los anillos más periféricos de los árboles suprimidos fue necesario la ayuda de una lupa de 10X. Luego, para cada edad se calcularon las áreas para el anillo completo y para el leño temprano. Los valores de áreas del leño tardío para cada edad se obtuvieron por diferencia entre el dato del anillo completo y el área del leño temprano. Además, se determinó el área total de cada anillo mediante la diferencia entre los valores de dos anillos sucesivos y el área acumulada de la rodaja a cada edad (132).

Por otro lado, sobre una sección radial de las rodajas se determinó el contenido de humedad y la variación radial de la densidad anhidra, básica, estacionada y saturada. Sobre cada rodaja obtenida se marcó y cortó un listón central desde la médula a la corteza, en el cual se marcaron probetas de 2 cm x 2 cm x 2 cm, según la norma IRAM 9532 (133) e IRAM 9544

(134), para evaluar contenido de humedad y los 4 tipos de densidad, respectivamente. Se obtuvo un total de 1035 probetas. Se determinó el contenido de humedad (CH), la densidad básica (DB), densidad anhidra (DA), densidad estacionada (DE) y densidad saturada (DS) utilizando las ecuaciones 11 a 15, respectivamente.

$$CH = \left(\frac{P_h - P_0}{P_0} \right) * 100 \quad (11)$$

$$DB = \frac{P_0}{V_s} \quad (12)$$

$$DA = \frac{P_0}{V_0} \quad (13)$$

$$DE = \frac{P_e}{V_e} \quad (14)$$

$$DS = \frac{P_s}{V_s} \quad (15)$$

Dónde: Ph: peso húmedo, Po: peso anhidro, Pe: peso estacionado, Ps: peso saturado, Vo: volumen anhidro, Ve: volumen estacionado y Vs: volumen saturado.

La masa o peso de las probetas se determinó con balanza de precisión (marca OHAUS), con capacidad de registrar 0,01 g. El volumen se obtuvo mediante el método de desplazamiento de agua. El secado se realizó en estufa a una temperatura de 103 +/- 2 °C, hasta lograr el peso constante. Para lograr el peso y el volumen saturado se sumergieron las probetas en agua destilada hasta peso constante. Se consideró que el peso constante fue alcanzado cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas con intervalos de 6 horas fue igual o menor al 5 % del peso de la probeta.

Las densidades aparentes, fueron agrupadas en 4 clases de distancia radial relativa (DR) respecto a la médula, A: 0 y 25 %, B: 25,1 y 50 %, C: 50,1 y 75 % y D: 75,1 y 100 %.

3.4.2.2 Selección de rollizos y determinación de módulo dinámico en rollizos por resonancia

De cada árbol apeado (90 ejemplares) se tomó el rollizo obtenido entre 1,30 m y 4,45 m de altura (Figura 10a y 10b) y se midió el diámetro en punta fina y gruesa, y la frecuencia de la vibración de resonancia acústica.

Para obtener la frecuencia de la vibración de resonancia acústica se proporcionó un golpe de martillo en un extremo del rollizo y el impacto ocasionado permitió que el rollizo comience a vibrar en su frecuencia natural. La señal se recogió con un micrófono y la frecuencia de la vibración de resonancia acústica se obtuvo utilizando un Software con un analizador de espectro incorporado que determinó las frecuencias relativas mediante la transformada rápida de *Fourier* (FFT) (135) (Figura 10c). La velocidad acústica se calculó como el producto de dos veces la longitud y la frecuencia (ecuación 7 del capítulo 2).

Por otra parte, en el extremo de cada rollizo se extrajo una rodaja de 1" (Figura 10d) y sobre la misma se midió el espesor y el diámetro sin corteza de manera ortogonal. El peso de las rodajas se determinó con una balanza de precisión de 0,1 g y el volumen se calculó con las dimensiones del espesor y diámetros de las rodajas. La densidad verde promedio para el rollizo se determinó mediante la relación entre el peso y el volumen de las rodajas obtenidas de cada extremo del rollizo.

Posteriormente, con la velocidad acústica al cuadrado y la densidad verde se calculó el módulo dinámico para el rollizo.



Figura 10: a) Marcación de rollizos, b) Trozado y c) Medición de frecuencia natural de vibración resonante de la onda y obtención de rodajas en ambos extremos del rollizo.

3.4.2.3 Determinación de módulo de elasticidad dinámico en piezas aserradas de escuadrías comerciales con tres técnicas acústicas

Los 90 rollizos obtenidos entre 1,30 m y 4,45 m de altura fueron aserrados obteniéndose tirantes de 3"x3" y 3"x5" (piezas internas), y tablas de 1" y 1 ½" de espesor (piezas externas) y ancho variable, alcanzando un total de 274 piezas. Las mismas fueron numeradas y secadas en cámara al 12% de humedad. Posteriormente, se determinó el contenido de humedad en

cada pieza con un xilohigrómetro de agujas que funciona por el método de resistencia con una precisión de 0,2 % (Figura 11a).



Figura 11: a) Medición del contenido de humedad con xilohigrómetro. b) Apilado para posterior medición del MOE dinámico.

La longitud de las piezas fue registrada al milímetro, determinada en el sentido longitudinal y tomada en la zona central de la cara de mayor dimensión. Las medidas del ancho y alto de la sección transversal fueron tomadas en 3 regiones de la pieza, en el centro y en los extremos, con precisión de 0,01 mm, efectuándose luego un promedio de las medidas.

Para cada pieza se registraron observaciones consideradas de importancia para la interpretación de resultados, como madera interna, madera externa, tipos de corte (tangencial, radial, semitangencial), madera interna con o sin médula, cantidad de anillos presentes en cada pieza, y presencia de nudos y resinas, asignándole clases resistentes a cada tabla o tirante. La presencia de una característica o atributo de una variable cualitativa (médula, por ejemplo) se indicó con el número 1 (uno) y su ausencia con el 0 (cero).

Luego en cada una de ellas se determinó el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) con tres técnicas acústicas (Figura 11b), que se caracterizan por no alterar de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material bajo estudio. Posteriormente fueron ensayadas a la flexión estática y tipificadas visualmente por grado de resistencia.

✓ **Medición del módulo dinámico por vibración transversal y densidad de la pieza**

Se determinó la densidad (DensMet) y el MOE dinámico por vibración de las piezas aserradas (MOEv) con el equipo Metriguard® E-Computer – Modelo 340 (124) (Figura 12). Este cuenta con una balanza incorporada con la que se obtuvo el peso de la pieza (W). El dispositivo está conectado a un ordenador con un software incorporado que permite calcular el volumen con

las dimensiones de las piezas, previamente introducidas al sistema. También, el software cuenta con la opción de seleccionar si la especie pertenece a una conífera o latifoliada. Con los datos del peso (g) y el volumen (cm^3), estima la densidad (g/cm^3) de las piezas (escuadrías comerciales). Además, con los valores de frecuencia natural de vibración (f_n) y valores de ancho (b), espesor (h), longitud entre apoyos (L) y una constante de calibración (K), entrega en pantalla los valores del módulo de elasticidad dinámico por vibración transversal (MOEv), que es calculado a partir de la ecuación (16), según lo indicado en (136).

$$MOEv = \frac{f_n^2 \cdot W \cdot L^3}{K \cdot b \cdot h^3} \quad (16)$$

Donde MOEv: módulo de elasticidad dinámico por vibración transversal, f_n : frecuencia natural de vibración, W : peso de la pieza, L : distancia entre apoyos, K : constante de calibración, b : ancho (dimensión horizontal de la pieza), h : espesor (dimensión vertical de la pieza).

Para determinar la frecuencia natural de vibración, se colocó la pieza sobre los soportes, teniendo cuenta que la relación longitud/ancho debe ser superior a 18, en base a esto se determinó la distancia entre apoyos, luego se aplicó un golpe en el centro de la pieza (vibraciones transversales). Cuando la pieza dejó de vibrar (estabilizándose en valores únicos de MOE y densidad), los valores se presentan en la pantalla del ordenador.



Figura 12: Metriguard® Modelo 340 E-Computer. Tomada de Metriguard, 2002 (136).

Este equipo permite pesar piezas de 11 a 112 kg y medir piezas de longitudes entre 2,44 m y 25 m. La longitud máxima de la pieza está limitada por el espacio de trabajo disponible y por el arqueado de la muestra, no por limitaciones del sistema (E-Computer 340). Proporciona una medición precisa y repetible del MOEv, sin medir la deflexión.

✓ **Medición del módulo dinámico por el tiempo de vuelo (TOF) de la onda de impacto**

Con este método se utilizó el equipo *TreeSonic Timer* (Fakopp® Enterprise), que consta de un martillo, dos sensores con cables integrados, donde uno actúa como emisor y el otro como receptor de la onda y una unidad de control con un visor en el que queda reflejado el tiempo (en microsegundos) transcurrido en viajar de un extremo al otro de la pieza. El impacto se generó mediante un martillo de acero de 200 g, aplicando un golpe sobre el emisor (Figura 13). Se realizaron 5 medidas (n) directas del TOF en cada una de las piezas de madera y calculando la media aritmética ($TOF_{\bar{x}}$) para la obtención de la velocidad de propagación. Para ello, los dos sensores fueron insertados en los extremos de la pieza de manera enfrentada a una distancia “d” igual a la longitud de la pieza (m). El cálculo de la velocidad acústica se efectuó mediante ecuación 17 (35).

$$V = \frac{d}{TOF_{\bar{x}}} \quad (17)$$

Donde V velocidad acústica (m/s) obtenida a partir de $TOF_{\bar{x}}$ promedio (μs), d: separación entre sensores (m). Posteriormente, con este valor de V y la densidad de la pieza (ρ) obtenida con *Metriguard*® se calculó el módulo de elasticidad dinámico por impacto (MOE_i) (ecuación 18) (35).

$$MOE_i = V^2 * \rho \quad (18)$$

Para obtener el módulo de elasticidad dinámico por impacto (MOE_i) en GPa, emplear la V en km/s y la ρ de la densidad de la pieza en kg/m³.

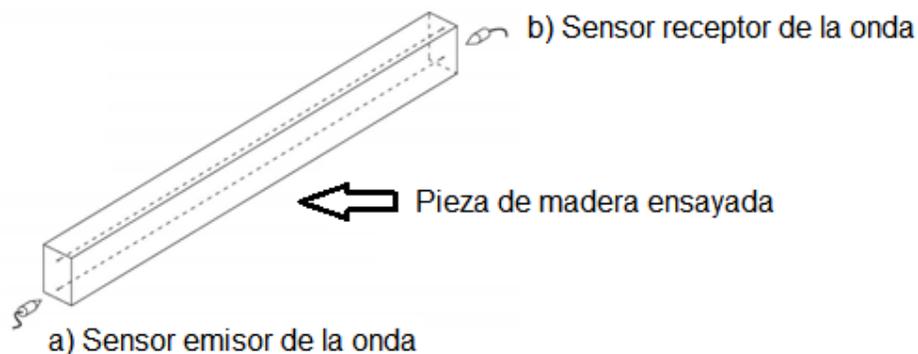


Figura 13: Esquema de medición del TOF en una pieza de madera aserrada. Figura modificada de Íñiguez González, 2007 (104).

✓ **Medición del módulo dinámico por resonancia acústica**

El clasificador de madera por resonancia marca Fakopp® (<https://www.fakopp.com/es/product/lumbergraderapp/>) es una herramienta sencilla, operada en el entorno Android de una tablet o un Smartphone que, mediante un software, que emplea la Transformada Rápida de *Fourier* (FFT) (135) permite determinar la frecuencia de la onda

de impacto, inducida con un golpe de martillo en uno de los extremos de la pieza aserrada. Ingresando los datos de la especie, la longitud de la pieza y su densidad (en este caso, el valor obtenido con el Metrigrad®) se puede visualizar en la pantalla la frecuencia alcanzada, la velocidad acústica y el módulo de elasticidad dinámico longitudinal por resonancia (MOEr) (135) (Figuras 14a y 14b).

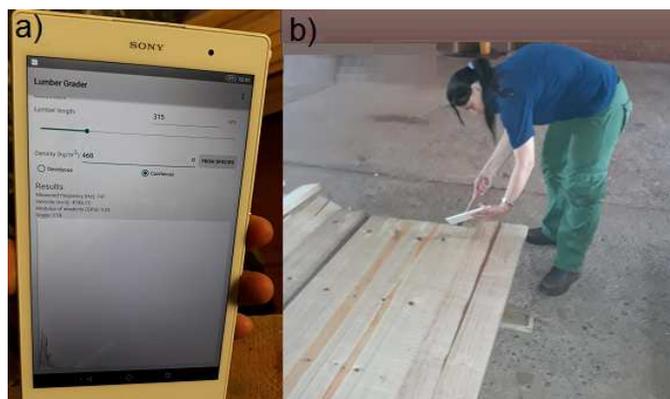


Figura 14: a) Pantalla de la tablet con ingreso y salidas de datos; b) Fotografía de la determinación del módulo dinámico por resonancia.

3.4.2.4 Determinación del módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática con máquina universal de ensayos en piezas aserradas con escuadrías comerciales

Para el ensayo a la flexión estática las tablas de ancho variable fueron ripeadas (o reaserradas) a un ancho final de 135 mm, para poder lograr la distancia entre apoyos, de 18 veces la altura de pieza (ancho), esto fue necesario debido a la limitación de la máquina universal de ensayo.

El ensayo a la flexión estática se realizó en el Laboratorio de Tecnología de la madera de la Facultad de Ciencias Forestales (UNaM). Se utilizó una máquina electromecánica universal de ensayos DIDACTA® modelo 10407030, de procedencia italiana, con capacidad de 300 kN y sensibilidad de 300N. Con este equipo se determinó el módulo de elasticidad (global) a la flexión estática (MOEe) y el módulo de rotura (MOR), documentándose también observaciones consideradas de importancia (cantidad de anillos, tipo de corte, presencia de médula, resinas y nudos (Anexo 4. Imágenes ilustrativas de las características de la madera evaluada). Dicha información fue obtenida con el software "MetroCom"-Dina 960 xp incorporado al equipo y siguiendo el procedimiento indicado en las normas UNE-EN 408 (137) e IRAM 9663 (67).

La longitud (L) de la pieza debe ser como mínimo igual a 18 veces la altura de la sección (h). Al momento del ensayo, los cuerpos de prueba fueron ubicados con una separación entre apoyos igual a $18h$ y cargados simétricamente a una distancia igual a $6h$ de cada apoyo, siendo h la altura de la sección transversal (Figura 15). Para evitar el aplastamiento localizado de la madera en los puntos de apoyo y de carga se colocaron placas de acero y para impedir el pandeo lateral de la pieza se colocaron topes laterales. El equipo cuenta con capacidad para desplazar el cabezal a una velocidad constante y registrar cargas con una precisión igual al 1 % del valor aplicado. Durante el ensayo, la velocidad de desplazamiento en milímetros/segundos (mm/s) del cabezal de carga no superó el valor de $0,003 \times h$ (h = altura de la probeta en mm). Las cargas y deformaciones dentro del período elástico fueron registradas por la máquina universal de ensayos.

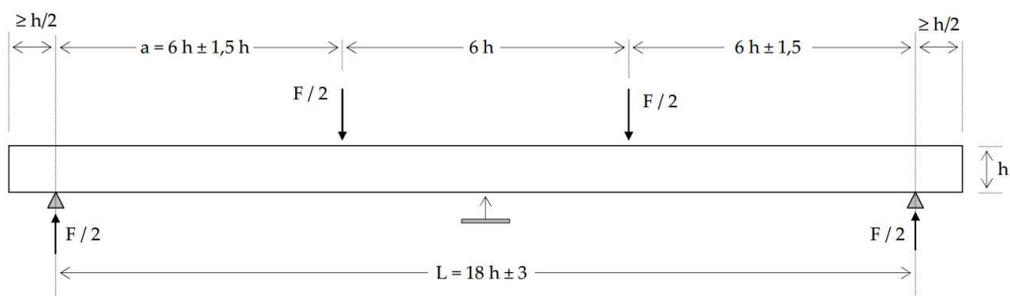


Figura 15: Esquema de ensayo para medición del módulo de elasticidad (global) a la flexión estática.

El ensayo se continuó hasta alcanzar la rotura de la pieza en el tiempo establecido (300 ± 120 s) por la norma IRAM 9663 (67). Se registró la carga máxima y la duración del ensayo. En la Figura 16 se puede observar un cuerpo de prueba sometido a ensayo con este equipamiento.



Figura 16: Cuerpo de prueba ensayado a la flexión estática.

Los valores del módulo de rotura (MOR) y del módulo de elasticidad global (MOEe) a la flexión fueron calculados según la norma IRAM 9663 (67) (ecuaciones 19 y 20).

$$MOR = \frac{3P_{m\acute{a}x} a}{bh^2} \quad (19)$$

$$MOEe = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{(w_2 - w_1)}{(P_2 - P_1)} \right)} \quad (20)$$

Donde $P_{m\acute{a}x}$: carga máxima, a: distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo, b: ancho de la sección transversal, h: altura de la sección, MOEe: módulo de elasticidad global a la flexión estática calculado experimentalmente, l: luz en flexión, $P_2 - P_1$: incremento de carga sobre la línea de regresión, $w_2 - w_1$: incremento de deformación correspondiente $P_2 - P_1$.

De las piezas ensayadas a la flexión estática se tomó una muestra de 10 repeticiones por familia y se determinó el contenido de humedad según el procedimiento explicado en el Apartado 3.4.2.1.

3.4.2.5 Clasificación visual estructural

Las 274 piezas previamente identificadas, registradas sus dimensiones y defectos según el Apartado 3.4.2.3 fueron tipificadas por grados de calidad según las normas IRAM 9662-3 (9), IRAM 9670 (10) y SPIB (112). Estas normas establecen un sistema de clasificación visual teniendo en cuenta la presencia de defectos, dimensiones y contenido de humedad y es aplicable a la madera aserrada de sección rectangular para especies de coníferas. Los criterios de clasificación visual y los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad para cada clase de resistencia según las normas IRAM 9662-3 e IRAM 9670 pueden observarse en el Anexo 1. Tablas 1 a 4. En el Anexo 4, se puede observar algunas imágenes ilustrativas de las características de la madera evaluada (cantidad de anillos, tipo de corte, presencia de médula, resinas y nudos).

3.4.2.6 Determinación del contenido de humedad, contracción axial radial tangencial y volumétrica del estado estacionado al anhidro y del estado saturado al anhidro, coeficiente de retracción y anisotropía

De cada cuerpo de prueba ensayado mecánicamente, se marcaron (Figura 17a) e identificaron probetas (320 probetas por planos de corte: tangencial, radial y axial, Figuras 17b, 17c, 17d, respectivamente) para determinar el contenido de humedad y cambios

dimensionales (contracciones lineales y volumétricas, coeficiente de contracción y anisotropía), según la norma IRAM 9543 (138).

Las contracciones lineales y volumétricas se determinaron en los tres planos de corte: tangencial, radial y longitudinal (Figuras 17 b, c y d).

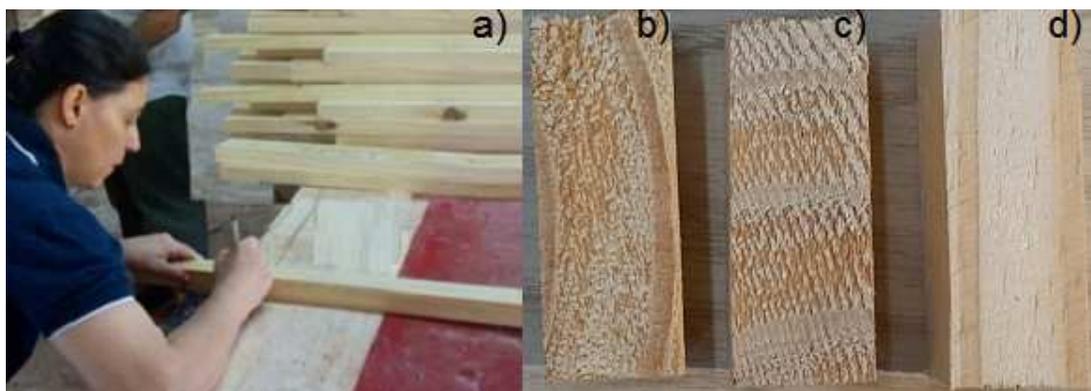


Figura 17: Marcación de probetas para determinar contenido de humedad y contracciones lineales y volumétricas.

Para determinar las contracciones del estado saturado al anhidro (contracción total o máxima) (CT Vol_{Sat-An}) y del estado estacionado al anhidro (contracción lineal) (C Vol_{E-An}), coeficiente de retracción (CR) y anisotropía de la madera (Anis), se utilizaron las ecuaciones 21 a 24.

$$CT\ Vol_{Sat-An} = \left(\frac{L_s - L_0}{L_s} \right) * 100 \quad (21)$$

$$C\ Vol_{E-An} = \left(\frac{L_e - L_0}{L_e} \right) * 100 \quad (22)$$

$$CR = \frac{C}{H\%} \quad (23)$$

$$Anis = \frac{\beta_t}{\beta_r} \quad (24)$$

Donde, CT Vol_{Sat-An}: contracción total o máxima (%), C Vol_{E-An}: contracción lineal (%), L_e: longitud en estado estacionado (cm), L₀: longitud anhidra (cm), L_s: longitud saturada (cm), CR: coeficiente de retracción, Anis: Anisotropía de la contracción, β_t: contracción tangencial y β_r: contracción radial.

Para la comparación de sitios y materiales genéticos (familias), los valores de la densidad aparente estacionada obtenida con el equipo Metriguard® (DensMet), el módulo de rotura y

los módulos de elasticidad (estático y dinámicos) para piezas de escuadrías comerciales, y la densidad estacionada para probetas pequeñas estandarizadas (DE) obtenidos experimentalmente de los ensayos, fueron corregidos al 12 % de contenido de humedad, aumentándose el valor de la densidad, del módulo de rotura y del módulo de elasticidad estático y dinámicos en un 0,5 %, 2 % y 1 %, respectivamente, por cada 1% de disminución en el contenido de humedad de las piezas de madera y viceversa (139,140). Esta corrección resulta fundamental porque de acuerdo a lo expresado por Coronel (59), este parámetro se encuentra estrechamente relacionado con las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

Posteriormente para comparar los “valores experimentales” de las propiedades físicas y mecánicas obtenidos para el pino híbrido F₁ INTA-PINDO con los “valores característicos” por grados de calidad establecidos por la norma IRAM 9662-3 (9), se determinó el “**valor característico**”¹ para la rigidez, resistencia y densidad como indica la norma 9664 (139):

- El valor del MOE característico medio es calculado a un contenido de humedad de referencia de 12 % (MOE_k).
- El valor del MOR característico es el percentil 5 % de los datos de la muestra calculado para una altura de referencia de 150 mm ($h = 150$ mm ($k_h = (150/h)^{0,2}$) (MOR_k).
- El valor de densidad característica es el percentil 5 % de los datos de muestra a un contenido de humedad de referencia de 12 % (ρ_k).

El tamaño de muestra adoptado contempla en todos los casos la cantidad mínima de cuerpos de prueba admitida estadísticamente (139).

¹Valor característico: es el valor representativo de una propiedad del material utilizada en el cálculo, que se basa en los valores del percentil del 5 % para propiedades de resistencia y densidad y en valores medios para el módulo de elasticidad (Norma IRAM 9662-3).

3.5. Procesamiento y análisis de datos

Luego de finalizar los ensayos y obtener los datos para cada variable estudiada se realizó el procesamiento de los mismos.

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Statgraphics® *Centurion XV*, Versión, 2006 (141) y el software InfoStat® (142). Se empleó un nivel de significancia de 5 %.

Para las distintas variables se calcularon en primera instancia los estadísticos descriptivos. Los datos extremos considerados “*outliers*” se desestimaron del análisis y se recurrió a herramientas gráficas para determinar la normalidad de la distribución de las variables y homogeneidad de varianza.

Para constatar el cumplimiento de homocedasticidad, se utilizaron los gráficos de predichos versus residuos. Los residuos indican las desviaciones de cada valor observado para la variable dependiente y la media de su grupo. Son útiles para comprobar visualmente la hipótesis de homocedasticidad.

Para el análisis de la base de datos generada, se recurrió a modelos lineales mixtos (MLM) (143). Esta herramienta permite modelar las múltiples mediciones de las variables respuestas, en función de las covariables y la correlación entre las mismas. Comprende la determinación de efectos aleatorios y fijos, elección de covariables y la especificación de la estructura de correlación de los errores aleatorios. Para modelar las varianzas y covarianzas de los términos del error asociados a las observaciones se utilizó la estructura de errores independientes, sin estructura y la auto-regresiva de orden 1 (AR 1). Según Balzarini *et al.* (144), esta última estructura del error es una de las más comúnmente usadas para análisis de datos longitudinales igualmente espaciados.

El análisis de datos con modelos lineales generales y mixtos (MLM) (143) permite especificar la estructura de correlación y de varianza de los errores. La selección de modelos se realizó teniendo en cuenta los menores valores de los parámetros de Akaike (AIC) y Bayesiano de Schwarz (BIC) (145). El modelo lineal mixto utilizado puede expresarse de acuerdo a la ecuación 25.

$$Y_i = X_i\beta_i + Z_i b_i + e_i \quad (25)$$

Donde Y_i es el vector de respuestas (datos), X_i y Z_i son matrices de diseño conocidas, β es un vector de parámetros fijos y b_i de efectos aleatorios, y e_i (error) un vector aleatorio no observables.

Los efectos aleatorios están asociados a grupos de observaciones. Ejemplos típicos pueden ser las medidas repetidas sobre un mismo individuo o las respuestas observadas en grupos de unidades experimentales homogéneas (bloques) o en los individuos de un mismo grupo familiar. Estos efectos aleatorios son “agregados” a los efectos fijos de manera selectiva. Por lo tanto, en la especificación de los efectos aleatorios es necesario tener uno o más criterios de agrupamiento o estratificación, y elegir sobre qué efectos fijos se agregan los efectos aleatorios asociados. Los árboles (individuos) fueron seleccionados en forma aleatoria y también producen un efecto aleatorio (por ejemplo, la variabilidad genética individual propia del árbol).

Los efectos aleatorios (b_i) se consideran, a diferencia de un efecto fijo (β_i), como variables aleatorias idénticamente distribuidas $N(0, \sigma_b^2)$ y cuyas realizaciones se interpretan como los efectos de los distintos árboles (ejemplares). Luego en estos modelos, los b_i no se estiman, lo que se estima es el parámetro σ_b^2 que caracteriza a su distribución. Los errores aleatorios (e_i) también se interpretan como variables aleatorias idénticamente distribuidas $N(0, \sigma_e^2)$ y describen a los errores aleatorios asociados a cada observación. Se supone, además, que los efectos aleatorios b_i y e_i son independientes.

Entonces, la varianza de los efectos aleatorios (árboles), fue estimado con la ecuación 26:

$$\sigma_b^2 = (\sigma_b * \sigma_e)^2 \quad (26)$$

Donde σ_b es la desviación estándar de los b_i relativa al residual de los efectos fijos y σ_e es la desviación estándar de los e_i relativa al residual de los efectos aleatorios.

Verificada la normalidad de los datos, la comparación de medias de las diferentes variables se efectuó mediante la prueba de formación de grupos excluyentes DGC (146).

Especificación de la estructura de correlación y de varianza de los errores

Las estructuras de varianzas y de covarianzas pueden modelarse separadamente. Para ello, InfoStat® presenta dos solapas: en una de ellas se encuentran las opciones para especificar la estructura de correlación de los errores y en la otra, permite seleccionar distintos modelos para la función de varianza (Heteroscedasticidad).

La especificación de la correlación que utiliza el InfoStat® corresponde a modelos de errores independientes, de simetría compuesta, sin estructura, autorregresivo continuo de orden 1 y

el modelo ARMA (p,q), donde p indica el número de términos autorregresivo y q el número de términos de medias móviles (moving average).

Para la estructura de varianzas de los errores, InfoStat® permite contemplar modelos heteroscedásticos. La heteroscedasticidad sin embargo no tiene un origen único y puede modelarse. El modelo para las varianzas de los errores se puede especificar de la siguiente manera: $\text{var}(\varepsilon_i) = \sigma^2 g^2(\mu_i, Z_i, \delta_i)$ donde $g(\cdot)$ se conoce como *función de varianza* de los errores. Esta función puede depender de la esperanza (μ_i) de Y_i (la variable respuesta), de un conjunto de covariables (Z_i) y de un vector de parámetros (δ). InfoStat®, a través de R® (software libre), estima los parámetros δ de acuerdo a la función de varianza seleccionada.

Las funciones de varianza admitidas pueden ser identidad (varIdent), exponencial (varExp), potencia (varPower), potencia corrida por una constante (varConstPower), o fija (varFixed). El Software R (147) admite que varios modelos de varianza puedan superponerse, es decir, que para ciertos grupos de datos la varianza puede estar asociada con una covariable y para otros grupos de datos la varianza puede atribuirse a otra covariable. La especificación simultánea de varios modelos para la función de varianza se obtuvo, simplemente, marcando y especificando cada uno de los componentes y agregándolos a la lista de funciones de varianza e InfoStat® armó la sentencia apropiada para R. La varianza de la variable respuesta sería la suma de las varianzas de la parte aleatoria, es decir $\text{var}(Y_i) = \sigma_{b0}^2 + \sigma_i^2$. Para la elección del modelo más parsimonioso se utilizaron los criterios AIC y BIC (143–145).

Las variables que no presentaron distribución normal fueron analizadas con modelos lineales generalizados mixtos (MLGM) (148), utilizando el software InfoStat® (142).

Un modelo lineal generalizado es un modelo de regresión que consta de tres componentes claves: una fija, una aleatoria y la función de enlace “g”.

La componente sistemática o fija, indica la relación entre las variables independientes. Éste es un modelo lineal (es decir, los parámetros entran linealmente al modelo). Por ejemplo: $\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$, donde α, β_1, β_2 , son coeficientes del modelo, x_1, x_2 son variables explicativas.

La componente aleatoria (la distribución de las Y_i). En general, se supone que las Y_i son independientes, con una distribución que pertenezca a la familia exponencial lineal (por ejemplo: normal, binomial, poisson, poisson compuesta, gamma, binomial, binomial negativa, chi cuadrado, inversa gaussiana, geométrica).

La función de enlace, que es la que vincula la media (esperanza) de la distribución de las Y_i con la componente sistemática. Por ejemplo, $g(\mu_i) = \log(\mu_i) = \alpha + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i}$. La componente sistemática viene dada por la función de enlace, $g(\mu)=X\beta$. Esta función de enlace, debe tener inversa, μ =media esperada, X =variables explicativas y se denominan matriz de diseño (fija) y se define $\mu=E(Y)$, β =coeficientes del modelo (144,145,149).

Los modelos lineales generalizados poseen una gran ventaja sobre los modelos lineales usuales, debido a que permiten la elección de la distribución de la variable dependiente dentro de una gama de distribuciones, admitiendo un análisis estadístico del modelo en cuestión que es válido para cualquier distribución que se haya escogido para la variable dependiente. Todo esto contribuye a estudiar la componente sistemática con una mayor libertad. Para emplear estos modelos, se buscó la distribución (función de enlace "g") que mejor representaba los datos.

Para la evaluación de la **velocidad acústica** y del **módulo dinámico de los árboles en pie a los 10 y 11 años**, se tomaron como fuentes de efectos fijos a los sitios, familias y la interacción sitios-familias. Árbol fue considerado como fuente de variación aleatoria.

Para el análisis del **módulo de elasticidad dinámico de rollizos** se utilizó MLGM, empleándose las variables de efectos fijos: sitios y familias.

Para la madera aserrada (tablas y tirantes), el análisis de las variables **densidad obtenida con el Metriguart®, módulo de elasticidad dinámico por vibración transversal (MOEv), por resonancia (MOEr), por impacto (MOEi), módulo de elasticidad (MOEe) y módulo de rotura (MOR) a la flexión estática** se empleó al árbol como variable de efecto aleatorio. Las variables de efecto fijo fueron: sitios, familias y tipo de pieza.

Para la madera tipificada por las normas de clasificación visual y el contenido de humedad de la madera se efectuó una estadística descriptiva de cada material evaluado.

Ajuste de modelos de predicción del módulo de elasticidad a la flexión estática

Se recurrió a herramientas gráficas para determinar la normalidad de la distribución de las variables. Para la independencia de los residuos se utilizó el test de Durbin-Watson.

La verificación de la precisión de los dispositivos acústicos utilizados en la evaluación de la calidad estructural de la madera aserrada, fue realizada mediante el ajuste de ecuaciones de regresión lineal múltiple recurriendo a variables *Dummy* (150,151), para explicar las relaciones

entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad estático para piezas internas y externas.

El ajuste de ecuaciones de regresión lineal múltiple con variables *Dummy* se refiere a la técnica de análisis de regresión que se utiliza para modelar la relación entre una variable dependiente (módulo de elasticidad estático) y dos o más variables independientes (módulo de elasticidad dinámico y posición de la pieza: interna y externa). Las variables *Dummy* son variables binarias que se utilizan para representar variables categóricas en un modelo de regresión lineal múltiple. En este caso, hace referencia al tipo de pieza. Es decir, cuando el tipo de pieza corresponde a la posición interna (TP=interna), $X=1$, cuando la pieza es externa (TP=externa), $X=0$.

El ajuste de ecuaciones de regresión lineal múltiple con variables *Dummy* implica incluir estas variables binarias en el modelo de regresión lineal múltiple y utilizarlas para explicar la variación en la variable dependiente. Este enfoque es especialmente útil cuando las variables categóricas no pueden ser tratadas como variables numéricas continuas y se desea controlar el efecto de dichas variables en el modelo de regresión.

Entonces, se ajustó un único modelo (ecuación 27), teniendo en cuenta la posición de la pieza (variable *Dummy*). Es decir, cuando el tipo de pieza corresponde a la posición interna (TP=interna) $X=1$ (ecuación 28), mientras que $X=0$ cuando la pieza es externa (TP=externa) (ecuación 29).

Modelo General:

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_i + \beta_3 D_{1i} + \varepsilon \quad (27)$$

Modelos reducidos:

a) Piezas internas:

$$E(Y_i/D_{1i} = 1, X_i) = (\beta_1 + \beta_3) + \beta_2 X_i \quad (28)$$

b) Piezas externas:

$$E(Y_i/D_{1i} = 0, X_i) = \beta_1 + \beta_2 X_i \quad (29)$$

Donde Y_i : variable dependiente; β_1 , β_2 y β_3 : coeficientes del modelo; X : variable regresora cuantitativa; D : variable auxiliar o *Dummy*; E : error. El número de variables auxiliares D_i a incluir es igual al número de niveles del factor de clasificación que se desea modelar menos uno. Cada variable auxiliar es una variable dicotómica que asume el valor 1 sólo para un nivel del factor de clasificación. La variable D adoptó el valor 1 para piezas internas y 0 para piezas externas.

Se consideró como mejor modelo de la predicción del módulo de elasticidad estático, al que presentó el mayor coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado), el menor error estándar (MSE) y mejor distribución de los residuos.

La aptitud de los modelos elegidos se verificó con la bondad del ajuste contra sus propios datos. Para ello se efectuó una regresión lineal entre valores de MOE observados versus MOE estimados, determinándose el error porcentual con la ecuación (30).

$$Error (\%) = \left(\frac{\text{valor observado} - \text{valor estimado}}{\text{valor observado}} \right) * 100 \quad (30)$$

Se efectuó el test de regresión lineal entre valores de módulo dinámico observado y módulo estático estimado. En este último test, si el modelo era adecuado, la regresión coincidía con la bisectriz del primer cuadrante, contrastándose mediante la prueba de F con un nivel de significación $\alpha=0,05$. La hipótesis nula fue que el intercepto es=0 y la pendiente=1 en forma simultánea (152). Finalmente, se evaluó la validez de los modelos con datos disponibles de una fracción de la muestra utilizada para el desarrollo del modelo.

Para el análisis de las **propiedades relacionadas a la estabilidad dimensional** (contracción volumétrica del estado estacionado al anhidro (C Vol_{E-An}) y del estado saturado al anhidro (CT Vol_{Sat-An}), coeficiente de retracción radial (CR Rd) y tangencial (CR Tg), y anisotropía (Anis), se utilizaron a los sitios y a las familias como efectos fijos, y al árbol como efecto aleatorio.

Para el análisis de las variables respuestas relacionadas a la **coloración**, se consideró como efecto aleatorio el árbol y como efectos fijos sitios, familias y altura de fuste. Para el **ancho y área de anillo** se incorporó, además, el efecto fijo edad. Las variables no significativas fueron extraídas del análisis. Para aquellas variables que resultaron con diferencias estadísticas significativas, se utilizó la prueba LSD de Fischer para la comparación de pares de medias. También se realizaron análisis multivariado. Las variables porcentaje de área coloreada y ancho de anillos de crecimiento se utilizaron para agrupar a las familias con porcentaje similar de área coloreada y por crecimiento semejante, a través de la técnica denominado “*Conglomerados*”. Se utilizó el método de agrupamiento jerárquico (teniendo en cuenta los Promedios Ponderados) y como medida de similitud la Distancia Euclídea.

Para la comparación de sitios y familias a nivel de **densidad aparente (básica, anhidra, estacionada y saturada)** de probetas estandarizadas pequeñas, se tuvieron en cuenta las

muestras obtenidas **a la altura de fuste de 1,30 m**. Se empleó al árbol como variable de efecto aleatorio, y sitios y familias como efectos fijos.

Para evaluar la **variación radial** (distancia relativa: DR) **y axial** (altura de fuste: HF) **de las densidades aparentes** dentro de cada sitio, se consideraron las muestras obtenidas a las alturas de fuste de 0,10 m, 1,30 m y 4,45 m, agrupándose a todas las familias como único material de pino híbrido F₁ INTA-PINDO, y considerándose la DR y HF como efectos fijos y el árbol como variable aleatoria.

Para el análisis de las **características anatómicas**, para cada sitio y edad (4, 7, 10 y 11 anillos), se tomó la familia como fuente de efecto fijo y se incluyó al árbol como fuente de variación de efecto aleatorio. Se utilizó la técnica de análisis multivariado denominado "Conglomerados o Análisis de Cluster" para diferenciar el límite entre madera juvenil/madura. Se utilizó el método de agrupamiento jerárquico (teniendo en cuenta los Promedios Ponderados) y como medida de similitud la Distancia Euclídea.

También se realizaron análisis de correlación múltiple entre distintas variables para determinar el grado de asociación entre las mismas. El coeficiente de correlación de Pearson (r) se mide en una escala de 0 a 1, tanto en dirección positiva como negativa. Un valor de "0" indica que no hay relación lineal entre las variables. Un valor de "1" o "-1" indica, respectivamente, una correlación perfecta positiva o negativa, respectivamente entre dos variables.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de la madera en pie a los 10 y 11 años

Los valores promedios obtenidos a los 11 años de edad para los caracteres medidos pueden apreciarse en la Tabla 2. Con bajos coeficientes de variación (< al 5 %) para los valores de densidad y contenido de humedad, altos valores para el DAP y el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) (> a 20 %) e intermedio para la velocidad acústica (V) (15 %). El valor promedio de la V para árboles en pie se encuentra dentro del rango determinado para coníferas. Wang *et al.* (31) indicaron para el género *Pinus* valores entre 1.880 a 4.484 m/s. No obstante, según indican Essien *et al.* (153) y Briggs *et al.* (154) estos valores pueden variar según la edad y densidad del rodal, índice de sitio y de acuerdo a la calidad de la madera dentro de la porción evaluada. Auty y Achim (40) demostraron para madera de *P. sylvestris* que la velocidad acústica aumentó con la edad, aunque de manera no lineal. La velocidad de propagación de una onda dentro de la madera es mayor para traqueidas más largas (115,155–157). En la dirección longitudinal (el sonido se transmite más rápidamente debido a la orientación de las células en este eje (propagación por las traqueidas) propiciando un camino continuo para las ondas (156,157), es menor en la dirección radial (propagación por los radios), y más reducida aún en la dirección tangencial. También la V es mayor para maderas de densidades más elevadas, en cualquiera de las tres direcciones considerando un contenido de humedad constante para la muestra (115,156–158). Asimismo, la velocidad longitudinal y la rigidez aumentan con la reducción del AMF (46,115) y disminuyen a medida que aumenta la porosidad y permeabilidad de la pared celular, considerando una densidad constante en una dirección dada (156,157). Del mismo modo, la V aumenta cuando existe una mayor continuidad de las regiones cristalinas de la pared celular (mayor presencia de celulosa), y decrece con el aumento de regiones amorfas (debido a la presencia de un mayor contenido de hemicelulosas y lignina respecto a la cantidad de celulosa) (156,157). El contenido de celulosa está fuertemente asociado con la velocidad acústica y el MOE. Por otro lado, la relación existente entre la V y el contenido de humedad es inversa. El agua libre aumenta la atenuación de las ondas, resultando en una disminución de la V en las direcciones longitudinal, radial y tangencial (115,156,157,159). Las variaciones en el ángulo de las fibras, incluidos nudos/ramas y dirección del grano (espiralado) reducen la velocidad, debido a que la señal acústica tiende a seguir el grano y desplazarse alrededor de los nudos (117). Existe una influencia marcada del tipo de nudo y diámetro del mismo (41,157,160). Por esta razón en madera no podada y en rollizos superiores a la altura de poda, se podrían alcanzar menores valores de V (160). Como indicaron los estudios de Lasserre *et al.* (41) y Chauhan *et al.* (119) la remoción de corteza y ramas incrementan el MOEd promedio de los rollizos.

Tabla 2: Variables medidas sobre árboles en pie a los 11 años de edad para las familias de ambos sitios.

Variable	n	Media	Mín.	Máx.	CV
DAP (cm)	350	27,0	11,1	42,0	20,8
H (m)	350	21,6	12,8	29,4	13,3
DB (kg/m ³)	350	432	400	484	4,3
CH (%)	350	57,5	51,5	61,1	3,5
DV (kg/m ³)	350	1.020	952	1.091	3,4
V (m/s)	350	3.632	2.155	4.677	15,1
MOEd11 (GPa)	350	13,7	4,7	23,1	29,6

DAP y H: diámetro a la altura de pecho y altura total de todos los árboles del ensayo, DB: densidad básica, CH: contenido de humedad, DV: densidad verde, V: velocidad acústica y MOEd11: módulo de elasticidad dinámico de árboles en pie a los 11 años, respectivamente. n: número de árboles, Mín.: mínimo, Máx.: máximo, CV: coeficiente de variación

Verificada la normalidad de los datos de MOEd de árboles en pie a los 10 y 11 años de edad mediante histograma de frecuencia (Figuras 18a y 18b), se realizó el análisis con modelos mixtos, seleccionando los modelos con menores valores de AIC y BIC, con estructura de correlación errores independientes y heteroscedasticidad identidad (varIdent) (Anexo 5. Tabla 1).

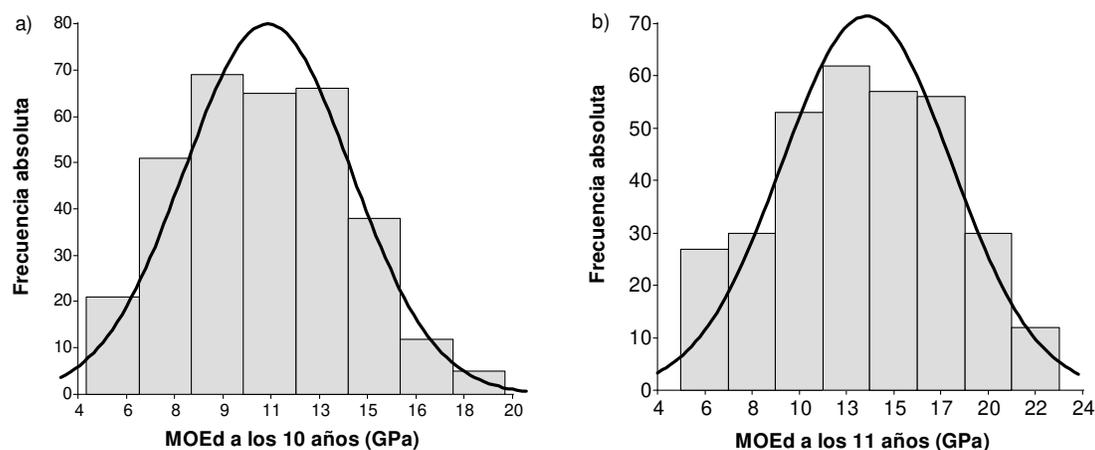


Figura 18: Histograma de frecuencias para el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) a los a) 10 y b) 11 años correspondiente al total de árboles en pie.

No se detectaron diferencias significativas para el MOEd a nivel de sitio para ninguno de los años evaluados (valor-p=0,2139 a los 10 años y valor-p=0,1110 a los 11 años), pero sí entre familias a los 10 y 11 años (valor-p<0,0001 para ambas edades). En el Anexo 5. Tabla 2 y 3

se puede observar las salidas del InfoStat® para los modelos seleccionados para el MOEd10 y MOEd11, respectivamente.

Los valores medios de MOEd en el sitio 1 y 2 a los 10 años de edad fueron de 11,13 y 11,06 GPa, respectivamente. Mientras que, los 11 años de edad fueron de 13,87 GPa en el sitio 1 y de 13,51 en el sitio 2 (Anexo 5. Tabla 2 y 3). Valores promedios similares de MOEd fue obtenido por Rotundo (15) a la edad de 11 años para los mismos ensayos considerando la totalidad de las familias establecidas en cada sitio (37 en el sitio 1 y 66 en el sitio 2). Valores inferiores (MOEd < 10 GPa) fueron reportado por Bailleres *et al.* (7) en plantaciones comerciales de pino híbrido F₂ (PEE × PCH) establecidos en Australia a los 10 años de edad, analizando muestras radiales del fuste a través de una metodología basada en ultrasonido. En Sud África, Wessels *et al.* (161) también informaron valores promedios inferiores de MOEd (entre 8,71 y 10,24 GPa) en parcelas experimentales de pino híbrido F₁ (PEE × PCH) de 9 y 11 años, respectivamente.

Por otro lado, los MOEd familiares considerando ambos sitios estuvieron entre 9,00 y 13,18 GPa a los 10 años (rango 4,18 GPa), y 9,83 y 17,24 a los 11 años (rango 7,41 GPa); detectándose diferencias significativas entre familias híbridas para ambos años evaluados (Figura 19).

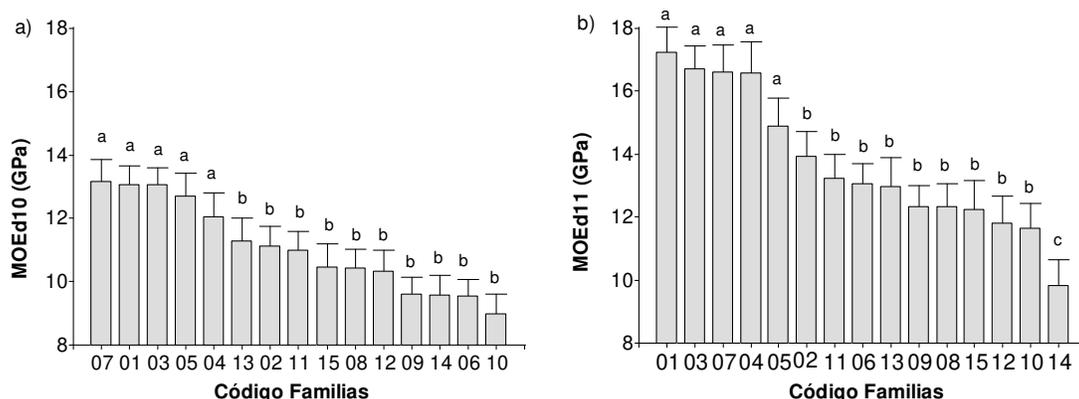


Figura 19: Módulo de elasticidad de los árboles en pie por familias. a) a los 10 años, b) a los 11 años de edad. n = 345. Las barras indican los errores estándares. Medias con letras distintas son significativamente diferentes (valor-p≤0,05) para el test de DGC.

También se pudo constatar que el incremento anual en el valor medio del MOEd fue menor a 1 GPa para las familias perteneciente a la clase inferior del ranking de crecimiento (familias 14 y 15), y fue superior a los 4 GPa/año para las familias 01 y 04 de la posición 1 del ranking de crecimiento. Harding *et al.* (162) analizando 18 familias híbridas F₁ en Australia a los 20

años de edad, reportaron un promedio de MOEd de 9,3 GPa. Este valor es inferior a los promedios obtenidos en esta tesis, aun tratándose de una mayor edad, esto puede atribuirse a que emplearon densidad básica de la madera en vez de la densidad verde (DV) en la estimación de la rigidez del árbol en pie.

Las familias con mayores valores de MOEd para árboles en pie a los 10 y 11 años, fueron la 01, 03, 04, 05 de la posición 1 del ranking y la 07 de la posición 2 del ranking de crecimiento (Anexo 5. Tabla 2 y Tabla 3). Los valores medios de MOEd para estas 5 familias fueron mayores a 12,04 y 14,88 GPa a los 10 y 11 años, respectivamente.

A los 10 años, las familias con mayor V (orden decreciente) fueron la 03, 01, 07, 05 y 04 (>3.567 m/s) y a los 11 años las familias (orden decreciente) 07, 03, 01, 04 y 05 (>3.840 m/s) (Anexo 5. Tabla 4 y Tabla 5). Si bien, no se mantuvo el mismo ordenamiento para ambos períodos evaluados, fueron las mismas identificadas como sobresalientes a los 10 y 11 años de edad. Por otro lado, tanto con la V como con el MOEd, las familias identificadas con mejor desempeño fueron las mismas. La ventaja de utilizar en este caso la V y no el MOEd, es que no es necesario determinar la densidad (parámetro involucrado en la estimación del MOEd), haciendo más lento el proceso de evaluación de los materiales en pie.

Las varianzas para el MOEd a los 10 y 11 años de los efectos aleatorios (árboles) fueron calculadas con la ecuación 26 del Apartado 3.

$$\sigma_b^2 MOEd10 = (0,96 * 2,56)^2 = 6,0 Gpa$$

$$\sigma_b^2 MOEd11 = (1,24 * 3,31)^2 = 16,8 Gpa$$

El residual del efecto aleatorio fue mayor que el residual del efecto fijo, indicando esto que la variancia, está más influenciada por el efecto aleatorio del árbol, que por el efecto fijo de los sitios y familias. Además, la variancia aumentó más del doble con la edad del rodal. También Bailleres *et al.* (7) encontró para pino híbrido F₂ (PEE × PCH) de 18 años de edad, una gran variación en el MOEd entre árboles (rangos de 8 y 13 GPa) en una misma parcela.

Se encontró para el pino híbrido F₁ INTA-PINDÓ mayores valores de velocidad acústica y módulo de elasticidad dinámico de árboles en pie a los 10 y 11 años para las familias de mayor crecimiento (ranking 1), con mayor diámetro promedio a la altura de pecho. Resultados similares fueron obtenidos por Wang *et al.* (163), quienes determinaron que el diámetro del rollizo tuvo un efecto significativo V y MOEd determinada en los rollizos. Indicaron valores superiores de MOEd y estático para rollizos de mayores diámetros para todas las especies analizadas (abeto y 3 especies de pino). También Essien *et al.* (153), estudiando la influencia

del raleo sobre la V y el MOEd para *P. taeda* de 29 años de edad y con tres espaciamientos diferentes (con raleos previos), indicaron que el MOEd fue mayor para los árboles obtenidos de los tratamientos raleados, a pesar de poseer diámetros de hasta un 28 % más grandes. Mientras que, Briggs *et al.* (154) evaluando el efecto del raleo, la edad del rodal, la densidad del rodal y el índice de sitio sobre V del árbol en pie para *Pseudotsuga menziesii*, indicaron resultados contradictorios, que la V disminuye con el DAP, y se ve negativamente afectada por la densidad inicial del rodal (árboles/ha) y el cambio de densidad producido por el raleo. Por otro lado, los autores Lasserre *et al.* (164) y Carson *et al.* (165) reportaron para *Pinus radiata* una relación negativa entre la rigidez y el diámetro a diferentes densidades de plantación. También Bailleres *et al.* (7) demostraron para pino híbrido F₂ (PEE × PCH) una relación negativa entre diámetro y MOEd. Sin embargo, Li *et al.* (166) señalaron que el diámetro no está genéticamente correlacionado con el MOE y, por lo tanto, es posible que un árbol de gran diámetro origine madera dura de alta densidad y alto módulo de elasticidad, y al mismo tiempo, otro ejemplar de dimensiones similares produzca madera menos rígida (menor valor de módulo de elasticidad).

Por otra parte, se observaron correlaciones fuertes y altamente significativas entre las variables medidas a los 10 y 11 años (Tabla 3). No se encontró correlación (valor-p>0,05) de la esbeltez (relación h/dap) con la V ni con el MOEd a los 10 y 11 años de edad. A diferencia, Roth *et al.* (101) y Essien *et al.* (153) establecieron para *P. taeda* una relación positiva con la esbeltez.

Tabla 3: Correlaciones de Pearson para variables medidas en árboles en pie (a nivel árbol, n= 345).

	V10	MOEd10	V11	MOEd11
V10	1	0,97***	0,72***	0,73***
MOEd10		1	0,72***	0,73***
V11			1	0,99***
MOEd11				1

***Correlaciones altamente significativas (valor-p≤0,001).

En este estudio se encontró una correlación positiva entre los valores de V obtenidos en dos años consecutivos (V10 y V11), entre V10 y MOEd10 y V11 y MOEd11. Varios autores indicaron que la V es un parámetro clave para estimar la rigidez de la madera ($a > V > \text{MOEd}$). Entre ellos se pueden mencionar, el estudio realizado por Bailleres *et al.* (7) quienes emplearon distintos MND para la evaluación de la calidad estructural de la madera de PEE, PCH y pino híbrido F₁ y F₂ (PEE × PCH) desarrollado en Australia y *P. taeda*. También Jones

et al. (160) y Grabianowski *et al.* (120) evaluaron la rigidez de la madera de *P. radiata*, y Wu *et al.* (72) *P. radiata* y *P. caribaea* a través de la velocidad acústica.

La V a nivel árboles en pie aumentó entre los 10 y 11 años (221 m/s). Coincidiendo con lo expresado por Grabianowski *et al.* (120) y Chauhan y Walker (119). Los resultados logrados de las mediciones realizadas en los dos años consecutivos, indicaron consistencia entre los datos obtenidos en los dos períodos. Las familias (01, 03, 04, 05 y 07) identificadas con mejor desempeño fueron las mismas a los 10 años y 11 años de edad ($> V$ y $> MOEd$) (Anexo 5. Tablas 2, 3, 4 y 5), indicando que el equipo *TreeSonic* de Fakopp® resultó eficiente para determinar el módulo de elasticidad dinámico de la madera de los árboles en pie. Esto manifiesta que este método ofrece un alto potencial de uso para nuestra región, siendo recomendable su utilización en procesos de selección. Coincidiendo con lo expresado en los trabajos de Winck *et al.* (14,167,168), Rotundo (15) y Rotundo *et al.* (169) para estos mismos materiales genéticos.

Las técnicas acústicas pueden emplearse operativamente como una herramienta eficaz para realizar comparaciones de la rigidez de los árboles en pie. Y de gran utilidad en la selección de material genético y evaluación del efecto de las prácticas silvícolas sobre la rigidez, mostrándose como herramientas prácticas y prometedoras. La relación entre V y MOEd determinada en este estudio (positiva y altamente significativa, $r=0,99$ y valor- $p=0,0000$), coincide con lo expresado por Auty y Achim (40) y Hong *et al.* (39) para *P. sylvestris*; Rotundo *et al.* (169) y Rotundo (15) para pino híbrido F₁ INTA-PINDO. La rigidez es el rasgo más importante para los productos de madera estructural. Una forma rápida, fiable y no destructiva para medir el MOE es considerado una prioridad para los ensayos de progenies en los programas de mejoramiento genético forestal. Hong *et al.* (39) para *P. sylvestris*, indicaron que la V explicó 47 % de la variación del MOEd. Por otro lado, Bailleres *et al.* (7); Harding *et al.* (162) y Wessels *et al.* (34,161) señalaron que la predicción del MOEd con la técnica TOF está más relacionada con la madera externa que con la porción interna de la sección transversal del fuste. Por lo tanto, no estaría prediciendo la calidad de la madera interna que generalmente consiste en la mayoría de las tablas (15,39). La mayor relación de la V obtenida con la técnica TOF para la madera externa, se debe a las características de la misma, que es de menor porosidad, mayor densidad y proporción de leño tardío en comparación con la madera interna (35,120,157,170). También, Hong *et al.* (39) señalaron una alta correlación entre V y AMF y, V y densidad de la madera.

4.2 Caracterización de la madera a nivel rollizos a los 11 años de edad

En la Tabla 4 se pueden visualizar los valores de las variables medidas sobre los rollizos basales obtenidos de 90 ejemplares, con pocas variaciones (< al 5 %) en los valores de densidad verde, frecuencia y velocidad acústica por resonancia. Mientras que, se registró mayor variación para el diámetro de los rollizos (> 20%) e intermedia para el MOEd (10 %).

No se encontraron estudios por resonancia para rollizos de pino híbrido F₁ de edades similares al de este estudio. Grabianowski *et al.* (120) determinó un valor medio menor de velocidad acústica de 2.202 m/s (entre 1.665-2.630 m/s) para *P radiata* entre 8 y 11 años. También Wang (31), en una revisión menciona valores medios de velocidad acústica por resonancia de 1.730 m/s para *P radiata* de 8 años y valores entre 1.910 a 3.228 m/s para *P. taeda* de 15 años. Respecto al MOEd a nivel rollizos por resonancia, valores menores (entre 3,5 y 6,2 GPa) fueron determinados por Lasserre *et al.* (41) para *P radiata* de 11 años de edad. Esta diferencia puede deberse a la especie, a la densidad de plantación del rodal y al clima de la región de cultivo. Por otro lado, valores similares de velocidad (2.500-3.900 m/s) y MOEd (9,8 a 12,9 GPa) en rollizos fueron reportados por Wang *et al.* (30) para *P. radiata* (sin informar la edad).

Tabla 4: Variables medidas sobre los rollizos basales de 3,15 m de largo para 15 familias de pino híbrido de 11 años de edad provenientes de 2 sitios.

Variable	n	Media	Mín.	Máx.	CV
Diámetro PG (cm)	90	27,7	16,8	42,5	21,2
Diámetro PF (cm)	90	24,6	13,9	40,0	23,1
Densidad verde (kg/m ³)	90	1.026	915	1.172	4,6
Frecuencia (Hz)	90	445	405	550	4,4
Velocidad acústica por resonancia (m/s)	90	2.802	2.552	3.465	4,4
MOEd por resonancia (GPa)	90	8,1	6,7	12,4	10,0

PG: punta gruesa, PF: punta fina, n: número de rollizos, Mín.: mínimo, Máx.: máximo, CV: coeficiente de variación.

Al verificar que el MOEd determinado por resonancia en rollizos no cumplió con el supuesto de normalidad (Figura 20), se analizó con modelos lineales generalizados mixtos (MLGM). La distribución (función de enlace “g”) que mejor representó a los datos de MOEd en rollizos fue la inversa gaussiana (145) por presentar menores valores de AIC y BIB. Por tanto, fue posible efectuar el análisis de datos del MOEd en rollizos a través de los MLGM. En el Anexo 6, Tablas 1, 2 y 3 se pueden ver las salidas del InfoStat® con los modelos y distribuciones probadas (gaussiana o normal, inversa gaussiana y gamma).

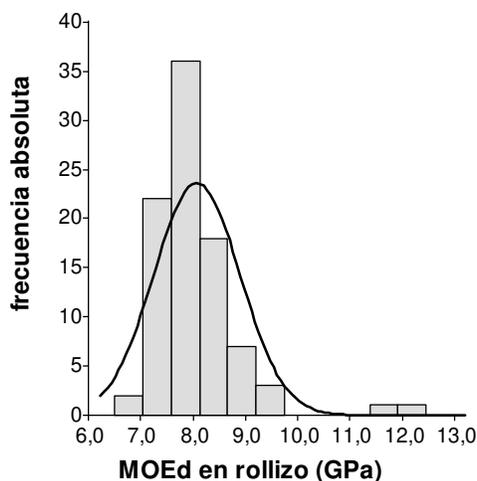


Figura 20: Histograma de frecuencias para el módulo de elasticidad dinámico determinado por resonancia correspondiente al total de rollizos.

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre sitios (valor- $p=0,0536$), ni entre familias (valor- $p=0,8070$) para el MOEd de los rollizos obtenido por el método de resonancia.

Los valores medios de MOEd para rollizos fueron de 8,23 GPa para el sitio 1 y de 7,91 GPa para el sitio 2. A nivel familiar, los valores promedios de MOEd para los rollizos se pueden observar en la Tabla 5. Oscilaron entre 7,70 y 8,58 GPa (familias 12 y 05, respectivamente). Las familias 05 y 14 presentaron un coeficiente de variación elevado para el MOEd en comparación a las demás progenies, podría ser atribuible a variabilidad individual entre árboles.

Bailleres *et al.* (7) evaluando 30 rollizos de pino híbrido F_2 australiano de 29 años proveniente de plantaciones comerciales, obtuvo valores entre 9 y 16 GPa (rango de 7 GPa). El método de resonancia registra el MOEd promedio de la troza (sin tener en cuenta la gran variación radial mismo). Estos autores (7) indicaron que no es una técnica recomendada para efectuar estimaciones del MOEd de las tablas individuales, sí para el conjunto de tablas obtenidas a partir de los mismos rollizos.

Tabla 5: Módulo de elasticidad dinámico por resonancia en rollizos basales a los 11 años de edad para las 15 familias estudiadas provenientes de 2 sitios.

Código Familias	n	Variable	Media (GPa)	DGC	Mín (GPa)	Máx (GPa)	CV (GPa)
01	6	MOEd	8,18	a	7,70	8,88	4,79
02	6	MOEd	7,94	a	6,68	8,46	8,96
03	7	MOEd	7,87	a	7,42	8,64	5,60
04	6	MOEd	8,19	a	7,36	9,15	9,55
05	6	MOEd	8,58	a	7,55	12,37	21,80
06	6	MOEd	7,91	a	7,48	8,50	4,31
07	7	MOEd	7,76	a	7,41	8,27	4,37
08	7	MOEd	8,45	a	7,57	9,57	10,37
09	6	MOEd	8,21	a	7,37	9,48	9,64
10	6	MOEd	8,08	a	7,35	9,09	7,58
11	4	MOEd	8,06	a	7,43	8,64	6,19
12	5	MOEd	7,70	a	6,79	8,20	7,33
13	6	MOEd	7,96	a	7,45	8,76	5,86
14	6	MOEd	8,37	a	7,23	11,55	19,23
15	6	MOEd	7,79	a	7,29	8,04	3,85
Min			7,70		6,68	8,04	3,85
Max			8,58		7,70	12,37	21,80

n: cantidad de rollizos por familia (90 en total), Mín.: mínimo Máx.: máximo, CV: coeficiente de variación. Medias con letras en común no son significativamente diferentes (valor- $p > 0,05$) para el test de DGC.

En la Tabla 6 se puede visualizar que existió una asociación significativa y positiva entre el MOEd, la frecuencia de vibración longitudinal, la velocidad acústica determinada por resonancia y la densidad verde del rollizo. Mientras que no se registró ninguna relación entre la densidad verde con la frecuencia y la velocidad acústica. La densidad verde presentó una capacidad predictiva del 39 % de la variación del MOEd en rollizos. Si bien fue significativa, resultó un indicador insuficiente de la rigidez. La frecuencia de vibración longitudinal puede ser utilizada como criterio de selección del MOEd, dada el alto valor de correlación entre ambas variables.

Tabla 6: Correlaciones de Pearson para las variables estudiadas a nivel rollizos (90 rollizos basales).

	MOEd	F	DV	V
MOEd	1	0,89***	0,39***	0,89***
F		1	- 0,07 ^{ns}	1,00***
DV			1	- 0,07 ^{ns}
V				1

MOEd: módulo de elasticidad dinámico obtenido por resonancia; DV: densidad verde; V: velocidad acústica determinada por resonancia acústica. F: frecuencia de vibración longitudinal. ***Correlaciones significativas (valor- $p \leq 0,001$). ^{ns}: no significativa (valor- $p > 0,05$).

La comparación de las dos tecnologías *TreeSonic* (árboles en pie) (TOF) y *FFT* por resonancia (en rollizos), para la determinación de MOEd, mostraron tendencias generales similares, pero con claras diferencias entre métodos. Los valores de MOEd familiares variaron entre 9,8 y 17,2 GPa y entre 7,7 y 8,6 GPa para árboles en pie y rollizos, respectivamente. La técnica TOF respecto a la de resonancia, arrojó mayores valores de velocidad acústica y rigidez. El método *TreeSonic* se basa en la medición de la madera exterior y más rígida. Por lo tanto, arroja mayores valores de MOE promedio respecto a los rollizos. Con método TOF el valor de MOEd para todas las familias fue superior a 9,8 GPa. Esta tendencia de mayores valores de MOEd alcanzados con el *TreeSonic* es conocida y descripta por otros autores, como Bailleres *et al.*, (7) Harding *et al.* (162,171) y Wessels *et al.* (34,161) para pino híbrido PEE × PCH; y, por Chauhan y Walker (119), Grabianowski *et al.* (120) y Lasserre *et al.* (41) para *P radiata*. Este comportamiento se debe al principio de funcionamiento de cada dispositivo (31,103,119,120). Además, en el empleo del *TreeSonic* (técnica TOF), la onda se propaga en una distancia de un metro de longitud y a una profundidad menor a los 50 mm, proporcionando resultados del MOEd de la madera externa (lateral). Mientras que, en resonancia, la distancia de propagación es la longitud del rollizo que fue de 3,15 m. Además, esta técnica consiste en un barrido completo de la onda en toda la sección transversal del rollizo, lo que implica el registro de cientos de veces la longitud de la pieza lográndose una medición más representativa de la madera (7,41,119,163). Sin embargo, esta técnica es más laboriosa debido a que requiere el apeo de los árboles.

4.3 Caracterización de la madera aserrada a los 11 años de edad

4.3.1 Volumen total de las piezas aserradas

El volumen de madera aserrada provino de 90 rollizos basales de distintos diámetros, 35 ejemplares con $dap < 25$ cm y 55 con $dap \geq 25$ cm, que fueron procesados en diferentes líneas

en el aserradero. El volumen total con corteza (Vol cc) y sin corteza (Vol sc) para los 90 rollizos fueron de 17,03 m³ y 14,33 m³, respectivamente, con el 15,53 % de corteza. Este volumen expresado en hectáreas equivale a 537 m³/ha cc y 454 m³/ha sc, indicando un incremento medio anual (IMA) de 48,85 m³/año, coincidiendo con lo señalado para este taxón por Keller *et al.* (4).

En la Tabla 7 se presentan las dimensiones de las piezas y la posición dentro del rollizo. El 47 % del volumen de la madera evaluada corresponde a piezas de la posición externa y el 53 % pertenece a la madera interna. Es importante conocer la composición de la muestra evaluada, debido a que las escuadrías y posición de las piezas dentro del rollizo, influyen en los resultados de las propiedades físico-mecánicas y en la caracterización visual de dicha madera.

Tabla 7: Cantidad de piezas por escuadría de la madera aserrada.

Espesor (mm)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Tipo pieza	Piezas	Cantidad de piezas
28	110	3150	externa	tablas	76
45	85	3150	externa	tablas	19
45	110	3150	externa	tablas	17
45	135	3150	externa	tablas	21
45	160	3150	externa	tablas	35
45	215	3150	externa	tablas	13
Total de tablas					181 (2,82 m³)
85	85	3150	interna	tirantes	8
85	110	3150	interna	tirantes	1
85	135	3150	interna	tirantes	84
Total de tirantes					93 (3,25 m³)
Total de piezas					274 (6,07 m³)

4.3.2 Clasificación visual estructural y rendimientos por grados de calidad según las normas IRAM 9662-3, IRAM 9670 y SPIB

Los resultados de las características visuales relevadas para ser utilizadas como parámetros en la clasificación por resistencia son mostrados a continuación. En las Tablas 8 y 9 se presentan los resultados correspondientes a la clasificación estructural visual por sitios y familias, respectivamente, teniendo en cuenta principalmente la nudosidad, por ser la característica más relevante en la madera de pino.

Tabla 8: Clasificación estructural visual por sitios según las normas IRAM 9662-3, IRAM 9670 y SPIB.

Sitios	Normas IRAM				Norma SPIB			
	Clase 1	Clase 2	NC	Total	Clase 1	Clase 2	NC	Total
1	34,8%	9,3%	7,3%	51,4%	47,6%	1,9%	1,9%	51,4%
2	35,7%	3,3%	9,6%	48,6%	40,7%	6,1%	1,8%	48,6%
Total	70,5%	12,5%	16,9%	100,0%	88,3%	8,0%	3,7%	100,0%

NC: no clasifica.

La clasificación visual tipificó un gran porcentaje de madera de calidad superior, alcanzando un 70,5 % y 88,3 % de clase 1, según las normas IRAM y SPIB, respectivamente (Tablas 8 y 9). La norma SPIB clasificó un mayor % de madera de clase 1 y menor % de rechazo (3,7 %) respecto a las normas IRAM, debido a que considera la profundidad de los nudos. Notándose que la norma SPIB es menos exigente que la norma IRAM para alcanzar la misma clase de calidad estructural. El porcentaje de piezas rechazadas con las normas IRAM fue 13,2 % superior al de la norma SPIB.

El porcentaje de madera tipificada como clase 1 según las normas IRAM es muy similar para los sitios 1 y 2, mientras que, según la norma SPIB, el sitio 1 alcanzó 6,9 % más de piezas de calidad superior respecto al sitio 2. Esto puede deberse al mayor diámetro de los árboles del sitio 1.

En la Tabla 9 se puede observar la participación porcentual por grados de calidad para cada familia según las normas IRAM y SPIB. Se puede apreciar que las familias 11 y 12 clasificaron un menor porcentaje (< a 3,3 %) de piezas de calidad 1 según ambas normas, y un valor superior a 7,2 % de clase 1, las familias 03 y 04 según ambas normas, y las familias 07 y 08 según la norma SPIB. En general, para las familias del ranking inferior de crecimiento (R3) se obtuvo un menor rendimiento porcentual de las calidades superiores. Esto está asociado a los menores diámetros de los ejemplares pertenecientes al ranking 3 de crecimiento.

Tabla 9: Clasificación estructural visual según normas IRAM y SPIB por familias.

Norma IRAM					Norma SPIB				
Código Familias	Clase 1	Clase 2	NC	Total	Código Familias	Clase 1	Clase 2	NC	Total
03*	7,6%	0,6%	1,0%	9,2%	03*	8,8%	0,3%	0,0%	9,2%
04*	7,3%	0,8%	0,0%	8,1%	08*	7,6%	0,0%	0,3%	7,8%
13	6,7%	0,8%	0,3%	7,8%	04*	7,5%	0,6%	0,0%	8,1%
07	5,4%	1,3%	2,0%	8,6%	07*	7,2%	1,5%	0,0%	8,6%
08	5,0%	1,0%	1,9%	7,8%	13	6,9%	1,0%	0,0%	7,8%
09	5,0%	0,0%	0,8%	5,8%	06	6,2%	0,6%	0,0%	6,9%
14	4,9%	0,8%	0,2%	5,8%	10	5,9%	0,0%	0,0%	5,9%
10	4,8%	0,6%	0,4%	5,9%	01	5,9%	0,8%	0,0%	6,7%
05	4,7%	0,7%	1,9%	7,2%	14	5,8%	0,0%	0,0%	5,8%
02	4,4%	1,0%	1,1%	6,5%	02	5,7%	0,0%	0,8%	6,5%
06	4,4%	1,3%	1,3%	6,9%	05	5,6%	0,3%	1,3%	7,2%
15	3,6%	0,8%	0,8%	5,2%	09	5,1%	0,0%	0,6%	5,8%
01	3,5%	1,7%	1,5%	6,7%	15	4,4%	0,8%	0,0%	5,2%
12#	1,7%	0,6%	2,2%	4,5%	12#	3,3%	0,8%	0,4%	4,5%
11#	1,7%	0,6%	1,8%	4,1%	11#	2,5%	1,3%	0,3%	4,1%
Total	70,5%	12,5%	16,9%	100,0%	Total	88,3%	8,0%	3,7%	100,0%

NC: no clasifica. #Familias con < % de madera de clase 1 (< 3,3 %). *Familias con > % de madera de la clase 1 según norma IRAM e SPIB (>7 %).

Dado la importancia de posición de la pieza dentro del rollizo, se clasificó la muestra en tirantes (madera interna) y tablas (madera externa). En la Tabla 10 se presenta el volumen (%) de madera con los caracteres más significativos que influyen en las propiedades mecánicas de las tablas y tirantes.

La diferencia de 0,17 m³ entre el volumen de madera aserradas (6,07 m³) y clasificadas visualmente (5,92 m³) se debe a la rotura de piezas, y por lo tanto fueron excluidas de la tipificación visual. Del volumen total de la muestra evaluada visualmente el 47 % corresponde a tablas y el 53 % a tirantes.

El 42,2 % del volumen está constituido por tablas que poseen entre 2 y 4 anillos/pieza, el 36,1 % de orientación tangencial y el 40,1 % de las mismas se encuentran libres de médula. Contrariamente, el 50 % del volumen de tirantes cuenta con piezas con 1 solo anillo o menos, con piezas de corte tangencial y semitangencial prácticamente nula, y a su vez, el 41,4 % de los tirantes contiene médula. Estas características observadas visualmente sumada a la presencia de nudos, influyen en los valores de rigidez y de resistencia de la madera evaluada.

Tabla 10: Volumen en % según posición de la pieza y características visuales.

Tipo de pieza	Cantidad de anillos/piezas					Tipo de corte			Médula	
	1	2	3	4	5-7	Int.	Stg	Tg	Aus.	Pres.
Vol. tablas (%)	2,9	18,2	19,1	4,9	1,9	0,0	10,9	36,1	40,1	6,9
Vol. tirantes (%)	50,0	0,6	1,8	0,6	0,0	50,0	1,2	1,8	11,6	41,4
Vol. total %	52,8	18,8	20,9	5,5	1,9	50,0	12,1	37,9	51,7	48,3

Vol.: volumen en %, Int.: interna, Stg: semitangencial, Tg: tangencial, Aus.: ausente, Pres.: presente.

En general, una población de madera aserrada sin clasificar según sus parámetros visuales conduce a valores característicos muy bajos de densidad, MOE y MOR, debido a la heterogeneidad en sus propiedades. Contrariamente, una separación del lote de madera en clases de calidades, permitiría alcanzar una homogenización y optimización del material logrando valores superiores de densidad, rigidez y resistencia.

Un inconveniente que atentan contra la confiabilidad del método de clasificación visual, se refiere a las dificultades que existen para medir parámetros visuales. Esto origina errores y desalienta la aplicación del método. Un aspecto a resaltar es la complejidad que presenta la evaluación de la nudosidad en la madera cercana a la médula, la que se incrementa ante la ausencia de tratamientos silviculturales. Por ello, se recomienda realizar una clasificación mecánica por resistencia (método superador), mediante técnicas no destructivas para alcanzar una tipificación más objetiva de las piezas aserradas y mejorar la homogeneidad de la rigidez de un lote de madera con fines estructurales.

4.3.3 Módulo de elasticidad dinámico obtenido con distintos métodos. Módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática y densidad estacionada medida con el equipo Metriguard®

Se presentan a continuación los resultados correspondientes a las propiedades mecánicas determinadas con los métodos no destructivos y destructivos y la densidad estacionada obtenida con el equipo Metriguard®.

El contenido de humedad medio de todos los cuerpos de prueba ensayados fue de 13,7 % con valores mínimos y máximos de 11,8 % y 15,5 %. Los resultados discriminados según la posición de la pieza dentro del rollizo arrojaron un valor medio del 13,1 % y 14,4 %, para madera interna y externa, respectivamente. Para la comparación de sitios y familias, los valores de rigidez, resistencia y DensMet fueron ajustados individualmente al 12 % de contenido de humedad, conforme a lo establecido por González y Palazón (140). Esta

corrección resulta fundamental porque de acuerdo a lo expresado por Coronel (63), este parámetro se encuentra estrechamente relacionado con las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

Por otra parte, es necesario mencionar que los valores de MOEd obtenidos con diferentes TND demostraron un comportamiento homogéneo y esperable para la madera externa. Mientras que, la madera interna con presencia de resinas arrojó un valor elevado de módulo dinámico determinado a través del método de resonancia acústica. Para constatar dicho hallazgo, las piezas de la posición interna del rollizo que contenían resina fueron separadas. Luego los valores de MOEd fueron comparados con los valores obtenidos con otras metodologías (técnicas de vibración transversal, tiempo de vuelo (TOF) o denominada también onda de impacto y con máquina universal de ensayos). Esto permitió verificar que, el método por resonancia acústica sobreestimaba los valores de MOEd para las piezas internas con presencia de resinas. En la Figura 21 se puede observar un diagrama de dispersión del MOEe vs. MOEr para piezas internas y externas con los datos previos y posteriores, luego de identificar la causa (resina) de los datos atípicos. Se visualizó claramente que las piezas provenientes de la posición interna del rollizo, donde se verificó la presencia de resina, identificada mediante la coloración de su leño, arrojaron valores altos de MOEr, mientras que los valores de MOEv, MOEi y MOEe para esas mismas piezas fueron menores y similares entre ellos. Por ello, luego de detectar que la presencia de resina alteraba los resultados, el 15 % de los datos (piezas internas con resinas) fueron separados para el análisis de datos. En el Anexo 7. Figura 1, se presenta el gráfico de cajas para el MOEv, MOEr, MOEi y MOEe de piezas internas y externas.

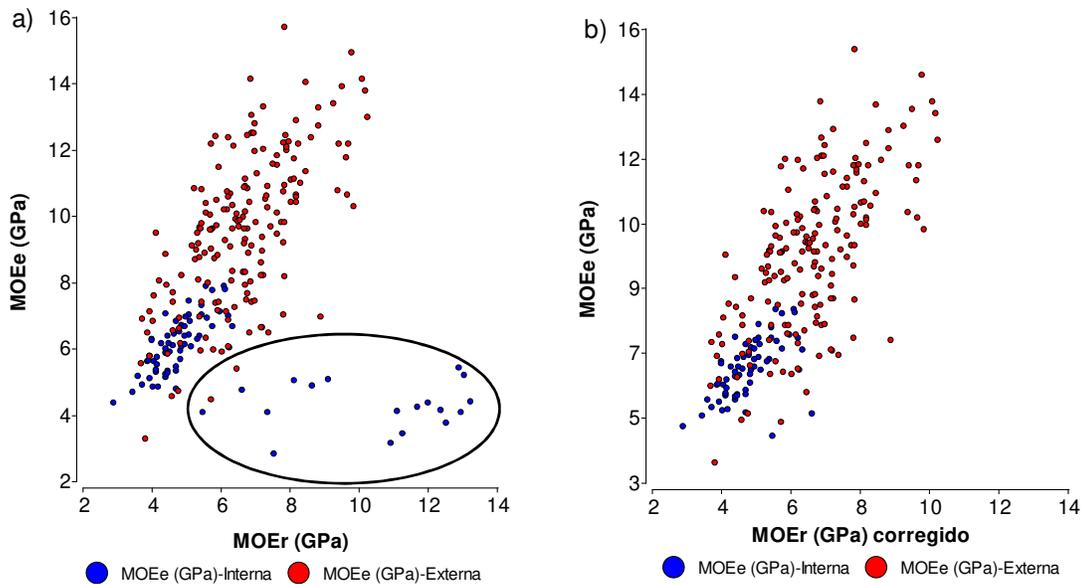


Figura 21: Diagrama de dispersión para el Módulo de elasticidad estático vs. Módulo de elasticidad dinámico por resonancia. a) Con todos datos b) Con los datos de piezas internas con resina excluidos del análisis.

La Tabla 11 presenta los resultados para las propiedades mecánicas y la densidad al 12 % de contenido de humedad. El valor medio de los módulos de elasticidad dinámicos (MOEv, MOEr, MOEi) y estático (MOEe) presentó una amplia variación según el método de medición utilizado (6,3 a 9,2 GPa). Con una mayor similitud entre el método de vibración y resonancia que arrojaron menores valores medios, mientras que el método por impacto se aproximó más a los valores obtenidos con máquina universal de ensayos.

Los valores de MOEd con los 3 métodos de medición variaron entre 2,9 y 12,9 GPa, la DensMet varió en un rango de 315 kg/m³ y el MOEe en un rango de 12,6 GPa. Se registró un coeficiente de variación bajo (10 %) para la densidad y alto para el MOR (36 %) y para los diferentes MOE (24,2 % a 28,9 %). Fank (2018) obtuvo cifras de CV superiores para el *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* (densidad: 13 % y 15 %, MOEe: 21 % y 40 %, MOR: 38 % y 50 %) para piezas de escuadrías comerciales y corregidas al 12 % de humedad. También, Harding *et al.* (171) determinaron para tablas provenientes de 12 clones de pino híbrido (PEE × PCH) de edades similares al de nuestro estudio, valores inferiores de MOE (7,83 GPa) y valores de MOR levemente superior (433 kg/cm²).

Tabla 11: Medidas resúmenes para las propiedades mecánicas y densidad obtenida con el equipo Metriguard® para piezas de escuadrías comerciales.

Variable	n	Media	Mín.	Máx.	CV
MOEv12% (GPa)	230	6,3	2,9	10,6	26,0
MOEr12% (GPa)	230	6,5	3,1	10,9	24,4
MOEi12% (GPa)	230	8,2	4,6	12,9	24,2
MOEe12% (GPa)	230	9,2	3,5	16,1	28,9
MOR12% (kg/cm ²)	230	382	116	731	36,3
DensMet12% (kg/m ³)	230	388	311	526	10,2

n= número de piezas ensayadas, Mín.: mínimo, Máx.: máximo; CV: coeficiente de variación, MOEv, MOEr, MOEi: módulos de elasticidad dinámicos obtenidos por vibración transversal, por resonancia y por impacto, respectivamente, MOEe y MOR: módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática, DensMet: densidad estacionada medida con el equipo Metriguard®. Valores de las propiedades físicas y mecánicas ajustados al 12 % de contenido de humedad.

El 11 % del volumen de la madera evaluada de pino híbrido F₁ INTA-PINDO superó el valor de MOEe de 12 GPa y el 62 % del volumen arrojó un valor superior a los 7 GPa de MOEe. Siendo 12 GPa y 7 GPa los valores mínimos de módulo de elasticidad para ser considerado madera estructural de clases 1 y 2, respectivamente. Por otro lado, teniendo en cuenta el módulo de rotura, el 94 % del volumen evaluado superó el valor medio de 180 kg/cm² y el 100 % del volumen excedió el valor de 110 kg/cm² (clases 1 y 2 para uso estructural respectivamente para pinos resinosos, respectivamente).

En base a la densidad determinada con el equipo Metriguard® para piezas de escuadrías comerciales, pueden ser consideradas como un valor bajo, inferior a los solicitados para usos estructurales (clase 1, 420 kg/m³ y clase 2, 390 kg/m³). Cabe destacar que las piezas se encuentran en sus dimensiones originales y con defectos, por lo tanto, es razonable encontrar un valor menor respecto a los determinados en laboratorio utilizando probetas pequeñas, libres de nudos. Este método no destructivo para determinar la densidad ofrece una oportunidad para predecir y clasificar a la madera aserrada por su densidad. Winck *et al.* (172) determinaron un coeficiente de correlación significativa ($r = 0,7$) entre la DensMet y densidad estacionada para madera de *P. taeda*. También Íñiguez-González *et al.* (173) utilizando métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de la densidad y MOEd de piezas de gran escuadría de pino laricio (*P. nigra*), indicaron que esta metodología ha sido ampliamente aceptada por ser precisa, portátil y fácil de aplicar en la clasificación de madera estructural.

En la Figura 22 se pueden visualizar los histogramas de frecuencias para el MOEv (a), MOEr (b), MOEi (c), MOEe (d), MOR (e) y la DensMet (f), donde se obtuvieron distribuciones muestrales próximas a la normal. No obstante, algunos autores comprobaron que la no-normalidad no afectaba la fiabilidad de los análisis realizados para la caracterización tecnológica de la especie (174,175).

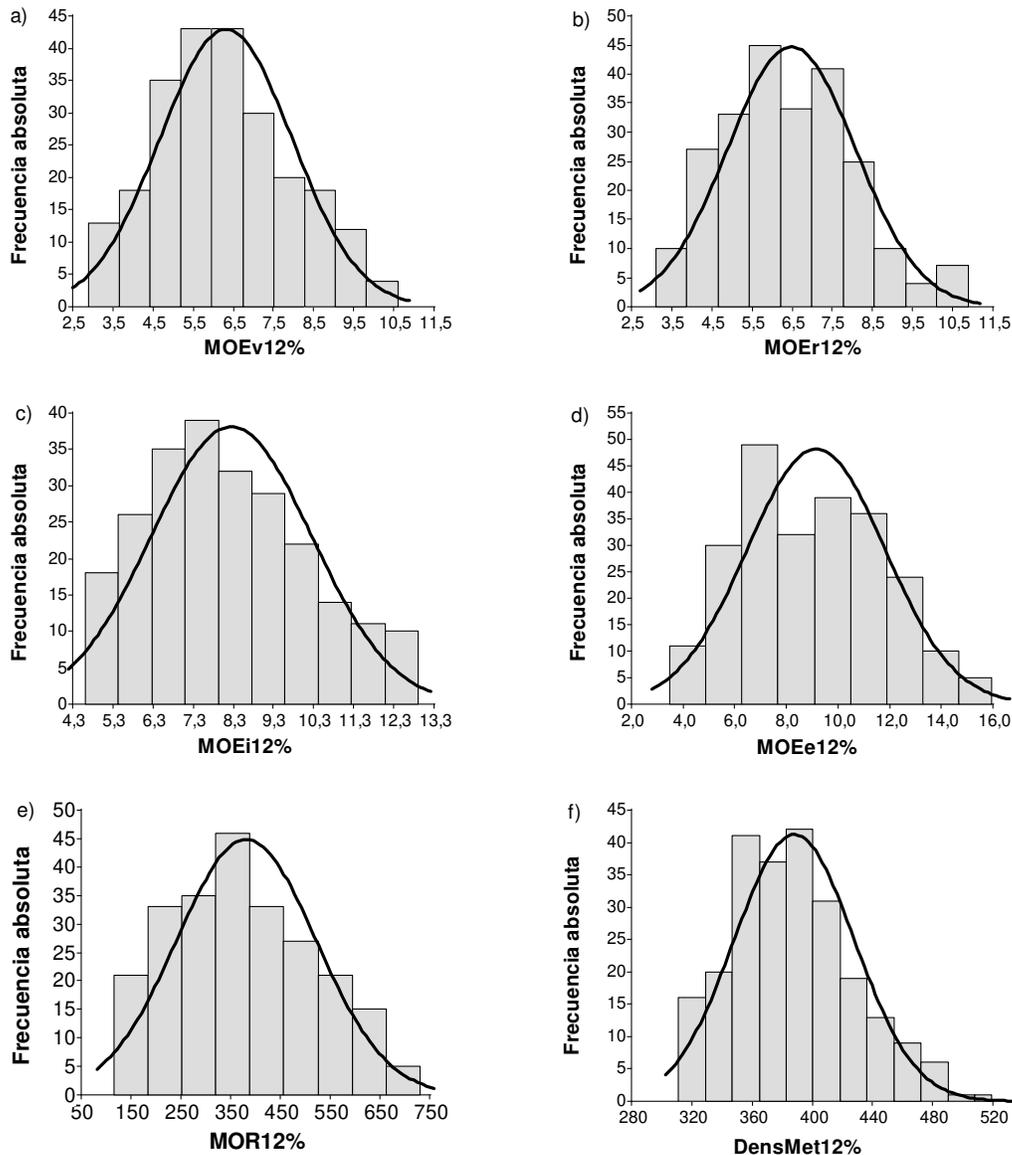


Figura 22: Histograma de frecuencias para el módulo de elasticidad dinámico obtenido por a) vibración, b) resonancia, c) impacto, d) módulo de elasticidad estático, e) módulo de rotura a la flexión estática y f) densidad estacionada obtenida con el equipo Metriguard® correspondiente al total de piezas aserradas y ensayadas.

4.3.4 Módulos de elasticidad dinámico y estático. Módulo de rotura y densidad estacionada medida con el equipo Metriguard® según sitios estudiados

Los resultados obtenidos utilizando modelos lineales mixtos (MLM) indicaron diferencias estadísticamente significativas entre sitios para el MOEv (valor-p=0,01), MOEr (valor-p=0,02), MOEi (valor-p=0,03) y densidad (valor-p=0,01), mientras que no fue significativa para MOEe (valor-p=0,09) y para el MOR (valor-p=0,91).

Realizando la comparación de medias mediante el test de DGC, se identificó madera con propiedades físicas y mecánicas superiores en el sitio 2, cuando fueron determinadas con equipos no destructivos (Tabla 12). En concordancia con estos resultados, Legg y Bradley (35) y Watt *et al.* (62) indicaron que características específicas del sitio, cómo la temperatura media del aire, precipitaciones y componentes químicos del suelo (por ejemplo, el fósforo total) provocan variaciones en densidad y rigidez de la madera (62). Sin embargo, la madera sometida a ensayo destructivo no arrojó diferencias significativas entre sitios para el MOEe y MOR. Esto puede estar relacionado a la técnica de medición de las propiedades. Con los métodos no destructivos, la rigidez y la densidad se determinan en base al desplazamiento de las ondas sonoras dentro material. Las propiedades acústicas están muy relacionadas con la microestructura interna de la madera.

Tabla 12: Comparación de medias de propiedades físicas y mecánicas para el sitio 1 y 2.

Propiedad	Sitio	Media	E.E.	DGC
MOEv (GPa)	2	6,3	0,19	a
MOEv (GPa)	1	5,5	0,19	b
MOEr (GPa)	2	6,3	0,16	a
MOEr (GPa)	1	5,6	0,17	b
MOEi (GPa)	2	8,1	0,23	a
MOEi (GPa)	1	7,2	0,24	b
MOEe (GPa)	2	8,6	0,25	a
MOEe (GPa)	1	7,7	0,26	a
MOR (kg/cm ²)	2	353	14,34	a
MOR (kg/cm ²)	1	346	15,08	a
DensMet (kg/m ³)	2	395	5,17	a
DensMet (kg/m ³)	1	375	5,32	b

E.E.: error estándar de estimación del modelo. Medias con letras distintas son significativamente diferentes (valor-p≤0,05) para el test de DGC.

Los valores de MOEd determinados con las tres técnicas no destructivas y destructiva, son inferiores a los determinados por Bailleres *et al.* (7), quienes determinaron para el pino híbrido F₁ australiano de 11 años de edad un valor medio de 9,8 GPa analizando muestras radiales del fuste a través de una metodología basada en ultrasonido. El MOE estático es próximo al valor determinado por ultrasonido para el pino híbrido F₁ australiano.

A su vez, los valores de MOE y MOR de este estudio son mayores a los reportados por Wessels *et al.* (161) en parcelas experimentales de Sudáfrica para pino híbrido F₁ de 9 y 11 años de edad (MOEe = 4 GPa y MOEd = 5,1 GPa, MOR = 249 kg/cm²). Estas diferencias pueden deberse en parte a la edad, a la cantidad de familias y sitios analizados en cada estudio.

Los valores de MOE dinámicos (MOEv, MOEr, MOEi) y densidad con el equipo Metriguard® para el sitio 2 fueron significativamente mayores a los valores del sitio 1. Por otro lado, el módulo de elasticidad y rotura a la flexión estática, no arrojaron diferencias significativas entre sitio. No obstante, el MOE estático y MOR para el sitio 2 superó a los valores del sitio 1, en 11 % y 2 % respectivamente. Esto podría deberse al uso de la tierra previo a la instalación del ensayo. Coincidiendo con lo expresado por Bailleres *et al.* (7), quienes indicadores que las rotaciones repetidas modifican la microestructura del suelo afectando a la rigidez de la madera.

4.3.5 Módulos de elasticidad dinámico y estático. Módulo de rotura y densidad estacionada medida con el equipo Metriguard® según familias

En la caracterización de los materiales genéticos (familias) mediante modelos lineales mixtos (MLM) no se detectaron diferencias estadísticas a nivel familias, obteniendo los siguientes valores-p para el MOEv (0,41), MOEr (0,49), MOEi (0,27), MOEe (0,51), MOR (0,81) y DensMet (0,62). Sin embargo, con una tendencia de mayores valores de rigidez con todos los métodos para las familias del ranking 1 de crecimiento (01, 03, 05) y para la familia 04 con el método de vibración transversal y con máquina universal de ensayos (en el Anexo 8. Tabla 1 y 2, se presenta una estadística descriptiva para parámetros estructurales (MOEe y MOR, respectivamente) obtenido con ensayo destructivo para las 15 familias evaluadas). Es importante destacar que estas 4 familias (01, 03, 04 y 05) y adicionalmente la 07 fueron también identificadas como superiores a través de la V y del MOEd para árboles en pie a los 10 y 11 años. Asimismo, a través del AMF se identificaron las familias 01, 03, 04 y 07 como las más adecuadas para fines estructurales por sus menores valores de AMF. Diferentes metodologías permitieron reconocer familias con mayor potencial para madera de usos sólidos. En concordancia con estos resultados, Wessels *et al.* (161) analizando familias

híbridas de pino híbrido F₁ (PEE × PCH) entre 9 y 11 años de edad provenientes de dos rankings de crecimiento (superior e inferior), reportaron mayores valores de MOEe, MOR y MOEd para las familias del ranking superior.

Los mayores valores de MOR y DensMet (aunque sin diferencias significativas) ocurrieron para las familias del ranking inferior. Los valores medios más elevados para el MOR (401, 383 y 391 kg/cm²) se obtuvieron para las familias 10, 11 y 12 del ranking inferior de crecimiento, y valores superiores de DensMet fueron alcanzados para las familias 01, 12 y 13 con valores medios de 408, 403 y 397 kg/m³, respectivamente, 5 de estas familias pertenecen al ranking inferior de crecimiento. Esta información es sumamente importante y nos estaría indicando que, si la selección se realiza utilizando a la densidad como único indicador de la calidad estructural, se estaría captando a las familias de mayor módulo de rotura, pero no a las de mayor módulo de elasticidad. Sin embargo, este último es un parámetro crítico con mayor dificultad de alcanzar las exigencias estipuladas por distintas normativas, para varias especies estudiadas y de distintas regiones geográficas.

A los 11 años de edad, los valores medios de MOE e y MOR determinados experimentalmente para la totalidad de las muestras permiten alcanzar fácilmente los valores característicos (rigidez y resistencia) adoptados por la norma IRAM 9662-3 (9) para el grado de calidad 2, pero una proporción menor del grado 1 (Anexo 1. Tabla 2). Estos valores podrían ser mejorados con turnos más largos.

4.3.6 Módulos de elasticidad dinámico y estático. Módulo de rotura y densidad estacionada medida con equipo Metriguard® según el tipo de pieza (madera interna y externa)

En la caracterización de madera mediante modelos lineales mixtos (MLM), las distintas variables analizadas, MOEv, MOEr, MOEi, MOEe, MOR y DensMet arrojaron diferencias estadísticas altamente significativas (valores-p<0,0001) en todos los casos, según la posición de la pieza en el rollizo.

Mediante el test de DGC se obtuvo la comparación de medias, reflejando que la madera externa muestra superioridad en sus propiedades respecto a la madera interna (Tabla 13). En dicha tabla, además de los valores medios para cada propiedad se puede observar el error estándar de estimación (E.E.). Este coeficiente mide la precisión con la que el modelo estima el valor desconocido, indicando una mayor exactitud para la madera externa. Esto sucede debido a las particularidades propias de la madera en edades tempranas.

Tabla 13: Comparación de propiedades físicas y mecánicas para piezas de posición interna (tirantes) y externas (tablas).

Propiedad	Tipo pieza	Media	E.E.	DGC
MOEv (GPa)	Externa	6,6	0,14	a
MOEv (GPa)	Interna	5,2	0,19	b
MOEr (GPa)	Externa	7,0	0,12	a
MOEr (GPa)	Interna	4,9	0,17	b
MOEi (GPa)	Externa	8,8	0,17	a
MOEi (GPa)	Interna	6,4	0,22	b
MOEe (GPa)	Externa	10,1	0,19	a
MOEe (GPa)	Interna	6,2	0,26	b
MOR (kg/cm ²)	Externa	424	11,1	a
MOR (kg/cm ²)	Interna	274	16,1	a
DensMet (kg/m ³)	Externa	395	3,81	a
DensMet (kg/m ³)	Interna	375	4,59	b

E.E.: error estándar de estimación del modelo. Medias con letras distintas son significativamente diferentes (valor- $p \leq 0,05$) para el test de DGC.

En la Tabla 13 se puede apreciar que los valores del módulo de elasticidad (determinado con diferentes métodos), de la resistencia y de la densidad en la madera externa son claramente superiores, con valores que superan a aquellos obtenidos para madera interna en un 21 %, 30 %, 27 %, 38 %, 35 % y 5 % para MOEv, MOEr, MOEi, MOEe, MOR y DensMet, respectivamente. Además, la madera interna no alcanzó el valor promedio de módulo de elasticidad estipulado en la norma IRAM 9662-3 (8) para formar parte de la clase 2 de resistencia. No obstante, la madera interna no clasificaría por grados de calidad por resistencia con la tipificación visual previa. Sin embargo, este taxón de rápido crecimiento analizado en el presente estudio, con un IMA superior a 48 m³/año (4), arrojó el 47 % del volumen total de la troza basal en madera externa, con valores de módulo de elasticidad a la flexión estática que supera los 7 GPa, a los 11 años de edad. El módulo de elasticidad es un parámetro importante a tener en cuenta para la producción de madera a corta edad de rotación. La madera externa, además de presentar un mejor comportamiento para usos estructurales, exhibió también la ventaja de que los distintos dispositivos acústicos resultaron más precisos para la determinación del módulo de elasticidad. Este patrón de variación, altamente marcado en el sentido radial para distintas propiedades de las coníferas, es ampliamente conocido (12,18,33,59,84,176–179).

La presencia de anomalías como nudos, resinas, médula y desviación de las fibras, que normalmente se encuentran en mayor proporción en la región central del rollizo (madera interna), comprometen la calidad estructural de la madera, ya que producen un debilitamiento de la sección transversal y una modificación del desarrollo normal de las fibras, afectando negativamente a la rigidez y resistencia. La nudosidad, en general, constituye un factor decisivo sobre la calidad de la madera, debido a su relación directa con la variación de la estructura interna. Su influencia sobre las propiedades mecánicas es notable, independientemente de tratarse de nudos individuales, grupos de nudos, forma y estado (sano, perdido, podrido). Varios investigadores reportaron elevados coeficientes de correlación negativos entre nudosidad y resistencia (24,174,175). Estos antecedentes explican el mejor comportamiento de la madera externa para usos estructurales.

Por otro lado, en la sección interna del rollizo se constató la presencia de resina. El efecto de resina sobre la resistencia mecánica depende de su abundancia, tamaño y localización en las piezas. Su influencia sobre las propiedades mecánicas de la madera podría asemejarse al de la nudosidad, dado que los depósitos representan una discontinuidad real de la madera. La presencia de bolsas internas de resina en la madera trae algunas consecuencias negativas en el procesamiento (mala adherencia de pinturas y exudaciones en la superficie pintada). Para madera de apariencia, no existe tolerancia a la resina (180). Por lo que, el exudado externo de resina es un defecto que puede reducir el valor de la madera de pino híbrido para este tipo de destino.

Otra consideración a tener en cuenta, es que la presencia de médula, madera juvenil y el espesor de los anillos de crecimiento, además de afectar a las propiedades mecánicas, se encuentra estrechamente relacionada con las deformaciones de las piezas de madera aserrada durante el proceso de secado (174). Debido a los alabeos y menor resistencia de las piezas que contienen médula, resulta necesaria su limitación para determinados usos.

En el Anexo 9 se muestran los residuos *estudentizados* para los parámetros de efectos fijos (sitios, familias y tipo de pieza) y aleatorio (árbol) del modelo de análisis seleccionado para el MOEv, MOEr, MOEi, MOEe, MOR y DensMet, respectivamente; diagramas de dispersión entre los residuos *estudentizados* y los valores predichos. Gráfico Q-Q plot.

4.3.7 Comparación de métodos de medición del módulo de elasticidad

Los valores obtenidos para el MOEe (global) a la flexión estática fueron mayores, seguidos por el método de impacto, resonancia y vibración. De manera similar, Yang *et al.* (181), Yang *et al.* (182) y França *et al.* (183) determinaron para piezas de madera de escuadrías

comerciales (2"x6, 2"x8, 2"x10" y 2"x10") proveniente de un grupo de especies del género *Pinus* cultivado en la región sureste de los EE. UU. (*Pinus taeda*, *P. palustris*, *P. echinata* y *P. elliotii*), valores de MOEe (global) a la flexión estática ligeramente superiores a los de vibración transversal determinados con el equipo Metriguard® y por impacto.

Contrariamente, otros autores como Videla *et al.* (184) (en probetas de *P. taeda*); Ross y Pellerin (103) (revisión de distintas especies y tamaños de piezas: probetas y dimensiones comerciales); Posta *et al.* (185) (en piezas de dimensiones comerciales de *Picea abies*); Hassan *et al.* (186) (en probetas de *P. sylvestris* para los ensayos a la flexión); Yin *et al.* (187) en *Cunninghamia lanceolata*; Villasante *et al.* (188) y Íñiguez-González (104) en *P. radiata*, *P. sylvestris* y *P. nigra*, informaron que los valores de MOE dinámico obtenidos a través de las técnicas acústicas, sobre todo las basadas en el tiempo de vuelo (TOF) fueron más altos que los valores de MOE estáticos obtenidos a partir de los ensayos de resistencia a la flexión.

Hassan *et al.* (186) indica que cuando el módulo de elasticidad a la flexión estática es realizado a partir de probetas, el valor verdadero del módulo de elasticidad a la flexión estática debe recalcularse como se describe en Teranishi *et al.* (189), teniendo en cuenta el valor de la deformación por la cortante en el ensayo de flexión, incrementándose el valor verdadero del MOEe.

Estas diferencias entre resultados de MOE estático pueden ser atribuidas a las especies consideradas en cada estudio, a las dimensiones de los cuerpos de prueba (probetas o piezas de escuadrías comerciales), y a las distintas formas de realizar el ensayo a la flexión estática (módulo de elasticidad local y el módulo de elasticidad global). Los resultados del ensayo de resistencia a la flexión pura (local) están sujetos a mayores errores de medición, debido a la necesidad de una alta precisión en la determinación de las deformaciones. En la determinación del módulo de elasticidad global interviene el esfuerzo de corte y es más representativo de toda la pieza sometida al ensayo. Por lo tanto, sujeto a menores errores de medición y con la ventaja adicional de la facilidad en la medición de la deformación durante el ensayo.

La diferencia entre el comportamiento dinámico y estático (MOEd >MOEe), según Teranishi (189) es debido a que en la determinación del MOEd, incluye la energía absorbida después de la carga máxima, mientras que en el cálculo del módulo de elasticidad a la flexión estática se tienen en cuenta las cargas y deformaciones en el límite proporcional elástico.

Respecto a los resultados obtenidos con los 3 métodos no destructivo (vibración, TOF o impacto y resonancia), el método por impacto arrojó mayor valor medio para el módulo de elasticidad dinámico (MOE_i), seguido por el método de resonancia y vibración. Coincidente con lo expresado por los autores Mora *et al.* (190) y Winck *et al.* (191) para *P. taeda*, Grabianowski *et al.* (120) para *P. radiata*, Chauhan y Sethy (192), entre otros como la revisión de Legg y Bradley (35), quienes indicaron que la técnica TOF (MOE_i) proporciona un valor de módulo de elasticidad dinámico superior en comparación con el método de resonancia y de vibración transversal. Este comportamiento se debe a que en el método de pulso ultrasónico, las ondas de alta frecuencia viajan a una velocidad relativamente más rápida en un material más rígido y denso, lo que proporciona como resultado diferencias divergentes en MOE dinámico con el aumento de MOE estático (192). Por otro lado, Chauhan *et al.* (193) indicaron que la magnitud de la diferencia en el MOE_d determinado por diferentes MND puede oscilar entre el 4% y 26 %, según el método utilizado. También Divós y Tanaka (194) informaron el efecto de la frecuencia en la determinación del módulo de elasticidad dinámico, correspondiendo un valor de MOE_d más alto con frecuencias crecientes.

Lo cierto es que en la literatura no existe una ecuación universal para la conversión entre el módulo de elasticidad dinámico y estático. Según lo expresado por Pošta *et al.* (185) el factor de conversión depende del método utilizado, contenido de humedad, tipo y tamaño de la muestra.

Los resultados logrados con MND utilizados en este estudio permite enfatizar su potencial de para estimar MOE_e y están de acuerdo con los estudios de Yang *et al.* (181), Yang *et al.* (195), França *et al.* (196), França *et al.* (183), França *et al.* (197), França *et al.* (198).

Diversos estudios realizados con piezas de dimensiones comerciales han demostrado un grado de asociación entre el módulo de elasticidad dinámico obtenido por métodos acústicos y el módulo de elasticidad estático (obtenido mediante ensayos destructivos), en general, con altos coeficientes de determinación (R^2). Para pinos se informaron valores de R^2 en el intervalo 0,79 - 0,92 (173,181,195,197–199). Por otro lado, para muestras de abetos y piceas alcanzaron un valor de $R^2 = 0,87$ (200).

También, para pino híbrido F₁ (PEE × PCH) de edades entre 9 y 11 años, los autores Harding *et al.* (162,171); Wessels *et al.* (161) y Bailleres *et al.* (7) reportaron valores de coeficiente de correlaciones positivas y significativas ($r =$ entre 0,48 y 0,89) entre velocidad acústica de árboles en pie y distintos métodos de medición del MOE dinámico en rollos y en tablas, y,

MOE estático en tablas. Por su parte, Bailleres *et al.* (7) determinaron altos valores de coeficiente de determinación ($R^2 > 0,77$) entre métodos de medición del módulo de elasticidad.

Respecto a la **caracterización visual** por grados de resistencias y su relación con la **clasificación mecánica** de la madera para este estudio, se puede indicar que, a pesar de la tipificación visual previa, no se logró alcanzar el valor medio del módulo de elasticidad adoptado por la norma IRAM 9662-3 (9) para la clase superior (12.000 N/mm^2) para los pinos resinosos. Esto podría estar relacionado al elevado valor de MOE establecido en las normas de clasificación visual estructural. Por lo que se sugiere, que los criterios de estas normas sobre la calidad de madera de la clase 1 principalmente, deberían ser revisados, coincidiendo con lo expresado por Fank (24) para pinos resinosos del noreste argentino.

La dificultad para lograr los valores de módulos de elasticidad de la clase 1, establecidos por las normas (IRAM 9662-3 2015; SANS 10163-1 2001; SANS 10163-1 2003) para distintas especies y edades, también expresada por otros autores (24,161,201,202). Fank (24) en un estudio en vigas de *Pinus taeda* y *P. elliotii* proveniente del noreste de Misiones (sin especificar edad y tratamientos silvícolas) reportó valores característicos que cumplen con las exigencias de la norma IRAM 9662-3 para el MOR y la densidad, en ambas clases (1 y 2), pero no para el MOE en la clase 1. Por otro lado, Ramos *et al.* (202) emplearon madera de *P. elliotii* proveniente de plantaciones comerciales del noreste de Entre Ríos, con edades de 19 y 37 años, sin informar tratamientos silvícolas, efectuaron una clasificación visual por resistencia previo a los ensayos mecánicos, obtuvieron valores de MOR y de densidad que satisfacen los requerimientos adoptados por IRAM 9662-3 (9) para pinos resinosos, no así los correspondientes al MOE. También Dowse (201) para *P. patula* procedente del sur de África, obtuvo un valor muy bajo de módulo de elasticidad, que no alcanzaba a lo establecido por la norma africana SANS 10163-1 (203) para el uso de madera estructural. Wessels *et al.* (161) en parcelas experimentales de pino híbrido F_1 de 9 y 11 años mostraron que la madera alcanzó buenas propiedades de resistencia a la flexión (MOR), pero el módulo de elasticidad medio fue significativamente menor que valor requerido para la madera de grado estructural según la norma SANS 10163-1 (204) y más bajo que el valor medio del MOE para *P. radiata* y *P. patula* de edades similares.

4.3.8 Modelos de predicción del módulo de elasticidad estático a partir del módulo dinámico

Módulo de elasticidad estático estimado a través del módulo dinámico por vibración transversal

La ecuación 31 muestra el resultado de ajustar un modelo de regresión lineal para describir la relación entre módulo de elasticidad a la flexión estática (MOEe), el módulo dinámico determinado con el método de vibración transversal (MOEv) y tipo de pieza (TP).

$$MOEe_{\text{General}} = 3,19 + 1,06 * MOEv - 0,84 * (TP = \text{int}) - 0,29 * MOEv * (TP = \text{int}) \text{ (Ec. 31)}.$$

Donde MOEv es el módulo de elasticidad dinámico obtenido por vibración transversal; TP: tipo de pieza; int: posición interna.

Los términos tipo de pieza (TP) (internas o externas), son variables indicadoras las cuales toman el valor igual a “1” si son verdaderas o igual a “0” si son falsas. Esto corresponde a 2 rectas de regresión, una para cada valor de tipo de pieza. Entonces, cuando el tipo de pieza corresponde a la posición “externa”, el modelo se reduce a:

$$MOEe_{\text{Ext}} = 3,19 + 1,06 * MOEv \text{ (Ec. 32)}$$

Cuando el tipo de pieza corresponde a la posición “interna”, el modelo se reduce a:

$$MOEe_{\text{Int}} = 2,35 + 0,76 * MOEv \text{ (Ec. 33)}$$

Como el valor-p de la tabla ANOVA fue menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables MOEe, MOEv y TP, con un nivel de confianza del 95 %.

El estadístico R^2 ajustado demostró que el modelo (Ec. 31), explicó el 74 % de la variabilidad en el MOEe. El error estándar del estimador mostró que la desviación estándar de los residuos fue de 1,34. El error absoluto medio (EAM) fue de 1,04 (valor promedio de los residuos). El estadístico de Durbin-Watson (DW) fue de 2,10 ($p=0,77$) indicando la independencia de los datos. El ANOVA adicional permitió evaluar la significancia estadística de los términos en el modelo (MOEv, $p=0,000$; interceptos, $p=0,0000$ y pendientes, $p=0,1493$). Como el valor-p para las pendientes es mayor que 0,1, no existen diferencias estadísticas entre las pendientes para los distintos valores de tipo de pieza (TP) con un nivel de confianza del 90 % o mayor. Para los interceptos el valor-p fue menor que 0,01, indicando que existen diferencias estadísticamente significativas entre los interceptos para los diferentes valores de tipo de pieza con un nivel de confianza del 99 %.

Módulo de elasticidad estático estimado a través del módulo dinámico por resonancia

La ecuación 34 muestra el resultado de ajustar un modelo de regresión lineal para describir la relación entre módulo de elasticidad a la flexión estática (MOEe), el módulo dinámico determinado con el método de resonancia (MOEr) y tipo de pieza (TP).

$$MOEe_{General} = 2,91 + 1,03 * MOEr + 0,12 * (TP = int) - 0,35 * MOEr * (TP = int) \text{ (Ec. 34)}.$$

Donde MOEr es el módulo de elasticidad dinámico obtenido por resonancia; TP: tipo de pieza; int: posición interna.

Los términos tipo de pieza (TP) (internas o externas), son variables indicadoras las cuales toman el valor igual a "1" si son verdaderas o igual a "0" si son falsas. Esto corresponde a 2 rectas de regresión, una para cada valor de tipo de pieza. Entonces, cuando el tipo de pieza corresponde a la posición "externa", el modelo se reduce a:

$$MOEe_{Ext} = 2,91 + 1,03 * MOEr \text{ (Ec. 35)}$$

Cuando el tipo de pieza corresponde a la posición "interna", el modelo se reduce a:

$$MOEe_{Int} = 3,03 + 0,68 * MOEr \text{ (Ec. 36)}$$

Como el valor-p de la tabla ANOVA fue menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables MOEe, MOEr y TP, con un nivel de confianza del 95 %.

El estadístico R² ajustado indicó que el modelo (Ec. 34), explicó el 63 % de la variabilidad en el MOEe. El error estándar del estimador mostró que la desviación estándar de los residuos fue de 1,59. El error absoluto medio (EAM) fue de 1,20. El estadístico de Durbin-Watson (DW) fue de 1,86 (p=0,14) por lo que no hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95 %. El ANOVA adicional permitió evaluar la significancia estadística de los términos en el modelo (MOEr, p=0,000; interceptos, p=0,0000 y pendientes, p=0,1632). Dado que el valor-p para las pendientes es mayor que 0,1, no existen diferencias estadísticas entre las pendientes para los distintos valores de tipo de pieza (TP) con un nivel de confianza del 90 % o mayor. Para los interceptos el valor-p fue menor que 0,01, indicando que existen diferencias estadísticamente significativas entre los interceptos para los diferentes valores de tipo de pieza con un nivel de confianza del 99 %.

Módulo de elasticidad estático estimado a través del módulo dinámico por impacto

La ecuación 37 muestra el resultado de ajustar un modelo de regresión lineal para describir la relación entre módulo de elasticidad a la flexión estática (MOEe), el módulo dinámico determinado con el método de impacto (MOEi) y tipo de pieza (TP).

$$MOEe_{General} = 2,61 + 0,86 * MOEi - 0,70 * (TP = int) - 0,17 * MOEi * (TP = int) \text{ (Ec. 37)}.$$

Donde MOEi es el módulo de elasticidad dinámico obtenido por impacto; TP: tipo de pieza; int: posición interna.

Los términos tipo de pieza (TP) (internas o externas), son variables indicadoras las cuales toman el valor igual a "1" si son verdaderas o igual a "0" si son falsas. Esto corresponde a 2 rectas de regresión, una para cada valor de tipo de pieza. Entonces, cuando el tipo de pieza corresponde a la posición "externa", el modelo se reduce a:

$$MOEe_{Ext} = 2,61 + 0,86 * MOEi \text{ (Ec. 38)}$$

Cuando el tipo de pieza corresponde a la posición "interna", el modelo se reduce a:

$$MOEe_{Int} = 1,91 + 0,69 * MOEi \text{ (Ec. 39)}$$

Como el valor-p de la tabla ANOVA fue menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables MOEe, MOEi y TP, con un nivel de confianza del 95 %.

El estadístico R² ajustado mostró que el modelo (Ec. 37), explicó el 72 % de la variabilidad en el MOEe. El error estándar del estimador mostró que la desviación estándar de los residuos fue de 1,38. El error absoluto medio (EAM) fue de 1,02. El estadístico de Durbin-Watson (DW) fue de 2,12 (p=0,81) indicando la independencia de los datos. El ANOVA adicional permitió evaluar la significancia estadística de los términos en el modelo (MOEi, p=0,000; interceptos, p=0,0000 y pendientes, p=0,3596). Como el valor-p para las pendientes es mayor que 0,1, no existen diferencias estadísticas entre las pendientes para los distintos valores de tipo de pieza (TP) con un nivel de confianza del 90 % o mayor. Para los interceptos el valor-p fue menor que 0,01, indicando que existen diferencias estadísticamente significativas entre los interceptos para los diferentes valores de tipo de pieza con un nivel de confianza del 99 %.

En general, el ajuste fue similar para los 3 métodos de estimación del módulo de elasticidad a la flexión estática. Sin embargo, el método por vibración presentó un valor de coeficiente de determinación superior, un valor menor para el error estándar del estimador y una mejor distribución estudentizada de los errores. Esto puede deberse a que este dispositivo

determina el módulo de elasticidad basado no solo en la propagación de la señal acústica, sino también en base al peso, el espesor, el ancho y el largo de la pieza de madera, indicando además al software del equipo, si la especie pertenece a una conífera o latifoliada.

Es importante señalar que los métodos acústicos son apropiados para determinar el módulo de elasticidad si se conoce la densidad del elemento medido, posible de obtener a través del registro de las dimensiones y una balanza para determinar el peso.

Por otra parte, se pudo detectar que, el módulo de elasticidad estático estimado a partir del MOEv y MOEi fueron mayores para el tipo de pieza: externas, en un 26 % y 27 %, respectivamente. Contrariamente, el MOEe de las piezas internas estimado con el método de resonancia fueron superiores (en un 4 %) a los de las piezas externas, indicando que no sería adecuado la utilización del método por resonancia para la estimación del MOEe de piezas internas (con contenido de resina y presencia de médula).

En las Figuras 23, 24 y 25 se muestran los resultados de los ajustes obtenidos para un modelo de regresión lineal que describe la relación entre a) MOEe y MOEv, b) MOEe y MOEr, c) MOEe y MOEi según el tipo de pieza (interna y externa).

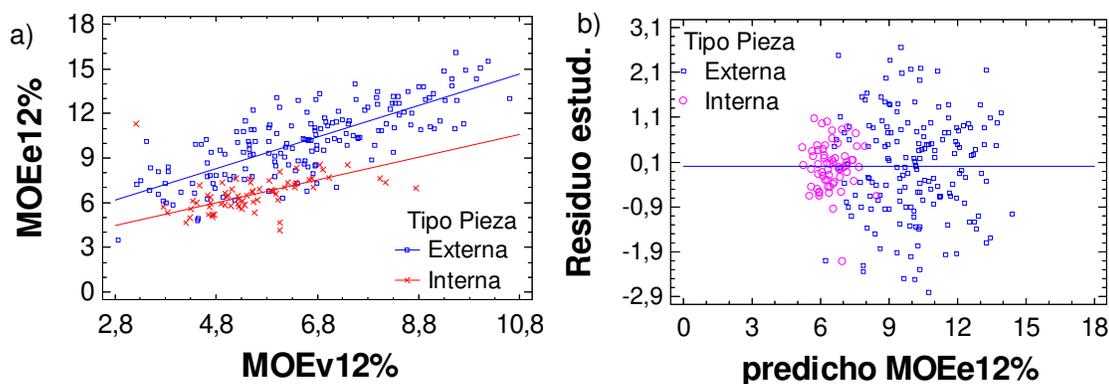


Figura 23: a) MOE estático versus MOE dinámico por vibración. b) Residuos estudentizados para el MOEe estimado por vibración.

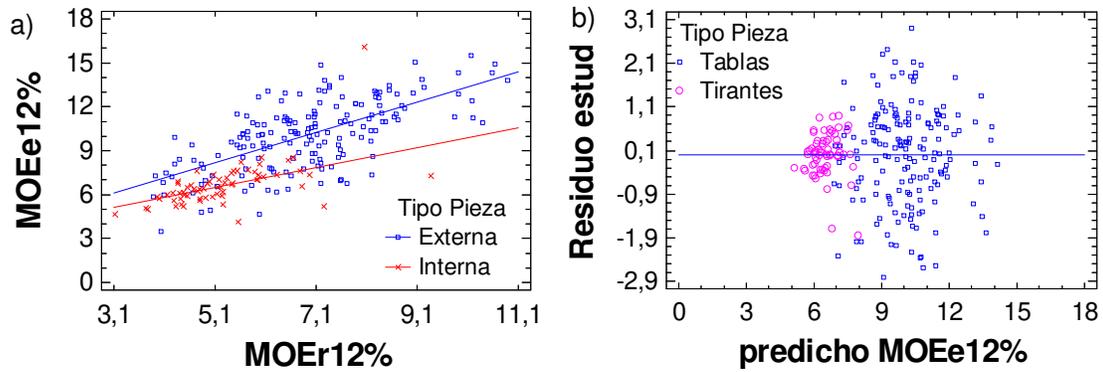


Figura 24: a) MOE estático versus MOE dinámico por resonancia. b) Residuos estudentizados para el MOEe estimado por resonancia.

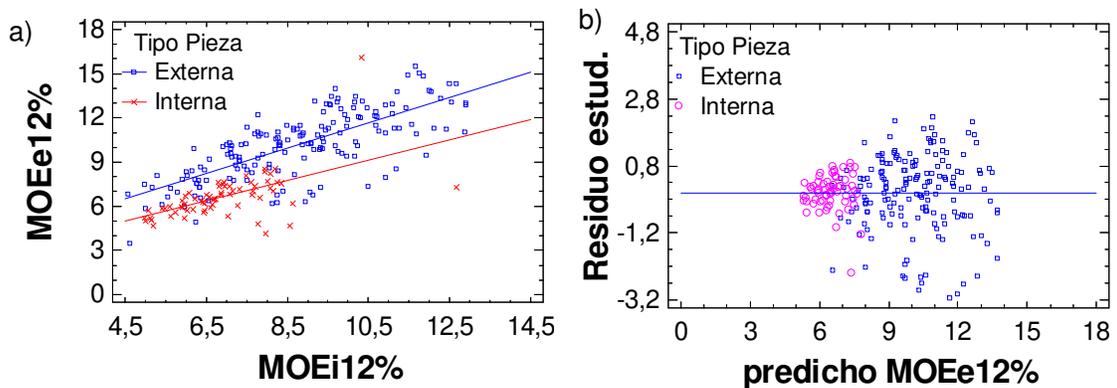


Figura 25: a) MOE estático versus MOE dinámico por impacto. b) Residuos estudentizados para el MOEe estimado por impacto.

El módulo de elasticidad a la flexión estática fue subestimado a partir de los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos con distintos equipos. El error porcentual promedio fue de 15,81 % para el método de vibración transversal (Metriguard®); de 12,36 % para el método de resonancia (Tablet con el software FFT de Fakopp®) y de 13,18 % para método TOF o impacto (*TreeSonic* de Fakopp®). Cuando se consideraron solamente las piezas externas (que alcanzan valores estructurales), el error porcentual de estimación se redujo considerablemente, siendo de 5,77 %, 5,62 % y 5,79 % para los métodos de vibración transversal, resonancia e impacto, respectivamente. Para las piezas internas, el error porcentual que superó el 30 % para cualquiera de las técnicas utilizadas. Esto indica que las piezas de la posición interna del rollizo deberían ser descartadas con una tipificación visual previa a la clasificación mecánica. En un estudio similar, realizado por Videla *et al.* (184) para *Pinus taeda* de 20 años de edad, dónde estimaron el MOE a la flexión estática a partir del módulo de elasticidad dinámico por vibración (con el equipo Metriguard®), obtuvieron un valor

de error de estimación similar (13,25 %) al logrado en esta investigación para todas piezas (internas y externas).

El tipo de corte, así como la presencia de infiltraciones de resina, nudos y médula afectaron al valor de módulo de elasticidad. El valor de MOEe para la madera externa superó a aquel obtenido para la madera interna en un 41 %. Las piezas sin médula superaron el valor de MOE en un 32 % a las piezas con médula. Un MOE más bajo en la madera interna aumenta la flexibilidad del fuste y por lo tanto permite que los árboles jóvenes se doblen con la acción del viento. Sin embargo, con el aumento de la edad, el fuste requiere una mayor rigidez para evitar roturas debido a factores ambientales y a su propio peso. Según lo reportado por Lachenbruch *et al.* (205) la progresión de la rigidez se detiene y permanece relativamente constante la madurez del árbol (acercándose a una asíntota). Otros autores como, Dungey *et al.* (43), Lasserre *et al.* (41,94), Soto *et al.* (206) Bailleres *et al.* (7) remarcaron que la rigidez de la madera juvenil del género *Pinus* está significativamente influenciada por la genética (43), por las condiciones edáficas (41) y por el espaciamiento inicial plantación (41,94,206). Estos factores deberían ser considerados en futuras investigaciones, como así también la incorporación de materiales adicionales de pino híbrido F₁ INTA-PINDO provenientes de los ensayos instalados en una amplia región geográfica.

4.3.9 Variación del módulo de elasticidad y de rotura según las características visuales

El tipo de corte tangencial (Tg), semitangencial (Stg) o interno (Int), que está relacionado a la posición de la pieza dentro del rollizo, conlleva a un comportamiento mecánico diferente del material de estudio, siendo mayores sus propiedades de rigidez y resistencia en el corte tangencial, seguido del corte semitangencial y por último la madera de la sección interna del rollizo (Figura 26). También, se determinó que la presencia de médula en las piezas ejerció una influencia negativa sobre las propiedades mecánicas, afectando en mayor medida al módulo de rotura (Figura 27).

Por otra parte, se puede sugerir que la adopción de prácticas silviculturales orientadas a optimizar las condiciones del material para su uso estructural, como la poda planificada, produciría variaciones en las propiedades de la madera, contribuyendo a una disminución de presencia de nudos y a un aumento en el valor de las propiedades mecánicas, propiciando el desarrollo de madera externa libre de nudos (92,93,160). En la Figura 28 se puede observar la variación del módulo de elasticidad y de rotura en función a la cantidad de anillos presente en la muestra. La cantidad de anillos para una distancia dada, aumentó desde la médula hacia la corteza. Los resultados encontrados confirman que la madera exterior, con una mayor cantidad de anillos por unidad de distancia, es de mejor calidad para uso estructural que la

interior. Generalmente, a menor ancho de anillo de crecimiento y mayor proporción de leño tardío dentro del mismo, le confiere una mayor densidad (207) y resistencia (55,208).

En general, la madera juvenil (madera interna) consiste de un arreglo microfibrilar, donde las fibrilas elementales presentan un gran ángulo de inclinación respecto al eje del árbol. Este fenómeno justifica los menores valores de resistencia y rigidez encontrados para la madera interna, como consecuencia de la conformación que adquiere la capa S2 de la pared celular secundaria (45,57).

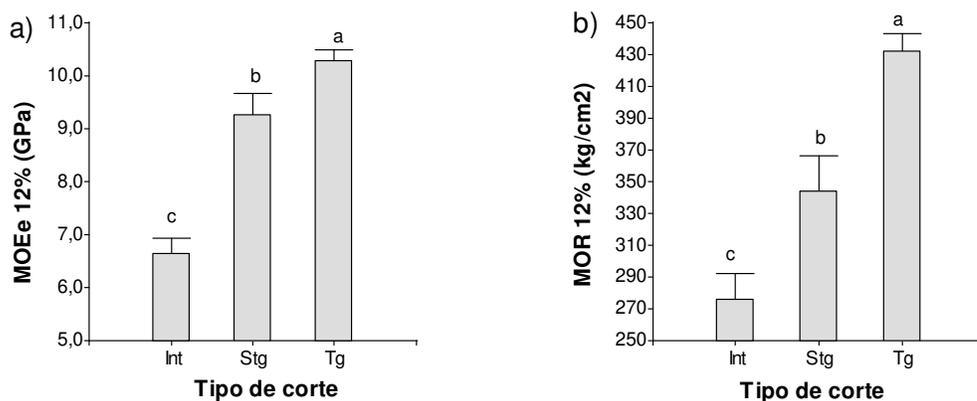


Figura 26: Variación del módulo de elasticidad (a) y módulo de rotura a la flexión estática (b) según el tipo de corte. Las barras indican los errores estándares. Medias con letras distintas son significativamente diferentes (valor- $p \leq 0,05$) para el test de DGC.

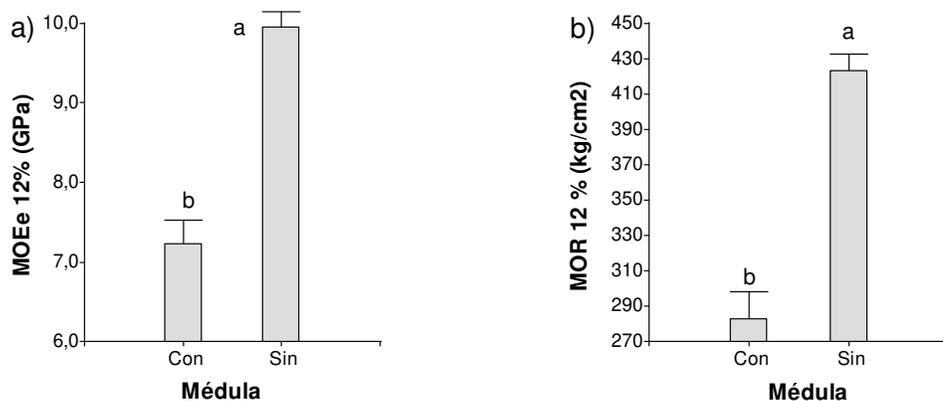


Figura 27: Variación del módulo de elasticidad (a) y módulo de rotura a la flexión estática (b) según presencia o ausencia de médula. Las barras indican los errores estándares. Medias con letras distintas son significativamente diferentes (valor- $p \leq 0,05$) para el test de DGC.

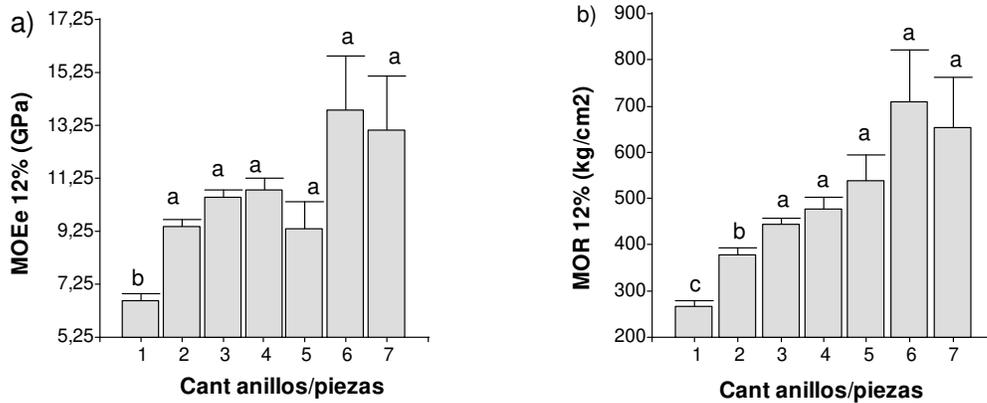


Figura 28: Variación del módulo de elasticidad (a) y módulo de rotura a la flexión estática (b) según la cantidad de anillos presentes por piezas. Las barras indican los errores estándares. Medias con letras distintas son significativamente diferentes (valor- $p \leq 0,05$) para el test de DGC.

4.3.10 Correlación entre la velocidad acústica, el módulo de elasticidad (estático y dinámico), el módulo de rotura y la densidad

El la Tabla 14 y se presentan los valores de los coeficientes de correlación (r) hallados entre la V y algunas propiedades físicas y mecánicas de la madera (y el Anexo 10. Figura 1, el gráfico de las correlaciones entre las variables analizadas. Se encontró una correlación positiva y significativa entre la V de árboles en pie y las propiedades mecánicas de la madera aserrada (MOEe, MOEv, MOEr, MOEi y MOR), coincidiendo con lo expresado por Auty y Achim (40) para *P. sylvestris* y por Bailleres *et al.* (7); Harding *et al.* (162) y Wessels *et al.* (161) para pino híbrido (PEE × PCH). Entre las técnicas no destructivas, la mayor asociación encontrada fue para el MOEe y MOEi. No se encontró asociación entre V y MOR. Coincidiendo con Wessels *et al.* (161) quienes indicaron que el MOR de las tablas aserradas de pino híbrido proveniente de parcelas experimentales de pino híbrido F_1 de 9 y 11 años de edad, no se correlacionó significativamente con las mediciones de la velocidad acústica de árboles en pie. Así mismo, Rotundo (15) determinó una asociación positiva y moderada entre los valores de MOEd obtenido mediante la técnica no destructiva sobre árboles en pie y el obtenido de forma destructiva a través de ensayos estáticos (MOEe) realizado a tablas derivadas de estos mismos árboles de pino híbrido F_1 INTA-PINDO. Por su parte, Auty y Achim (40), mediante un análisis de regresión lineal establecieron un alto coeficiente de determinación entre la V con el módulo de elasticidad a la flexión estática (MOEe) ($R^2 = 0,53$) y con el módulo de rotura (MOR) ($R^2 = 0,59$) para *P. sylvestris*, resaltando la efectividad del método.

Tabla 14: Correlaciones de Pearson entre variables obtenidas a partir de árboles en pie, en piezas aserradas y en probetas pequeñas.

	V11	MOEv	MOEr	MOEi	MOEe	MOR	DensMet	DB	DE
V11	1	0,42***	0,32***	0,44***	0,45***	0,11ns	0,25**	0,36***	0,39***
MOEv		1	0,78***	0,86***	0,79***	0,54***	0,48***	0,38***	0,35***
MOEr			1	0,80***	0,72***	0,62***	0,35***	0,24*	0,22*
MOEi				1	0,79***	0,58***	0,66***	0,47***	0,43***
MOEe					1	0,68***	0,51***	0,33**	0,30**
MOR						1	0,41***	0,21ns	0,11ns
DensMet							1	0,70***	0,65***
DB								1	0,92***
DE									1

V11: velocidad acústica a los 11 años de edad, MOEv-MOEr-MOEi-MOEe: módulo de elasticidad determinado por vibración, resonancia, impacto y estático, MOR: módulo de rotura, DensMet: densidad obtenida con el equipo Metriguard®, DB: densidad básica, DE: densidad estacionada. Los valores de las propiedades mecánicas de la madera aserrada y de la densidad estacionada fueron corregida al 12 % de contenido de humedad. ***Correlaciones significativas (valor- $p \leq 0,001$), **Correlaciones significativas (valor- $p \leq 0,01$), *Correlaciones significativas (valor- $p \leq 0,05$), ns: no significativa (valor- $p > 0,05$).

Los valores de coeficientes de correlación (r) hallados en esta investigación entre el módulo de elasticidad estático y dinámicos fueron mayores a 0,72. Mientras que, valores de r entre MOE estático y MOE dinámicos (obtenidos con distintos equipos) reportados para diferentes especies de *Pinus* y *Picea* fueron algo superiores al de este estudio, y se encuentran en el rango de 0,79 a 0,94 (185,197,198,209). Para el pino híbrido F₁ MOEd en tablas (resonancia) y MOEe en tablas el coeficiente de correlación fue de 0,85 (161).

Por otra parte, los valores de r determinados para el MOR y MOE (estático y dinámico) estuvieron en el rango de 0,54 a 0,68, alcanzando una mejor relación entre MOR y MOEe. En tanto, los valores de r citados en la bibliografía consultada para diferentes especies de *Pinus*, *Castanea* y *Eucalyptus*, se encuentran en el rango de 0,50 a 0,82 (174,175,200,210,211). En general, los autores coinciden en que el MOE estático es mejor indicador del MOR que el MOEd y la densidad.

La densidad constituye un mejor indicador del módulo de elasticidad que del módulo del módulo de rotura (MOR) de la madera (200,210,212). El valor de r obtenido en este estudio

entre la DensMet y el MOR fue moderado (0,41), mientras que la densidad básica y estacionada no logró ningún grado de asociación. Esto se debe a que en la resistencia de la madera influyen en mayor medida otros factores como nudo, inclinación de fibras, médula, resinas.

La significativa y positiva correlación obtenida entre las mediciones acústicas de los árboles en pie y el módulo de elasticidad de la madera, en particular el MOEe, afirman que la V puede ser utilizada como un buen predictor de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

El hecho de que la velocidad acústica sea útil para estudiar el comportamiento de la madera, radica en que las propiedades de la energía almacenada y disipada en forma de ondas a través de la estructura de la madera, está controlada por la orientación de fibras o traqueidas y la composición estructural de la pared celular. La velocidad acústica depende de las características del medio, principalmente de la densidad y contenido de humedad (115,156–158). Siendo mayor en madera de densidades más elevadas, mientras que con el contenido de humedad la relación es inversa (41,115,119,156–158,160). El agua libre aumenta la atenuación de las ondas, resultando en una disminución de la velocidad (115,156,157,159). La V también es mayor para traqueidas más largas (115,155–157). En la dirección longitudinal el sonido se transmite más rápidamente (propagación por las fibras o traqueidas), debido a la orientación de las células que propician un camino continuo para las ondas (156,157). Asimismo, la V y el módulo de elasticidad aumentan con la reducción del AMF (46,115) y disminuyen a medida que aumenta la porosidad (156,157). Del mismo modo, la V aumenta con mayor presencia de celulosa y decrece con el aumento en el contenido de hemicelulosas y lignina (156,157). Por otro lado, la V disminuye con el aumento en ángulo de las fibras (debido a la presencia de nudos o grano espiralado), debido a que la señal acústica tiende a seguir el grano y desplazarse alrededor de los nudos (117). A su vez, existe una influencia marcada del tipo de nudo y diámetro del mismo (41,157,160). Por esta razón en madera no podada se podrían alcanzar menores valores de V (160). La V aumenta con la edad del árbol, por contar con mayor contenido sólido (mayor densidad, proporción de leño tardío y proporción de pared celular (40). Dada la relación existente entre la velocidad acústica y las propiedades de la madera, es que se consideran como un buen soporte a nivel molecular para estimar la rigidez de la madera (7).

En base a los resultados obtenidos, se puede atestiguar que el módulo dinámico determinado con cualquiera de las TND predicen con una mayor precisión al módulo de elasticidad que al módulo de rotura a la flexión estática. Esto podría deberse a que la resistencia está muy

condicionada por los defectos de la madera como los nudos. Fank (24) obtuvo resultados similares para *Pinus elliottii* y *P. taeda*.

También es destacable la correlación entre la DensMet y las densidades aparentes medidas en el laboratorio (DB y DE), dado que es una variable necesaria para caracterizar el material, así como para deducir con cierto grado de precisión el módulo de elasticidad. Es indudable que la determinación de la densidad en laboratorio es relativamente fácil, sin embargo no es así en el aserradero, por ello la determinación no destructiva de este parámetro cobra relevancia.

4.3.11 Contracciones, coeficiente de retracción y anisotropía

El **contenido de humedad** de las piezas que se utilizaron para los estudios de estabilidad dimensional de las 15 familias, arrojó un valor promedio de 14,57 %, con un valor mínimo de 14,03 % (familia 08) y máximo de 15,24 % (familia 09), asociado a un bajo coeficiente de variación (5,28 %).

Los valores de contracción volumétrica del estado estacionado al anhidro ($C Vol_{E-An}$) (Figura 29) y la contracción volumétrica del estado saturado al anhidro ($CT Vol_{Sat-An}$) (Figura 30), fueron considerados de distribución normal.

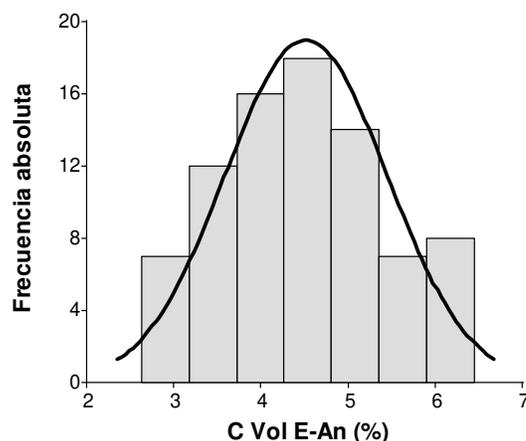


Figura 29: Histograma de frecuencias para contracción volumétrica del estado estacionado al anhidro correspondiente al total probetas.

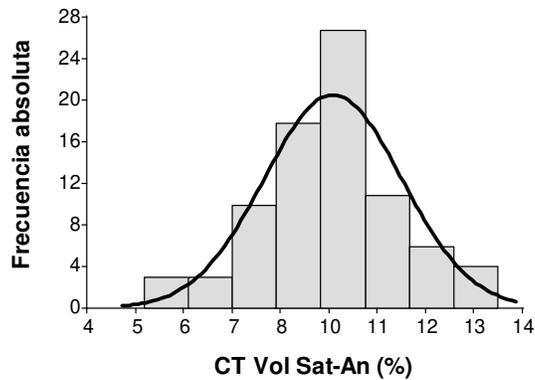


Figura 30: Histograma de frecuencias para contracción volumétrica del estado saturado al anhidro correspondiente al total probetas.

Efectuado el análisis de datos con modelos lineales mixtos (MLM), no se encontraron diferencias estadísticas entre sitios (valor- $p=0,684$) ni entre familias (valor- $p=0,634$) para la **contracción volumétrica del estado estacionado al anhidro**.

Los cambios dimensionales, involucran la contracción e hinchamiento de la madera, debido a la pérdida o absorción de agua. Este comportamiento varía según la dirección analizada, siendo mayor en la dirección tangencial (dirección de los anillos de crecimiento), luego radial y longitudinal (66). El valor promedio para las contracciones del estado estacionado al anhidro fueron 0,88 %, 1,18 %, 2,49 % y 4,49 %, en el sentido axial, radial, tangencial y volumétrica, respectivamente. El coeficiente de variación para la contracción volumétrica presentó variaciones entre 2,63 % y 6,45 % de mínimo y máximo, respectivamente.

Por otra parte, tampoco se detectaron diferencias significativas entre sitios (valor- $p=0,887$) y familias (valor- $p=0,267$) para la **contracción volumétrica del estado saturado al anhidro**. Los valores promedios (contracción total o máxima) fueron 1,54 %, 2,72 %, 5,40 % y 9,57 %, en el sentido axial, radial, tangencial y volumétrica, respectivamente. Valores muy similares fueron obtenidos por Wu *et al.* (72) para pino radiata de 6 años de edad (Ax 0,92 %, Rd 3,45 %, Tg 5,9 %) y por Álvarez y Lerda (17) para pino híbrido F_2 ($PEE \times PCH$) de 10 años de edad (Rd 2,53 % y Tg 4,73 %). Por su parte, Pereyra *et al.* (13), informaron para la madera de pino híbrido F_2 ($PEE \times PCH$) entre 8 y 14 años de edad, valores menores en el sentido axial (0,58 %), similar en corte tangencial (5,41 %) y mayor en el radial (4,24 %), arrojando una contracción volumétrica máxima de 10,23 %. Pereyra *et al.* (13), para el pino híbrido F_2 obtuvo una mayor estabilidad dimensional debido a la similitud entre los valores de contracción tangencial y radial, contrariamente a lo encontrado para el F_1 INTA-PINDO.

En el presente estudio se registraron valores de contracción volumétrica máxima de 6,04 %, 9,66 % y 13,35 % para valores de densidad básica de 240 kg/m³, 357 kg/m³, 525 kg/m³, indicando que la contracción volumétrica se incrementa conforme aumenta la densidad. En general, una mayor contracción se asocia con una mayor densidad de la madera (66,179,213). También, Saucedo-Ibarra *et al.* (179) determinaron para *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*, una relación entre contracción volumétrica máxima y densidad, con valores de contracción de 5,8 %, 10,3 % y 15,7 % para valores de densidad básica de 330 kg/m³, 430 kg/m³ y 700 kg/m³, respectivamente. Según Schulgasser y Witztum (213), este comportamiento se debe a la microestructura de la pared celular.

Para otras especies del género *Pinus* se reportaron valores similares de contracciones volumétricas máximas. Riesco y Díaz (214) informaron para *Pinus pinaster* (13,8 %), *Pinus radiata* (10,7 %) y *Pinus sylvestris* (12,3 %). Para *Pinus taeda* de 20 años de edad, Winck (215) determinó un valor medio de 9,95 %.

Schulgasser y Witztum (213) afirmaron que la tendencia de aumentar la contracción volumétrica con el aumento de la densidad es el resultado de su microestructura única y específica. Precisarón también que existe una dispersión en los valores que relacionan la contracción con la densidad, y que esto se debe a la variación entre especies, debido a las proporciones de celulosa en las distintas capas de la pared celular, y de las variaciones en la composición de la matriz de lignina-hemicelulosas-extractivos en la que están incrustadas las microfibrillas de celulosa.

En la Figura 31 se pueden observar las variaciones de las contracciones: axiales, radiales, tangenciales y volumétrica para los sitios 1 y 2 del estado estacionado al anhidro (Figura 31a) y del estado saturado al anhidro (Figura 31b).

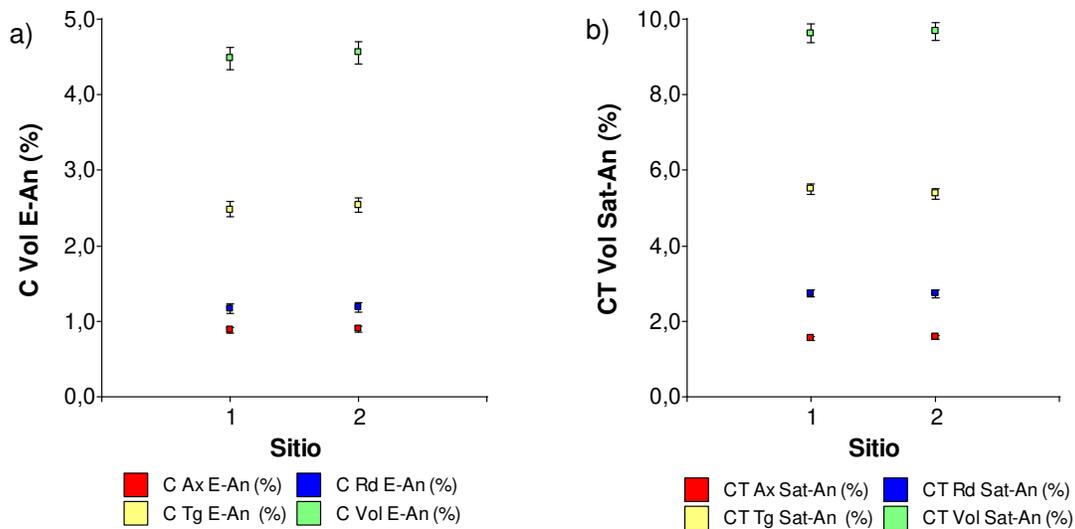


Figura 31: Variaciones de las contracciones: axiales, radiales, tangenciales y volumétrica para ambos sitios. a) del estado estacionado al anhidro (lineal), b) del estado saturado al anhidro (máxima). Las barras indican los errores estándares.

Por otro lado, se aprecia que los resultados encontrados en este estudio para las contracciones responden al patrón indicado en la literatura para el género *Pinus*, donde se obtienen los valores menores para el corte del sentido axial, seguido por los cortes radiales y tangenciales, siendo la volumétrica la sumatoria de estas tres direcciones (179). Con valores de contracciones lineales, < 1 % (axial), < 2 % (radial), \cong 3 % (tangencial) y < 6 % (volumétrica) y contracciones máximas de 1,5 (axial), < 3 % (radial), \cong 5 % (tangencial) y < 10 % (volumétrica).

Los bajos valores de contracciones encontrados para el pino híbrido F₁ INTA-PINDO, se deben probablemente a la edad evaluada, donde existe una gran proporción de madera juvenil respecto a madera madura, cuyas células presentan paredes celulares delgadas y lúmenes de gran tamaño. Asimismo, se puede apreciar que las contracciones del estado saturado al anhidro prácticamente duplican a los valores del estado estacionado al anhidro. Este patrón fue observado también para otras especies por distintos autores (13,17,110,213,214).

En el área tecnología de la madera, los valores de contracción de mayor aplicabilidad, son aquellos determinados por debajo del punto de saturación de fibra (condición estacionada), período donde las paredes celulares comienzan a perder agua, modificándose la estructura celular y produciendo alteraciones, tanto en las dimensiones como en el comportamiento resistente y elástico de las piezas de madera (110). La resistencia y la rigidez a la flexión estática mejoran en un 2 % y 1 %, respectivamente, con la disminución del 1 % en el contenido

de humedad. Esto ocurre debido a que las paredes celulares se densifican y se hacen más rígidas, produciéndose de esta forma un aumento de la cantidad de material leñoso por unidad de volumen (63,140,213). Con un contenido de humedad superior al punto de saturación de fibras, las propiedades de la madera se mantienen prácticamente constante. La contracción desde el **estado saturado al anhidro** es más utilizada para la comparación de especies.

En la **Figura 32** se pueden observar las variaciones de las **contracciones del estado estacionado al anhidro** para las 15 familias evaluadas. Normalmente mayores porcentajes de contracción están asociados a mayores valores de densidad, proporción de leño tardío y espesor de pared celular (66,213). En la **Figura 33** se ilustran las variaciones de las contracciones del **estado saturado al anhidro** en el sentido axial, radial, tangencial y volumétrica que se registraron para las familias estudiadas.

Los valores de contracciones obtenidos en este estudio se encuentran por debajo de los valores publicados para el género *Pinus* del noreste de España (214). Sin embargo, son similares a otros, donde se reportan valores para especies del género *Pinus* de la región noreste de la Argentina (13,17,215).

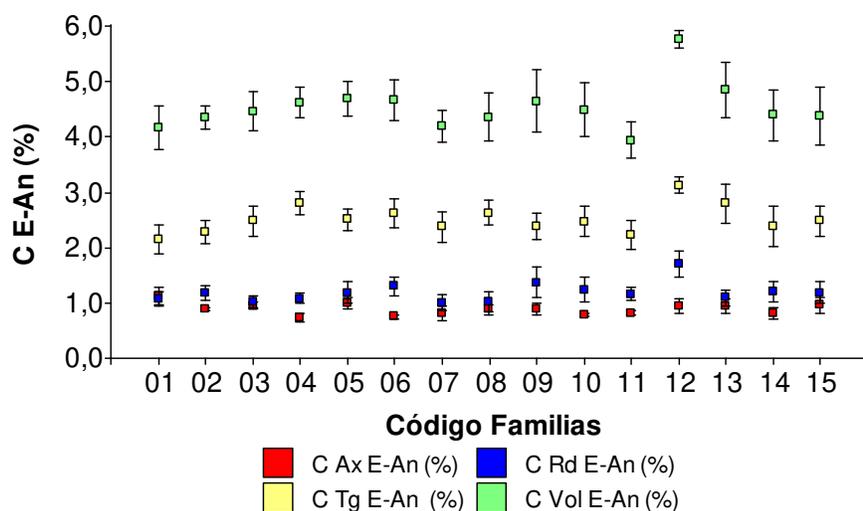


Figura 32: Variación para las contracciones, axiales, radiales, tangenciales y volumétrica del estado estacionado al anhidro por familias, correspondiente al total probetas evaluadas. Las barras indican los errores estándares.

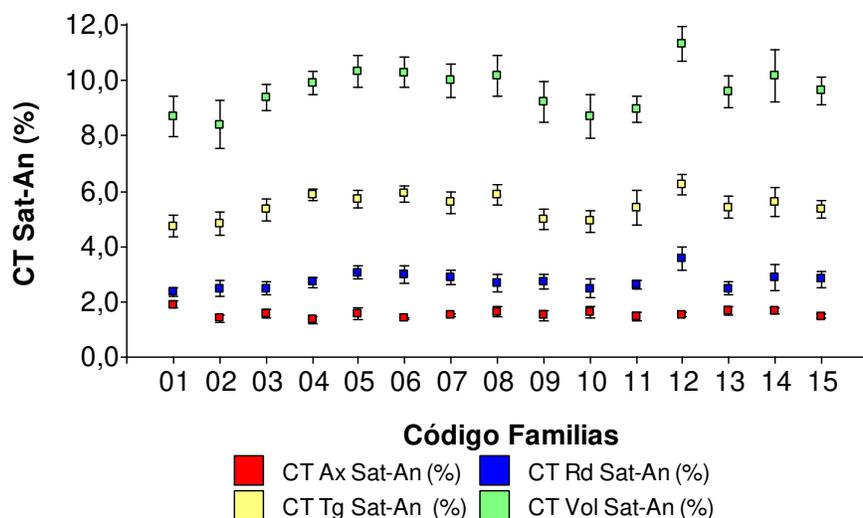


Figura 33: Variación para las contracciones axiales, radiales, tangenciales y volumétrica del estado saturado al anhidro por familias, correspondiente al total probetas evaluadas. Las barras indican los errores estándares.

No se encontraron diferencias estadísticas significativas entre sitios (valor- $p=0,739$), ni entre familias (valor- $p=0,596$) para el **coeficiente de anisotropía (Anis)**. El valor medio fue de 2,3, con mínimo de 1,9 y un máximo de 2,8. El coeficiente de anisotropía, es un indicador de la estabilidad dimensional de la madera. Cuanto mayor es la relación entre la dirección tangencial y radial, mayor será el valor de anisotropía, produciendo dificultades (defectos de deformación en las piezas de madera) en el proceso de secado. Las maderas con valores de anisotropía de 1,2 a 1,5 son consideradas muy buenas, y normalmente son destinadas a usos donde no se permiten alabeos. Valores de anisotropía de 1,6 a 1,9 son considerados de comportamiento normal y valores superiores a 2 indican que la madera será muy inestable, con limitaciones en sus aplicaciones si no se toman las precauciones necesarias (63). El coeficiente de anisotropía obtenido indica que no es una madera estable. Por lo tanto, durante el secado de pino híbrido F₁ INTA-PINDO de 11 años de edad se podría originar dificultades en el proceso de extracción del agua de la madera si no se realiza la selección adecuada del programa de secado que permita minimizar las deformaciones en esta etapa. Resultados menores de anisotropía, fueron determinados por Álvarez y Lerda (17), para el pino híbrido F₂ (PEE × PCH) de 10 años de edad (1,63) y por Wu *et al.* (72) para *P. radiata* de 6 años (1,75).

El valor promedio del **coeficiente de retracción radial (CR Rd) y coeficiente retracción tangencial (CR Tg)** fue de 0,08 y 0,17, respectivamente. Valores medios superiores (CR Rd 0,13 y CR Tg 0,21), fueron determinados por Alvarez y Lerda (17) para pino híbrido F₂ de 10 años de edad implantados en la localidad de Esperanza, Provincia de Misiones, Argentina.

En la Figura 34 se pueden visualizar las variaciones de los CR Rd y CR Tg para las 15 familias estudiadas.

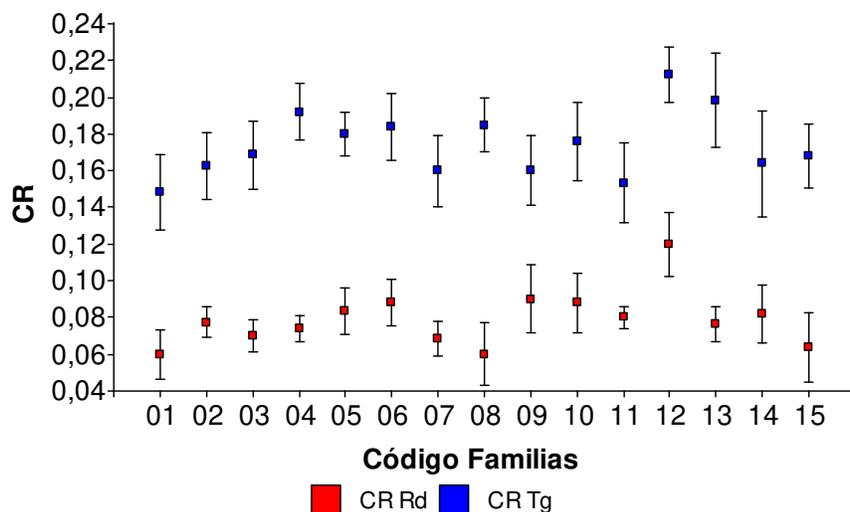


Figura 34: Variación de los coeficientes de retracción radial y tangencial por familias, correspondiente al total probetas evaluadas. Las barras indican los errores estándares.

El conocimiento de los valores de los coeficientes de retracción radial y tangencial son considerados de gran importancia en el dimensionamiento de las piezas. Permite efectuar un sobredimensionado adecuado de las piezas en el proceso de aserrado, previo el ingreso de la madera a la cámara de secado, lo que a su vez conduce a un uso más racional logrando la optimización de la materia prima. La inexperiencia respecto a estos valores y el incorrecto dimensionado de las piezas de madera, pueden traer inconvenientes futuros en distintas etapas del proceso de elaboración de productos terminados debido a la contracción desigual según el tipo de corte, generando gran cantidad de rechazos en el proceso de clasificación por no lograr la escuadría final requerida.

Por otra parte, las contracciones nos brindan información de otras propiedades, físicas y mecánicas de la madera. Este fenómeno ocurre en mayor proporción con un aumento de la cantidad de material sólido presente en la madera. Por lo tanto, podemos afirmar que tendremos mayor contracción en maderas más pesadas y duras.

4.4 Caracterización física de la madera en rodajas obtenidas de diferentes alturas de fuste

4.4.1 Densidad aparente en probetas pequeñas estandarizadas para la altura de 1,30 m

En la Tabla 15 se pueden observar los valores medios, mínimos, máximos y los coeficientes de variación para los diferentes tipos de densidades, teniendo en cuenta todas las familias de ambos sitios para las probetas derivadas de la altura 1,30 m desde el suelo.

Tabla 15: Resumen estadístico para los distintos tipos de densidad a la altura de 1,30 m.

Variable	n	Media	Mín.	Máx.	CV
DB (kg/m ³)	356	357	235	524	18,59
DA (kg/m ³)	356	404	255	620	20,04
DE (kg/m ³)	356	446	275	654	18,81
DS (kg/m ³)	356	1.015	804	1.150	7,24

DB: densidad básica, DA: densidad anhidra, DE: densidad estacionada corregida al 12% de contenido de humedad, DS: densidad saturada, n: cantidad de probetas obtenidas a 1,30 m de altura, Mín.: mínimo, Máx.: máximo, CV: coeficiente de variación.

El valor medio de **DE** es inferior a lo expresado por Guillaumet *et al.* (16) (472 kg/m³) y Alvarez y Lerda (17) (508 kg/m³) para pino híbrido F₂ (PEE × PCH) de 10 años de edad. También Alvarez y Lerda (17) registraron un valor superior para la densidad anhidra (479 kg/m³). Por otra parte, los valores de **DB**, **DA**, **DE** y **DS** para el pino híbrido F₁ INTA-PINDO fueron inferiores, respecto a lo reportado por Pereyra *et al.* (13) para la madera de pino híbrido F₂ (PEE × PCH) entre 8 y 14 años de edad (421 kg/m³, 478 kg/m³, 514 kg/m³ y 1.006 kg/m³ para las densidades DB, DA, DE y DS, respectivamente).

El valor medio de **DB** para el pino híbrido F₁ INTA-PINDO es similar al encontrado por Weber (216) para *P. taeda* Marion de 9 años de edad (356 kg/m³) y Winck *et al.* (59) para *P. taeda* Livingston de 16 años proveniente de un sistema silvopastoril (360 kg/m³) e inferior a lo indicado por Winck *et al.* (217) para *P. taeda* Marion de 14 años proveniente de un huerto semillero (400 kg/m³).

El valor medio de **DE** fue menor al determinado por Fank (24) (493 kg/m³) para una muestra obtenida a partir de un total de 251 vigas de *Pinus taeda* y *P. elliotii* de tamaño estructural proveniente de una industria de la provincia de Misiones sin registro de la edad de plantación.

Valores mayores de DB fue determinado por Sackser *et al.* (218) para *P. elliotii* de 9 años (452 kg/m³) y por Hernández y Zamora-Campos (219) para *Pinus caribaea* (Mor.) var. *hondurensis* (Barr. y Golf) (383 kg/m³) proveniente de cinco procedencias de Honduras que formaba parte de un ensayo de progenies de 11 años de edad, instalado en la región de Los Tuxtlas, Veracruz.

Por otro lado, los valores de **DB** obtenido el pino híbrido F₁ INTA-PINDO de 11 años de edad, es inferior los valores determinados por Harding *et al.* (162) para F₁ (430 kg/m³), F₂ (470 kg/m³), PEE (495 kg/m³) y PCH (420 kg/m³) de 10 años cultivado en Australia. Estas diferencias podrían deberse a las condiciones de crecimiento de cada rodal.

Del análisis de los valores de densidades encontrados para coníferas de edades equivalentes, cuyas maderas se destinan a un uso industrial semejante, se observa que el pino híbrido F₁ INTA-PINDO, alcanzó valores de densidades similares al *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus elliotii* var. *elliotii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* "F₂", *Pinus taeda* e inferior al material parental femenino. No obstante, hay que destacar que, de acuerdo a lo expresado por Keller *et al.* (4) y Guillaumet *et al.* (16) el pino híbrido produce un mayor volumen anual de madera que las especies *Pinus taeda* y *P. elliotii*, con propiedades resistentes similares, demostrando un buen potencial para su utilización en la fabricación de vigas de madera laminada encolada.

La determinación de la **DB** y **DA** se realiza con fines científicos para la comparación de especies. Conociendo los valores de **DA** y el punto de saturación de fibras de una especie determinada es posible estimar el hinchamiento volumétrico máximo. Por otra parte, la **DB** presenta la ventaja de permitir la obtención de un valor reproducible, seguro e invariable (63). Los valores de densidades referidas a cierto contenido de humedad son de interés práctico para las industrias (en condiciones estacionadas: clasificación de especies, asignación de clases resistentes, industria de la remanufactura, y saturadas: industria de la pulpa y papel). De aquí en adelante se analizan con mayor profundidad los valores de **DB**, **DA** y **DE**.

En las Figuras 35 a 37 se pueden visualizar los histogramas de frecuencias para las **DB**, **DA** y **DE**, los mismos fueron considerados semejantes a una distribución normal. Es importante indicar lo expresado por Hermoso-Prieto (174) para *Pinus sylvestris* L proveniente de España y Fank (24) para *Pinus taeda* y *P. elliotii* cultivados en la provincia de Misiones, que el no cumplimiento de los supuestos de normalidad de los datos, a un nivel de significancia del 5 %, no afectaban la fiabilidad de los análisis realizados para la caracterización tecnológicas de dichas especies.

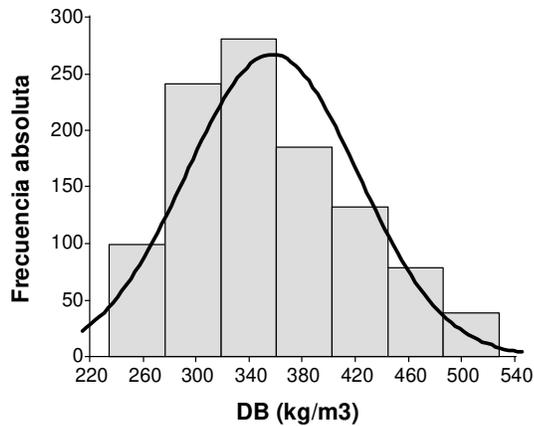


Figura 35: Histograma de frecuencias y curva normal asociada para la densidad básica correspondiente al total de muestras evaluadas a la altura del 1,30 m.

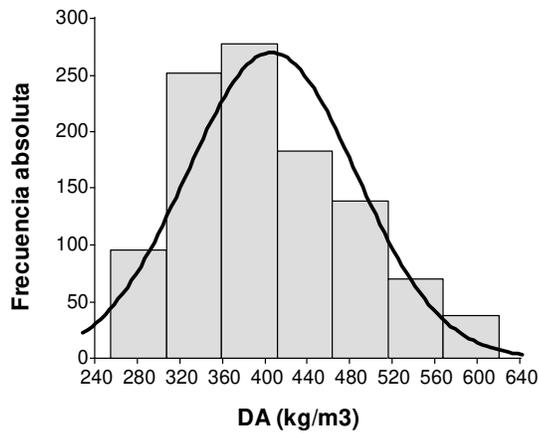


Figura 36: Histograma de frecuencias y curva normal asociada para la densidad anhidra correspondiente al total de muestras evaluadas a la altura del 1,30 m.

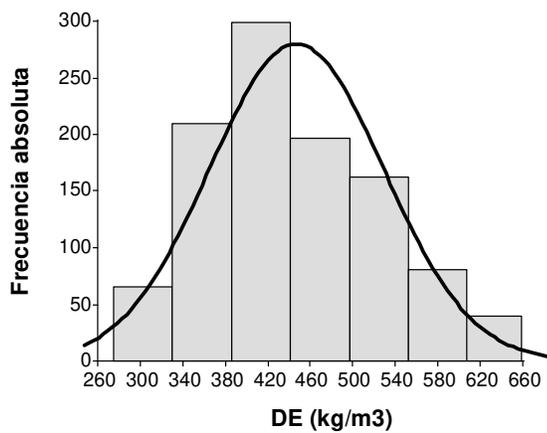


Figura 37: Histograma de frecuencias y curva normal asociada para la densidad estacionada corregida al 12 % de contenido de humedad correspondiente al total de muestras evaluadas a la altura del 1,30 m.

A través de MLM se evaluó la influencia del sitio y familias sobre los distintos tipos de densidades (en el Anexo 11, se muestran los residuos *estudentizados* para los parámetros de efectos fijos (sitios y familias) y aleatorio (árbol) del modelo de análisis seleccionado para la DB, DA y DE para la altura de 1,30 m, diagramas de dispersión entre los residuos *estudentizados* y los valores predichos. Gráfico Q-Q plot.

Se determinó la influencia significativa del sitio (valor- $p \leq 0,05$) sobre los valores de **DB**, **DA** y **DE** para las **muestras obtenidas a 1,30 m de altura**, mientras que no fue significativa para las familias. Los valores de densidades **DB**, **DA** y **DE** fueron mayores para el sitio 2 (Figuras 38 a 40). Para la densidad saturada (DS) no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre sitios, ni entre familias (valor- $p > 0,05$).

El valor medio de **DB** fue mayor para el sitio 2 (368 kg/m^3) (error estándar 5,08), mientras que para el sitio 1 fue de 345 kg/m^3 (error estándar 5,17). Asimismo, se obtuvieron valores medios de **DA** de 391 kg/m^3 (error estándar 6,28) para el sitio 1 y 417 kg/m^3 (error estándar 6,14) para el sitio 2. En ambos casos (DB y DA), el sitio 2 presentó menores valores de errores estándares de estimación. Por otra parte, los valores medios de **DE** fueron de 433 kg/m^3 (error estándar 6,51) y 459 kg/m^3 (error estándar 6,42) para los sitios 1 y 2, respectivamente.

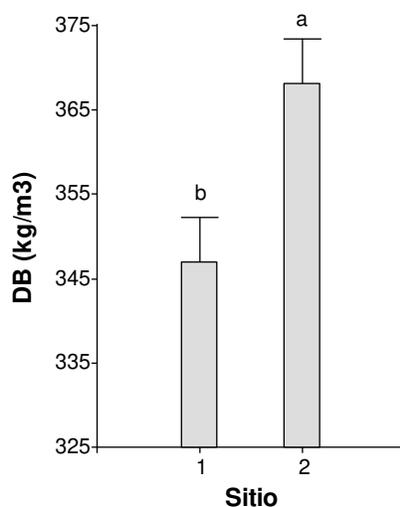


Figura 38: Densidad básica promedio para los sitios 1 y 2 para la totalidad de probetas obtenidas a la altura de 1,30 m. Las barras indican los errores estándares. Medias con letras distintas son significativamente diferentes (valor- $p \leq 0,05$) para el test de DGC.

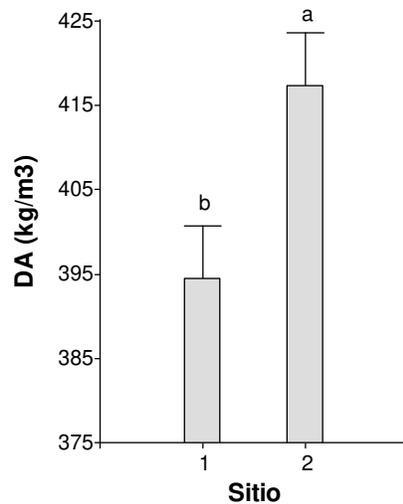


Figura 39: Densidad anhidra promedio para los sitios 1 y 2 para la totalidad de probetas obtenidas a la altura de 1,30 m. Las barras indican los errores estándares. Medias con letras distintas son significativamente diferentes (valor- $p \leq 0,05$) para el test de DGC.

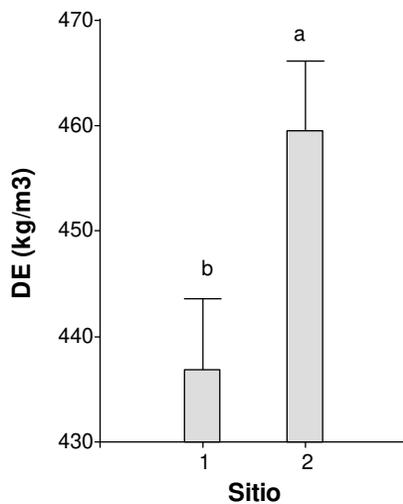


Figura 40: Densidad estacionada promedio al 12% de contenido de humedad para los sitios 1 y 2 para la totalidad de probetas obtenidas a la altura de 1,30 m. Las barras indican los errores estándares. Medias con letras distintas son significativamente diferentes (valor- $p \leq 0,05$) para el test de DGC.

Un comportamiento similar al de las densidades para el sitio 2 se obtuvo para otras variables (módulo dinámico para árboles en pie, módulo de elasticidad dinámico y DensMet para piezas de escuadrías comerciales y ángulo microfibrilar a 4 edades), con diferencias significativas. La madera proveniente del sitio 2 presentó características estructurales más homogéneas, esto puede deberse a la distribución de diámetros de los árboles, cantidad de familias en cada

sitio y uso anterior de la tierra, previo a la instalación del ensayo. Según lo expresado Bailleres *et al.* (7) el uso previo del suelo influye considerablemente en las propiedades de la madera.

4.4.2 Densidad aparente en probetas pequeñas estandarizadas para las alturas de 0,1 m 1,3 m y 4,5 m

Una vez determinado que no existieron variaciones para los distintos tipos de densidades entre familias, pero sí entre sitios, se tomaron todas las probetas de las 3 alturas de fuste para evaluar el comportamiento radial (cuatro clases de distancia radial relativa: DR) y axial (tres alturas en el fuste: HF) de las densidades dentro de cada sitio. La Tabla 16 presenta un resumen estadístico para las DB, DA, DE y DS. Los valores de los coeficientes de variación para las distintas densidades estudiadas fueron muy similares en ambos sitios.

Tabla 16: Resumen estadístico para los distintos tipos de densidades considerando las 3 alturas de fuste (0,1 m, 1,3 m y 4,5 m).

Sitio	Variable	n	Media	Mín.	Máx.	CV
1	DB (kg/m ³)	516	347	235	528	17,33
	DA (kg/m ³)	516	394	255	612	18,67
	DE (kg/m ³)	516	435	275	641	17,46
	DS (kg/m ³)	516	1.021	811	1.169	7,02
2	DB (kg/m ³)	519	367	245	522	17,69
	DA (kg/m ³)	519	418	255	620	19,23
	DE (kg/m ³)	519	459	294	663	17,99
	DS (kg/m ³)	519	1.005	796	1.171	8,07

DB: densidad básica, DA: densidad anhidra, DE: densidad estacionada corregida al 12 % de contenido de humedad, DS: densidad saturada, n: cantidad de probetas obtenidas a 3 alturas de fuste (0,1 m; 1,3 m y 4,5 m), Mín.: mínimo, Máx.: máximo, CV=coeficiente de variación.

Los valores de densidades **DB**, **DA** y **DE** fueron estadísticamente significativas entre sitios (valor- $p \leq 0,05$), mientras que para la **DS** no fue significativo (valor- $p > 0,05$). Con valores promedios de DB, DA y DE superiores (5 %) en el sitio 2.

En las Figuras 41 y 42 se pueden observar las variaciones de las densidades **DB**, **DA** y **DE** para las familias dentro de cada sitio, observándose un patrón esperable, de menores valores para la densidad básica, seguida por la anhidra y por último la estacionada (en el Anexo 8. Tabla 3, se presenta una estadística descriptiva para parámetros estructurales–Densidad aparente estacionada al 12 % de contenido de humedad para las 15 familias evaluadas).

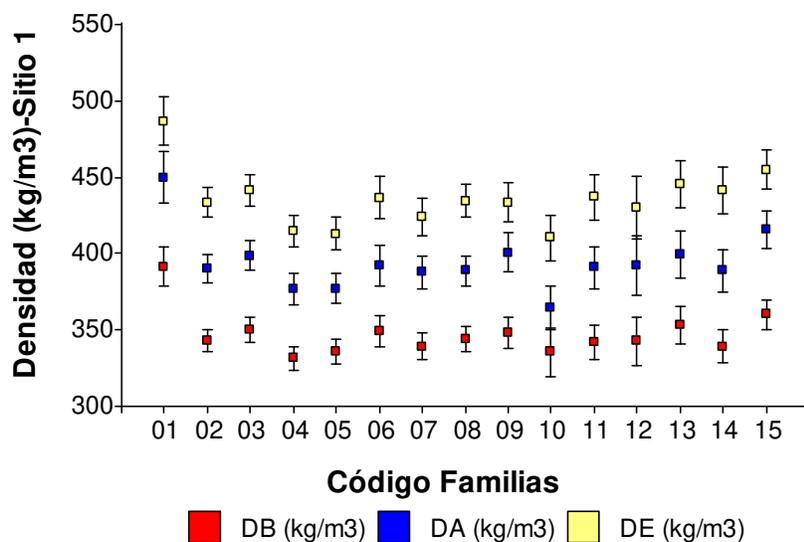


Figura 41: Variaciones de las densidades básica, anhidra y estacionada por familias evaluadas dentro del sitio 1 para la totalidad de probetas (n=516) obtenidas a 3 alturas del fuste (0,1 m, 1,3 m y 4,5 m). Las barras indican los errores estándares.

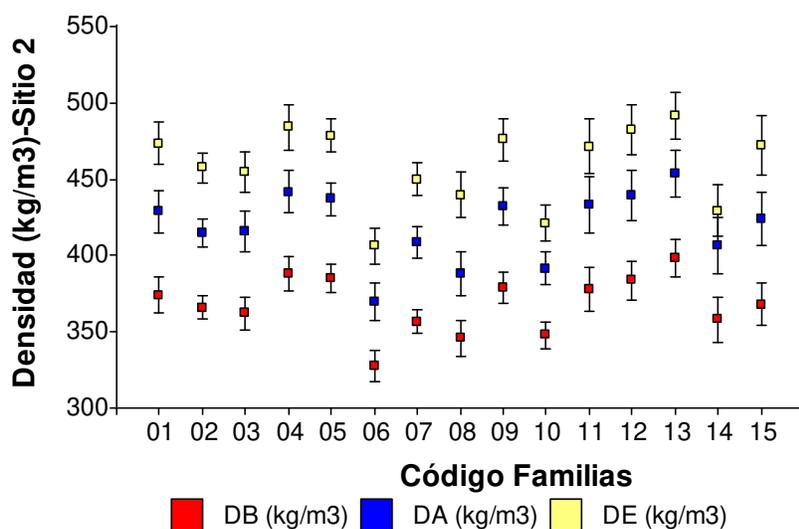


Figura 42: Variaciones de las densidades básica, anhidra y estacionada por familias evaluadas dentro del sitio 2 para la totalidad de probetas (n=519) obtenidas a 3 alturas del fuste (0,1 m, 1,3 m y 4,5 m). Las barras indican los errores estándares.

Un patrón atípico de la **DE** sucedió para la familia 06. En el sitio 1 los valores de **DE** para los ejemplares muestreados fueron muy similares, 450, 420 y 450 kg/m³ para los árboles con DAP de 27,1, 29,6 y 29,7 cm, respectivamente (diferencia en DAP: 2,6 cm). Sin embargo, para el sitio 2, los valores de DAP fueron de 24, 26,5 y 36,3 cm (diferencia en DAP: 12,3 cm), alcanzando estos ejemplares valores de 470, 400 y 380 kg/m³, para la DE, respectivamente.

Indicando que un aumento en el DAP conllevó a menores valores de densidad. Este comportamiento puede atribuirse al sistema de muestreo. Esto concuerda con lo expresado por Carson *et al.* (165), quienes obtuvieron para *Pinus radiata* D Don, de 17 años de edad, menores valores de densidad para árboles de mayores diámetros. No obstante, es importante notar que un aumento de 2,5 cm en el diámetro (24 a 26,5 cm) conllevó una disminución en la densidad 70 kg/m³, y que para un incremento en diámetro de 9,8 cm (26,5 a 36,3 cm), la densidad solo disminuyó 20 kg/m³, marcando que la relación entre ambas variables no es lineal. Por otro lado, la relación DAP y densidad de la madera es controvertida. Un mayor DAP no implica necesariamente madera de baja densidad. Algunos autores establecen una correlación negativa (207,208), mientras que otros presentan una correlación positiva (220,221) o nula (222).

4.4.3 Variación radial y axial de la densidad aparente básica, anhidra y estacionada para el material de pino híbrido F₁ INTA-PINDO para los sitios 1 y 2

Dentro de cada sitio, la posición radial relativa de la muestra y la altura en el fuste tuvieron influencia estadísticamente significativa (valor- $p \leq 0,05$) sobre el valor de la densidad básica, anhidra y estacionada, con un patrón creciente y marcado en el sentido radial y decreciente con la altura de fuste para ambos sitios (Figuras 43 a 46). De manera similar, Burdon *et al.* (23) determinaron un aumento para la densidad de *P. taeda* y *P. radiata* desde la médula a la corteza y una disminución de la base al ápice del árbol.

Dentro del sitio 1, los valores de **DB** para las posiciones radiales A, B, C y D fueron 303 kg/m³, 301 kg/m³, 330 kg/m³ y 400 kg/m³, respectivamente, mientras que en el sitio 2 tomaron valores de 338 kg/m³, 316 kg/m³, 350 kg/m³ y 428 kg/m³ para las posiciones A, B, C y D, respectivamente. Los valores medios de DB fueron iguales para posiciones A y B (valor- $p > 0,05$), y diferentes de respecto a las posiciones radiales C y D. Esto sucedió para ambos sitios.

El sitio 2 superó al sitio 1 en los valores de **DB** en 10 %, 5 %, 6 % y 7 % para las posiciones radiales A, B, C y D, respectivamente. Tal vez, esta diferencia entre ambos sitios en las características de la madera, permita atender a distintos mercados o destinos. Pudiendo ser la ser la madera del sitio 2 más adecuadas para usos sólidos, dado que la densidad determina su aptitud para estructuras y la madera del sitio 1 podría ser destinada a la producción de machimbres, tableros reconstituidos, entre otros.

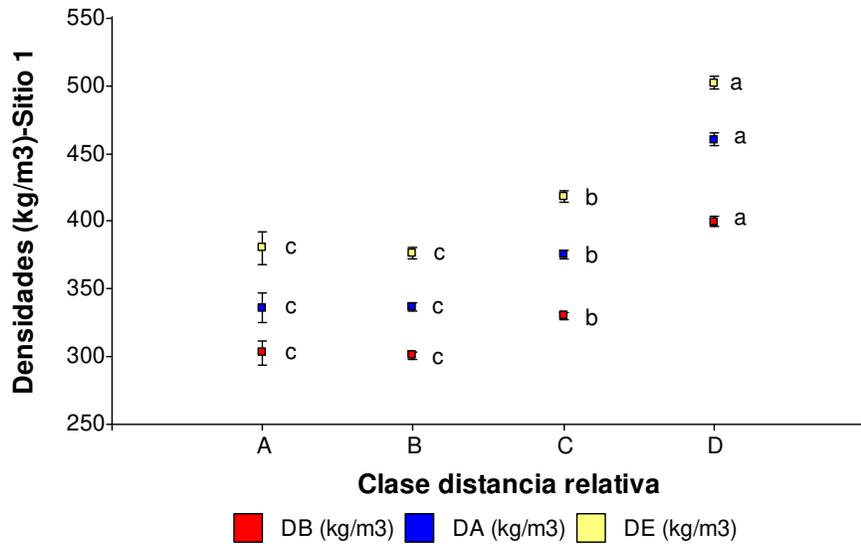


Figura 43: Variación en el sentido radial de las densidades aparentes, básica, anhidra y estacionada para el material de pino híbrido F₁ INTA-PINDO para el sitio 1. Las barras indican los errores estándares.

Nota: Las probetas se agruparon en clases de distancia relativa A, B, C y D, correspondiendo al 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de la distancia radial desde la médula hacia la corteza.

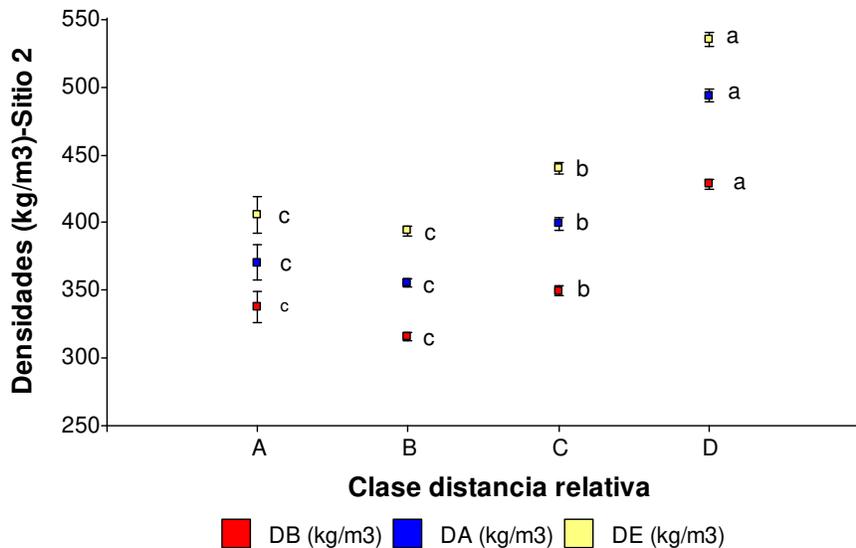


Figura 44: Variación en el sentido radial de las densidades aparentes, básica, anhidra y estacionada para el material de pino híbrido F₁ INTA-PINDO para el sitio 2. Las barras indican los errores estándares.

Nota: Las probetas se agruparon en clases de distancia relativa A, B, C y D, correspondiendo al 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de la distancia radial desde la médula hacia la corteza.

El incremento en sentido radial en el valor medio de **BD** fue similar para ambos sitios con un aumento desde la médula hacia la corteza de 97 kg/m³ para el sitio 1 (24 %) y 90 kg/m³ para el sitio 2 (21 %). La variación radial de la densidad es un fenómeno conocido, Lachenbruch *et al.* (205) mencionaron que, en algunas especies de pino, la densidad de la madera exterior puede duplicar al valor de la madera interna. Sin embargo, señalaron que las diferencias más comunes son entre un 10 % y un 20 %.

La similitud entre los valores de densidad (**DB**, **DA** y **DE**) entre las posiciones radiales A y B, pueden deberse a la presencia de resinas identificadas a través de la coloración sobre las rodajas obtenidas a distintas alturas del fuste.

Con **respecto a la altura de fuste**, la disminución de las densidades (DB, DA y DE) para ambos sitios, fue más marcada para el sitio 2 (Figuras 45 y 46).

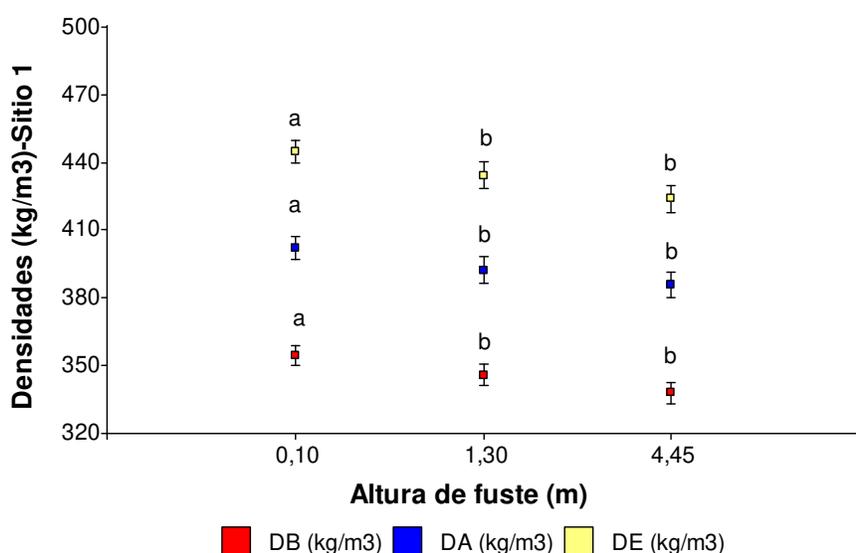


Figura 45: Variación en el sentido axial de las densidades aparentes, básica, anhidra y estacionada para el material de pino híbrido F₁ INTA-PINDO para el sitio 1. Las barras indican los errores estándares.

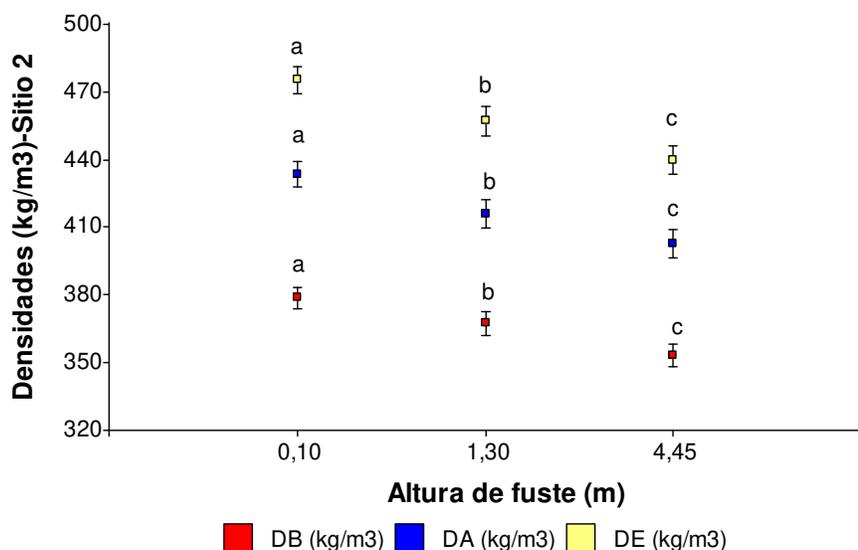


Figura 46: Variación en el sentido axial de las densidades aparentes, básica, anhidra y estacionada para el material de pino híbrido F₁ INTA-PINDO para el sitio 2. Las barras indican los errores estándares.

Para el **sitio 1** los valores promedios de **DB** fueron de 354 kg/m³ a los 0,10 m de altura, 346 kg/m³ a los 1,30 m y 338 kg/m³ a los 4,45 m, con diferencias significativas entre los 0,10 m de altura, respecto a las alturas sucesivas, que entre ellas fueron iguales. Para el **sitio 2**, los valores de **DB** arrojaron diferencias estadísticas entre las 3 alturas de fuste, registrándose promedios de 379 kg/m³, 367 kg/m³ y 353 kg/m³ a las alturas de 0,10 m, 1,30 m y 4,45 m, respectivamente. La **DB** disminuyó en promedio 8,5 kg/m³ (5 %) en el sitio 1 y 13 kg/m³ (7 %) en el sitio 2. Para 3 alturas consideradas la DB fue mayor para el sitio 2, superando los valores del sitio 1, en 6 % para las alturas 0,10 m y 1,30 m, y, en un 3 % a los 4,45 m.

La DA y DE presentaron un patrón semejante a la DB. Es importante conocer la relación existente entre los distintos tipos de densidades, debido a que el valor que normalmente se encuentra disponible en la literatura se refiere a la densidad básica. Al sector de la industria de la remanufactura para la comercialización del producto le resulta de interés conocer el valor de la densidad estacionada. La DE fue en promedio entre 17-21% mayor respecto a la DB. Mientras que la DA fue en promedio entre 9-13 % superior a las DB.

En el **sitio 2** la madera alcanzó valores para la **DE** más elevados respecto al sitio 1, y a una edad más temprana. Para el **sitio 2**, en la **posición radial B** los valores de **DE** superaron los **390 kg/m³** y en la **posición radial C** superaron los **420 kg/m³**. Mientras que en el sitio 1, estos valores se alcanzaron en las posiciones radiales C y D, respectivamente. Es importante

señalar es que la posición radial C y D, representaron el 31,3 % y 35,9 % del total de probetas analizadas, respectivamente. Wu *et al.* (72) para el pino híbrido F₁ australiano obtuvieron valores similares de densidad medidas con el equipo SilviScan a partir de tarugos radiales, registraron un valor medio de 380 Kg/m³ entre el anillo 3 y 5, y 525 kg/m³ en los anillos 9 y 10.

Normalmente, un valor más elevado de **densidad** expresa una mayor resistencia de la madera a las acciones mecánicas, lo que se fundamenta en una mayor cantidad de pared celular por unidad de volumen (63), indicando un mejor comportamiento para fines estructurales.

4.4.4 Caracterización de los anillos de crecimiento y coloración de la madera

En la evaluación de las características de los anillos de crecimiento y coloración, se obtuvieron diferencias significativas entre familias para el ancho y área de anillos de crecimiento, y, % de área coloreada (valor- $p \leq 0,05$). Contrariamente, los sitios no tuvieron un efecto significativo sobre dichos caracteres (valor- $p > 0,05$). En la Figura 47 se muestra la variación en el ancho promedio de los anillos por familias. La familia 02 presentó el mayor ancho promedio de anillos (1,35 cm), seguida por las familias 01, 03, 04, 05 y 07 con valores entre 1,27 y 1,29 cm. La familia 02 también arrojó mayor área promedio de anillos de crecimiento (Anexo 12. Figura 1). Estas pertenecen a la posición 1 y 2 del ranking genético de crecimiento.

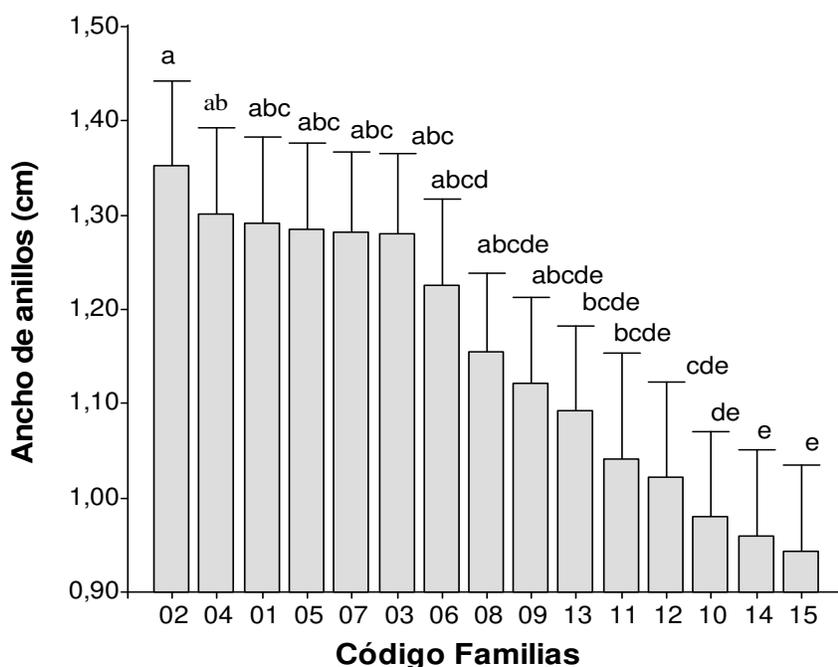


Figura 47: Ancho promedio de anillos de crecimiento por familias.

En el período de evaluación se pudo observar que hasta los 2 años todas las familias se desarrollaron de manera similar (Anexo 12. Figura 2). A partir de allí las familias del R3 (ranking inferior) disminuyeron su crecimiento, produciéndose una menor ralentización en las familias del R1. Las familias pertenecientes al ranking superior (R1: familias 01 al 05) mantuvieron su performance a través del tiempo (edades). La uniformidad radial de los anillos de crecimiento, influye en las propiedades tecnológicas de la madera. El ancho de anillos poder variar dependiendo de la duración del período vegetativo, temperatura, humedad, luminosidad y manejo silvícola (55). Por otro lado, el ancho del anillo de crecimiento y la cantidad de anillos presentes por pulgada, constituyen características de importancia para determinar la calidad de la madera según su uso final (223). En coníferas, la densidad actúa como orientador de las propiedades estructurales (64) y es considerado un factor condicionante para el rendimiento físico-mecánico de la madera (55,207,208). La norma Southern Pine Inspection Bureau de clasificación visual de madera para usos estructurales, considera que una madera de pino resinoso es densa cuando posee al menos seis anillos de crecimiento por pulgada y al menos un tercio ($1/3$) de madera tardía o cuatro anillos de crecimiento por pulgada y con al menos un 50 % de madera tardía (113,223). Esto sucedió solamente para la madera de la posición externa. Para todas las familias, el mayor incremento del área de los anillos ocurrió al quinto año (Anexo 12. Figura 2). Resultados similares fueron obtenidos por Gonçalez *et al.* (208) para este mismo taxón, quienes determinaron un mayor crecimiento y prácticamente constante para los primeros 4 años de edad y luego una disminución del mismo.

Con respecto a la coloración, ninguna familia superó el 5 %, siendo las familias 01 y 03 las que presentaron el mayor promedio 3,96 % y 4,82 %, respectivamente (Figura 48). Indistintamente del material genético evaluado, la proporción de la coloración mostró un incremento con la altura del fuste (Figura 49), por lo que, si se mantiene este patrón, de los rollizos superiores del árbol se obtendría un menor rendimiento en madera libre de coloración. Para la variación axial de la coloración no se han encontrado referencias bibliográficas, por lo que existe una vacancia en el área del conocimiento referido a esta temática para el pino híbrido entre PEE x PCH.

A través del análisis de clusters, las familias 01 y 03 quedaron agrupadas por presentar mayor porcentaje de área coloreada (Figura 50a) y las familias 01, 02, 03, 04, 05 y 07 con mayores anchos promedios de anillos de crecimiento (Figura 50b), cinco familias pertenecen al R1 y una familia pertenece al R2 de crecimiento. La correlación cofenética fue de 0,84 para área coloreada y de 0,80 para el incremento en el ancho de anillos.

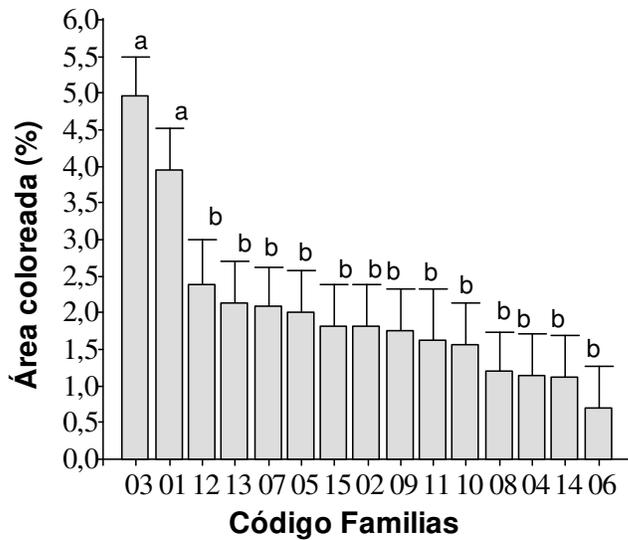


Figura 48: Porcentaje de área coloreada por familia.

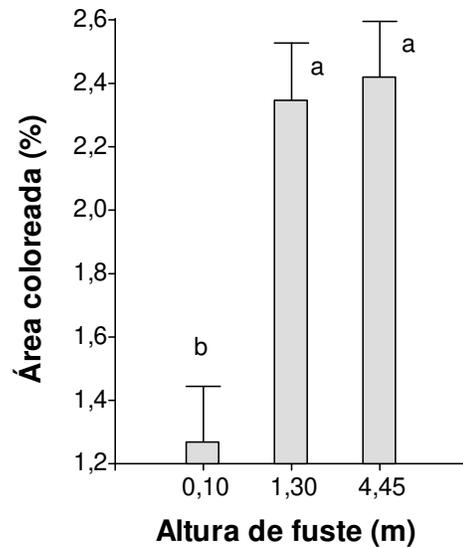


Figura 49: Porcentaje de área coloreada según altura de fuste.

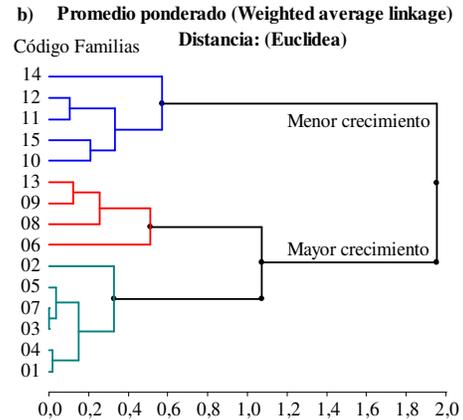
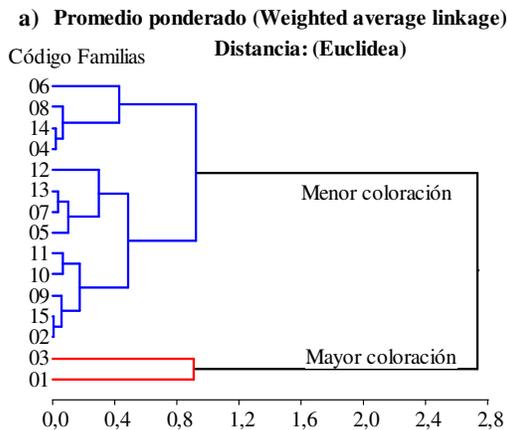


Figura 50: Agrupación de familias similares a) por % de área coloreada. b) por crecimiento.

El **duramen** se diferencia de la albura por la coloración. La albura se encuentra en la zona exterior del leño, correspondiente a la última madera formada. Es de color claro o blanquecino, y su función es la del transporte de agua y nutrientes desde las raíces hasta la copa del árbol, por lo que sus elementos conductores están libres de obturaciones por depósitos. Con el tiempo, las células detienen su función fisiológica, y debido a la formación de compuestos que impregnan la pared celular y obturan el lumen, sufren una serie de transformaciones químicas y anatómicas. Estos procesos le confieren a la madera un color más oscuro y una mayor densidad, a esta región se denomina duramen (224). El duramen proporciona mayor durabilidad natural por contener extractivos (225). En madera de coníferas la cantidad y

constitución del duramen influyen en la permeabilidad de la madera a los líquidos (226,227). Esta característica interfiere en el tratamiento de la madera con preservantes, en el secado, pulpado químico, encolado, acabado (226,228–230). Los extractivos que impregnan a la pared celular y otorgan al duramen su aspecto coloreado, en el género *Pinus*, se denominan "resinas". Según Bailleres *et al.* (7) el contenido de resinas disminuye desde la médula a la corteza y en la madera se visualiza como un exudado semisólido que contiene compuestos terpénicos, que le proporcionan un olor distintivo, pudiendo actuar como defensa bioquímica contra el ataque de plagas.

El **duramen**, *heartwood* o la región interna (zona coloreada) del pino híbrido F₁ INTA-PINDO presentó algunas características indeseables, como su apariencia oscura, falsos valores (altos) de densidades aparentes (DB, DA y DE) y MOE dinámico (resonancia), con respecto a la madera no coloreada. Esto concuerda con lo expresado por Bailleres *et al.* (7), quienes indicaron que los extractivos afectan a la densidad y a la rigidez de la madera. Las maderas con presencia de resinas se vuelven quebradizas ante pequeños cambios en el contenido de humedad, provocando un efecto perjudicial sobre todo en algunas propiedades mecánicas de la madera, como la resistencia a la compresión paralela a las fibras (68), resultando no adecuada para usos estructurales. También Burdon y Moree (71), indicaron que la coloración debido a la presencia de extractivos es una característica que a menudo afecta negativamente a la madera para usos de apariencia.

4.5 Comparación de los valores experimentales para la resistencia, rigidez y densidad con los valores característicos establecidos por la norma IRAM 9662-3 para pinos resinosos

En la Tabla 17 se pueden observar los valores experimentales y los valores característicos de referencia según la norma IRAM 9662-3.

Los valores promedios MOE y densidad considerando la totalidad de las muestras evaluadas, alcanzaron valores característicos muy bajos, respecto a los valores de referencia indicado en la norma IRAM 9662-3. La madera no clasificó por densidad ($\rho_k=334 \text{ kg/m}^3$), en base al MOE alcanzó la clase 2 de resistencia (9.145 N/mm^2). Con el MOR sí se logró satisfactoriamente el grado de calidad superior ($18,2 \text{ N/mm}^2$). No obstante, la madera que no cumplió con los estándares para fines estructurales, podría ser destinada a otro tipo de usos como por ejemplo muebles livianos y fabricación de machimbre.

Con la separación de la muestra según su posición en la sección transversal (madera interna y externa), y considerando solamente la sección externa, los valores de las propiedades

mecánicas y densidad fueron superiores. Se alcanzaron valores de $\rho_k=415 \text{ kg/m}^3$, $\text{MOE}=10.135 \text{ N/mm}^2$ y $\text{MOR}=18,4 \text{ N/mm}^2$. Estos superaron a los valores de referencia de la norma IRAM 9662-3 para la clase de 2 (390 kg/m^3 , 7.000 N/mm^2 y 11 N/mm^2 , respectivamente). Mientras que la clase 1 (420 kg/m^3 , 12.000 N/mm^2 y 18 N/mm^2 , respectivamente), solo fue alcanzada con el parámetro MOR.

Tabla 17: Comparación de los valores experimentales para la resistencia, rigidez y densidad con los valores característicos especificados por la norma IRAM 9662-3.

Sitios	Muestras	n	$\text{MOR}_m/\text{MOR}_k \text{ (N/mm}^2\text{)}$	n	$\text{MOE}_m \text{ (N/mm}^2\text{)}$	n	$\rho_m/\rho_k \text{ (kg/m}^3\text{)}$
1	Total	112	39,5/18,6	112	8850	516	435/327
	Internas	26	27,5/18,7	26	6260	329	391/321
	Externas	86	43,1/18,6	86	9630	187	502/400
2	Total	118	39,1/17,8	118	9440	519	459/340
	Internas	36	27,7/16,1	36	6710	336	413/327
	Externas	82	44,1/18,2	82	10640	183	535/429

n: tamaño de la muestra; MOR_m = resistencia media a la flexión. MOR_k = resistencia característica a la flexión. MOE_m = módulo de elasticidad medio a la flexión. ρ_m = densidad media. ρ_k = densidad crítica.

Nota 1: Valores de MOR, MOE y ρ corregidos al contenido de humedad de referencia (12 %) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013). El MOR_k y la ρ_k fue determinado de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013).

Nota 2: Valores característicos para el MOR, MOE y densidad según la norma IRAM 9662-3, respectivamente: Clase 1: 18 N/mm^2 , 12000 N/mm^2 y 420 kg/m^3 ; Clase 2: 11 N/mm^2 , 7000 N/mm^2 y 390 kg/m^3 . Toda la madera que no pertenezca a ninguna de estas clases es considerada como rechazo y, por lo tanto, no apta para usos estructurales.

Es importante resaltar que, el 70 % de las piezas (168 de 230) ensayada mecánicamente correspondían a tablas (posición externa) y el 36 % de las probetas para densidad (370 de 1035) provenían de la posición radial relativa D (75,1-100 % del radio respecto a la médula).

Considerando solamente las muestras provenientes de sección externa, se logró la clase 1 para el MOR a la flexión, pero existió dificultad para lograr los valores característicos de MOE y densidad para la clase de calidad superior. A diferencia de los resultados obtenidos en el presente estudio, Ramos *et al.* (202) obtuvieron para tablas de *Pinus elliottii* de 37 y 39 años de edad, en la Provincia de Entre Ríos, resultados que satisfacen los requerimientos de la norma IRAM 9662-3 (9) para la resistencia a la flexión y la densidad dentro de cada clase, pero no así para el módulo de elasticidad. Por otra parte, Fank (24) para un estudio en vigas

de *Pinus taeda* y *P. elliottii* reportó valores característicos que cumplen con las exigencias de dicha norma para el MOR a la flexión y la densidad, en ambas clases, pero no para el MOE en la clase 1. A pesar de que los antecedentes que se presentan en la literatura, son para otras edades y especies, queda en evidencia que resulta un problema poder alcanzar los valores de MOE establecido por la norma IRAM 9662-3. La dificultad de clasificar por el MOE también fue observada en otras especies de pino de rápido crecimiento, como ser en *P. patula* procedente del sur de África, para el cual Dowse (201) obtuvo una muy baja rigidez, que no alcanzaba a la establecida por la norma africana SANS 10163-1 (203) para el uso de madera estructural. También Wessels *et al.* (161), en parcelas experimentales de Sudáfrica para pino híbrido F₁ (PEE × PCH) de 9 y 11 años, indicaron que la madera arrojó propiedades adecuadas de resistencia a la flexión (MOR), pero la rigidez media (MOE) fue significativamente más baja que el valor requerido para madera de grado estructural según la norma africana SANS 10163-1 (204).

Sin embargo, estos valores de densidad y propiedades mecánicas podrían ser mejoradas con la adopción de prácticas orientados a optimizar las condiciones del material para su uso estructural, como raleos y podas planificados, y, extensión del turno de corta.

El material evaluado en este estudio se adquirió del rollizo basal (con poda). En trozas superiores, las propiedades podrían ser afectadas en mayor medida por la presencia de nudos, médula, resinas y coloración rosa. En evaluaciones futuras, sería apropiado considerar rollizos a distintas alturas en el fuste (hasta el diámetro mínimo aprovechable) y estudiar árboles provenientes de plantaciones con distintos manejos silvícolas y sitios.

4.6 Caracterización microscópicas de las traqueidas

4.6.1 Angulo microfibrilar, ancho, lumen, espesor y proporción de pared celular

En la Tabla 18 se presenta las medidas resúmenes para las características morfológicas de las traqueidas a los 4, 7, 10 y 11 años de edad para los 150 árboles muestreados (en el Anexo 13. Figura 1, se presentan los gráficos de dispersión de todos los datos de las mediciones de los caracteres anatómicos evaluados). El AMF marcó una disminución importante con la edad, el ancho se mantuvo prácticamente constante, el lumen presentó una merma, el espesor y la proporción de pared celular mostraron una tendencia creciente con la edad. El coeficiente de variación para los caracteres anatómicos promedios por árbol variación entre 8,4 y 21,8 %. En general, con una tendencia a una mayor homogeneidad con edad, representadas mediante un menor coeficiente de variación.

Tabla 18: Características microscópicas promedio a los 4, 7, 10 y 11 años de edad para los 150 árboles muestreados.

Variable	n	Media	Mínimo	Máximo	Coefficiente de Variación
AMF4 (°)	150	37,2	27,9	45,8	11,4
AMF7 (°)	150	31,2	22,2	43,8	13,4
AMF10 (°)	150	26,4	19,2	40,4	14,6
AMF11 (°)	150	19,7	14,6	28,9	13,2
An4 (µm)	150	43,3	31,3	65,0	12,5
An7 (µm)	150	42,4	33,6	54,7	11,3
An10 (µm)	150	41,3	31,7	54,2	11,0
An11 (µm)	150	39,5	30,3	51,0	8,4
Lu4 (µm)	150	32,3	21,6	56,6	17,2
Lu7 (µm)	150	28,1	18,0	42,1	15,2
Lu10 (µm)	150	25,7	15,1	41,1	15,5
Lu11 (µm)	150	21,9	14,2	32,6	13,9
EP4 (µm)	150	5,5	3,4	9,6	18,9
EP7 (µm)	150	7,1	4,1	11,0	19,7
EP10 (µm)	150	7,8	4,5	12,4	21,8
EP11 (µm)	150	8,8	6,5	11,5	11,7
PP4 (%)	150	26,1	13,7	44,1	20,0
PP7 (%)	150	34,0	20,7	55,1	17,3
PP10 (%)	150	38,1	23,9	62,1	17,9
PP11 (%)	150	45,0	29,0	60,1	10,6

AMF, An, Lu, EP, PP: ángulo microfibrilar, ancho y lumen de traqueidas, espesor y proporción de pared celular a los 4, 7, 10 y 11 años de edad, respectivamente; n: cantidad de árboles.

Variación de ángulo microfibrilar entre familias para cada sitio y edad

A los 4 años de edad (anillo 4), se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre familias para el AMF en los sitios estudiados (valor- $p \leq 0,022$). Los valores medios de AMF registrados para el sitio 2 fueron menores en un 7,1% respecto al sitio 1. Los mayores valores de AMF encontrados para el sitio 1 podrían ser atribuidos a una alta velocidad de crecimiento inicial propiciado por una disponibilidad privilegiada de recursos minerales asociados al uso anterior de la tierra. Para el sitio 1 las familias con menores valores de AMF fueron la 02, 03, 04, 05, 06 y 07, arrojando un valor medio de 36,5° (Figura 51a). Por otra parte, para el sitio 2, presentaron menores valores de AMF las familias 01, 02, 03, 04, 05, 07, con una media de 32,9° (Figura 51b). Estas familias pertenecen a la posición 1 y 2 del ranking genético de

crecimiento, indicando que, al seleccionar por crecimiento, indirectamente se estaría eligiendo los ejemplares con mejor desempeño en cuanto al AMF.

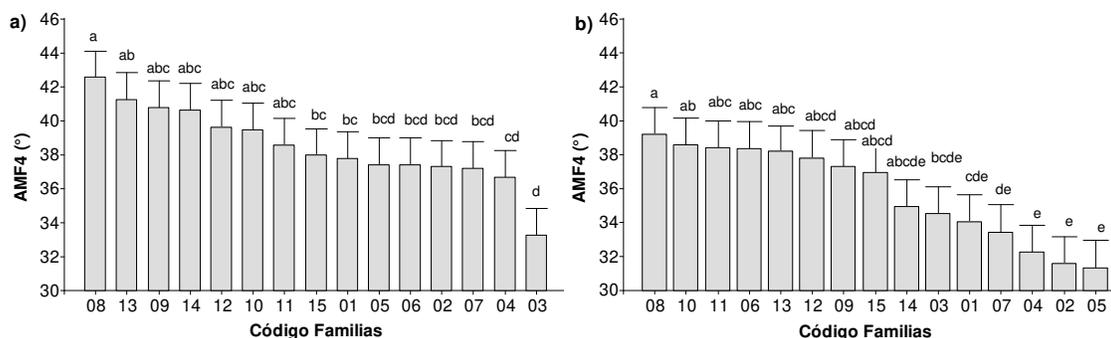


Figura 51: AMF4 a los 4 años para (a) el sitio 1 y (b) el sitio 2.

A los 7 años de edad (anillo 7), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para el AMF entre las familias del sitio 1 (valor-p=0,111) (Anexo 14. Tabla 1), mientras que sí fueron detectadas para el sitio 2 (valor-p=0,012). Los valores medios de AMF para el sitio 1 y 2 fueron de 32,8° y 29,5°, respectivamente. Para el sitio 2 los menores valores de AMF ocurrieron para las familias 01, 03, 04, 05, 07, 08 y 14 (Anexo 14. Tabla 2), alcanzando en estas un promedio de 28,1°. Se identificaron 4 familias (03, 04, 05 y 07), con menores valores medios de AMF a los 4 y 7 años de edad.

A los 10 años de edad (anillo 10), no se detectaron diferencias estadísticamente significativas para el AMF entre familias dentro del sitio 1 (valores-p=0,485) y 2, (valores-p=0,179) (Anexo 14. Tabla 3 y 4). Sin embargo, se mantuvo la tendencia de un menor valor de AMF para el sitio 2 (25,5°) respecto del sitio 1 (27,1°).

En el Anexo 8. Tabla 4, se presenta una estadística descriptiva del ángulo microfibrilar del leño tardío a los 11 años de edad (AMF11) para las 15 familias evaluadas y para el sitio 1 y 2. A los 11 años de edad (anillo 11) se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas para el AMF entre familias en ambos sitios (valores-p 0,0191 para sitio 1 y valores-p=0,046 para el sitio 2). Los valores medios para el sitio 1 y 2 fueron de 18,9° y 20,4°, respectivamente. Los menores valores medios de AMF, en el sitio 1 incluyó a las familias 01, 02, 03, 04, 05, 07 y 09 (Figura 52a). Mientras que para el sitio 2, estuvieron las familias 02, 03, 04, 07, 08, 09 y 14 (Figura 52b). Se identificaron 5 familias con menores valores AMF que son comunes a ambos sitios: 02, 03, 04, 07 y 09.

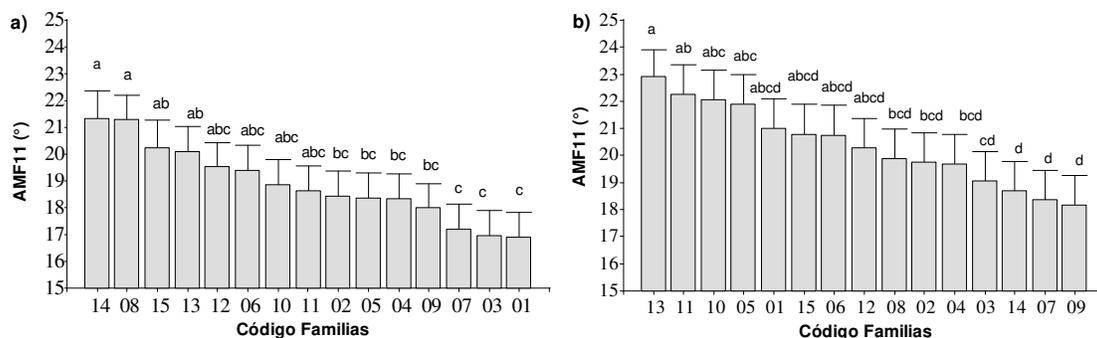


Figura 52: AMF11 a los 11 años para (a) el sitio 1 y (b) el sitio 2.

Variación de ángulo microfibrilar del material híbrido para cada sitio y edad

Para esta sección del análisis se consideró a todas las familias como un único material genético. Para las edades evaluadas, los valores medios de AMF variaron aproximadamente en 20° y 15° para el sitio 1 y 2, respectivamente. Entre los 4 y 11 años de edad los valores de AMF variaron entre 38,5° y 18,9° para el sitio 1 y entre 35,8° y 20,4° para el sitio 2, siendo estas diferencias significativas (valores- $p \leq 0,0001$). En la Tabla 19 se presenta la comparación de medias del AMF para ambos sitios según la edad.

Tabla 19: Comparación de medias del AMF por edades para los sitios 1 y 2.

Sitio	Edad (años)	Media AMF (°)	
1	04	38,5	a
	07	32,8	b
	10	27,2	c
	11	18,9	d
2	04	35,8	a
	07	29,6	b
	10	25,6	c
	11	20,4	d

Medias con letras distintas son significativamente diferentes (valor- $p \leq 0,05$) para el test de DGC.

En ambos sitios existió una disminución del AMF con la edad, con un descenso marcado entre los 10 y 11 años. Mientras que, entre los 4 y 10 años la reducción fue gradual. Valores similares de AMF fueron reportados por Wu *et al.* (72) para este mismo híbrido australiano, F₁ PEE × PCH a los 11 años de edad. Estos autores observaron una estabilización en el valor del AMF a partir de los 8 años de edad. Por otro lado, Bendtsen y Senft (231) determinaron para *Pinus taeda* valores similares (madera juvenil: 31,1° y madura: 18,9°).

Asimismo, Harding *et al.* (85), reportaron para los 11 mejores clones australianos F₁ de pino híbrido PEE × PCH a los 5 años de edad, valores ponderados de AMF obtenidos con Silviscan de 19,8°, 25,4° y 29,1° mínimos, medios y máximos, respectivamente. Por su parte, Long *et al.* (75) indicaron que, a partir de los 10 años el valor de AMF se aproxima a los 10°, proporcionando madera más estable y homogénea en sus propiedades mecánicas. Sugiriendo, que a partir de los 11 años se obtendría un leño más estable dimensionalmente y con propiedades estructurales sustancialmente mejoradas. Asimismo, Long *et al.* (75), mencionan que en varios trabajos teóricos y experimentales se ha demostrado que el módulo de elasticidad de la madera y la resistencia de las fibras se mantienen constantes para valores bajos de AMF (5°-10°), y que en maderas con AMF de 40°, su resistencia en la dirección longitudinal es reducida a un tercio (1/3) y su rigidez a un quinto (1/5) de su valor, respecto a las maderas que presenten valores entre 0° a 10° de AMF.

En este estudio fue notable el efecto del sitio sobre el AMF. Contrariamente, Donaldson (61) no detectó efecto del sitio sobre el AMF en el material examinado de *Pinus radiata*, pero sí de la edad fisiológica; remarcando que el envejecimiento fisiológico produjo una disminución significativa en los valores de AMF en la madera juvenil. Por su parte, para *Pinus taeda*, Bendtsen y Senft (231) determinaron valores de 31,1° en madera juvenil y 18,9° en madera madura. También para *Pinus taeda*, Groom *et al.* (232) establecieron un valor promedio de AMF de 15,4°, con valores de 26,8° y 6,1° en los anillos de crecimiento 5 y 48, respectivamente. En el Anexo 15, Figura 1a y Figura 1b se puede observar la variación del AMF por familias a los 4, 7, 10 y 11 años de edad para el sitio 1 y 2. Se observó que, a los 11 años, además de menores valores de AMF, los mismos fueron más uniformes que a edades más tempranas, verificado por los menores desvíos respecto al valor medio de cada familia, lo que estaría indicando una estabilización en las características del leño (Anexo 15. Figura 1) y posiblemente con presencia de madera con mejores rasgos para usos sólidos, con un mayor valor de densidad, rigidez y resistencia. Las familias 01, 03, 04 y 07, independientemente del sitio y de la edad evaluada, arrojaron menores valores de AMF (18). Estas familias pertenecen a la posición 1 y 2 del ranking genético de crecimiento, sugiriendo la factibilidad de realizar la selección en base al crecimiento volumétrico, sin afectar negativamente las características relacionadas a la calidad estructural.

Por otro lado, como el AMF es considerado como una característica importante de selección en maderas para usos sólidos. Es trascendental destacar que los valores de correlación entre las mediciones de AMF realizadas a distintas edades fueron altas y significativas (Tabla 20), indicando la factibilidad de que la selección a edades tempranas aseguraría la elección de los

árboles de mejores características para fines estructurales, permitiendo acortar los ciclos de mejora.

Tabla 20: Correlaciones de Pearson para AMF de las 15 familias.

	AMF4	AMF7	AMF10	AMF11
AMF4	1	0,75**	0,52*	0,59**
AMF7		1	0,45 ^{ns}	0,73**
AMF10			1	0,73**
AMF11				1

AMF4, AMF7, AMF10 y AMF11: ángulo microfibrilar a los 4, 7, 10 y 11 años respectivamente.

**Correlaciones significativas (valor- $p \leq 0,01$), *Correlaciones significativas (valor- $p \leq 0,05$), ns: no significativa (valor- $p > 0,05$).

Variación del ancho y lumen de traqueidas entre familias para cada sitio y edad

No se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas para el ancho de traqueidas entre las familias dentro de cada edad evaluada (4, 7, 10 y 11 años) y entre sitios, (valores- $p \geq 0,063$). El valor medio de ancho de traqueidas del leño tardío, considerando a todas las familias de ambos sitios, fueron de 43,32 μm , 42,33 μm , 41,30 μm y 39,52 μm , para las edades de 4, 7, 10 y 11 años, respectivamente, (con valores mínimos y máximos de 30,3 μm y máximos de 65,0 μm , respectivamente. La reducción del valor medio de ancho de traqueidas fue más marcada entre los 10 y 11 años. Respecto al ancho de lumen celular, no hubo variaciones significativas entre familias para el lumen de traqueidas para las edades y sitios considerados (valores- $p \geq 0,107$). Los valores promedios para el lumen de traqueidas en ambos sitios oscilaron entre 32,24 μm , 28,10 μm , 25,72 μm y 21,90 μm para los 4 años, 7, 10 y 11 años, respectivamente. Los valores medios de ancho y lumen de traqueidas a los 11 años de edad concuerdan con el rango de valores para el híbrido F₁ determinados por Nuñez (233) y por Wu *et al.* (72) para esta misma edad.

Variación del espesor y proporción de pared celular entre familias para cada sitio y edad

Para la mayoría de las edades, no se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre familias para el espesor y proporción de pared celular en los sitios para las edades consideradas (valores- $p \geq 0,103$), salvo para el espesor de pared en sitio 2 a los 10 años (valor- $p = 0,036$) y para la proporción de pared celular en sitio 1 a los 7 (valor- $p = 0,041$) y 10 (valor- $p = 0,005$) años de edad. De todas maneras, el sitio 2 presentó mayores valores medios de espesor de pared en las edades 4, 7 y 10, excepto a los 11 años.

El espesor y la proporción de pared aumentaron con la edad. Este comportamiento fue más notorio entre los 10 y 11 años para ambas variables. Los valores medios de espesor de pared

del leño tardío estuvieron entre 5,5 μm a los 4 años y 8,8 μm a los 11 años de edad, con valor mínimo y máximo de 3,4 μm y 12,4 μm , respectivamente. No obstante, estos valores podrían variar, si las mediciones se realizan sobre cortes obtenidos con micrótopo, debido a que en las fibras disociadas pueden sufrir un aplastamiento como consecuencia de la técnica utilizada. Por otra parte, los valores medios de proporción de pared celular permanecieron entre el 26,1% y 45,0 %, a los 4 y 11 años, respectivamente. La proporción de pared a los 11 años fue similar en ambos sitios. La tendencia encontrada para estas variables es inversa a la del AMF, esto podría indicar la posibilidad de contar con madera de calidad estructural más homogénea, ya que también en el sitio 2 se registraron menores valores medios de AMF y mayores valores medios de espesor y proporción de pared de celular. No se encontraron antecedentes para el espesor y proporción de pared celular para el pino híbrido F₁ (PEE \times PCH) cultivado en otros lugares. Sin embargo, para leño adulto del parental masculino (PCH) Boschiero (234) reportó valores entre 14,2 μm y 26,5 μm para espesor de pared celular. Por otro lado, para *Pinus taeda* de 16 años de edad, Winck *et al.* (235) reportaron valores similares de espesor de pared celular (8,1 μm).

Se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas para el ancho de traqueidas, lumen, espesor de pared y proporción de pared celular entre edades del árbol (valor- $p \leq 0,00$), (integrando a todas las familias de ambos sitios a nivel de taxón).

En la Figura 53 se puede observar la variación por sitio para el ancho de traqueidas, lumen, espesor y proporción de pared celular y AMF según edad evaluada. En dicha figura se puede observar una disminución marcada (pendiente más pronunciada) del AMF, ancho y lumen y el aumento del espesor y proporción de pared entre los 10 y 11 años. Esto podría estar indicando una estabilización en las características del leño, por lo tanto con rasgos más deseables para usos sólidos (mayor densidad, rigidez y resistencia) (75,77,83,215).

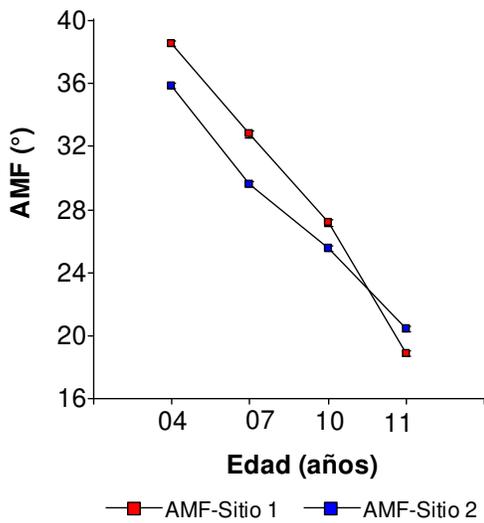
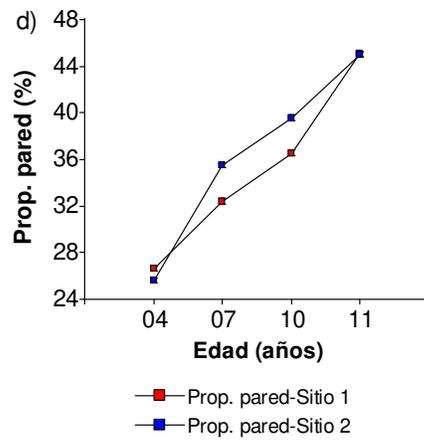
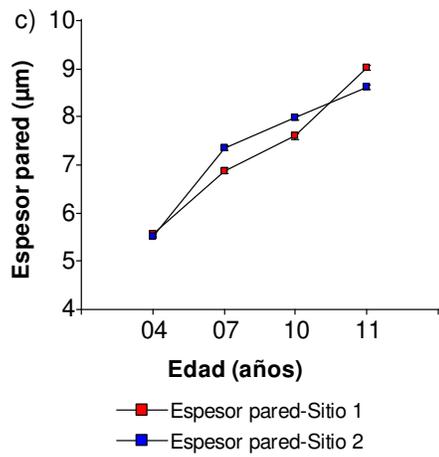
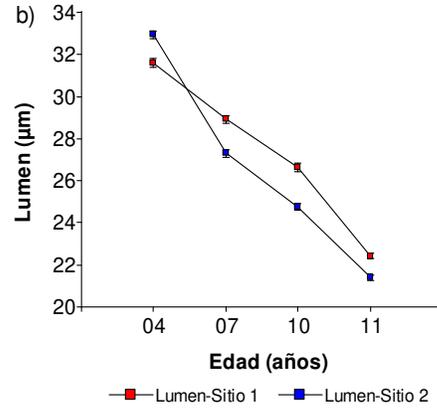
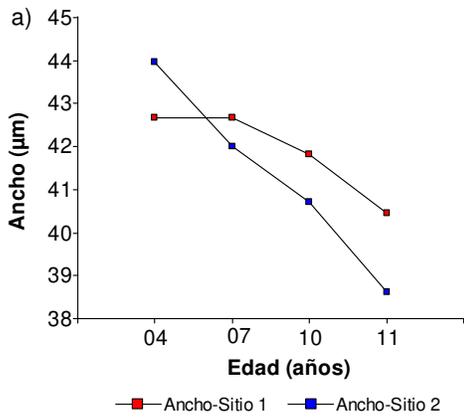


Figura 53: Variación media del ancho, lumen, espesor y proporción de pared celular y ángulo microfibrilar por sitios y edades.

A través del análisis de conglomerado se pudieron observar 2 regiones bien demarcadas por los valores de AMF y ancho de traqueidas, indicando la formación de madera madura a partir de los 10 años de edad (Anexo 16. Figura 1a y 1b). Sin embargo, con el dendrograma para el lumen y espesor de pared celular, el límite ocurre a los 7 años de edad (Anexo 16. Figura 1c y 1d).

La edad de demarcación entre madera juvenil y madura no es la misma para cada propiedad, sino que varía según la característica que se considere, coincidiendo con Larson *et al.* (82), Nawrot *et al.* (236) y Wang *et al.* (237). Para las familias de pino híbrido F₁ INTA-PINDO utilizadas este estudio, la edad de transición varía entre los 7 y 10 años, según la variable considerada. No obstante, este rango de edades para la transición entre madera juvenil y madura es muy similar al registrado para uno de los parentales de este taxón. Por ejemplo, Sackser *et al.* (218) en base a la densidad básica de la madera, determinaron que para *Pinus elliotii*, se encuentra entre los 7 y 9 años de edad. Para pino híbrido F₁ (PEE × PCH) desarrollado en Australia, Bailleres *et al.* (7) determinaron en base al módulo de elasticidad dinámico que la edad de transición ocurre entre los 5 y 10 años.

Las propiedades de la madera juvenil difieren de las del resto del árbol, con cualidades mecánicas inferiores respecto a la madera madura (83). Aunque Zobel y Van Buijtenen (70) sostiene que el leño juvenil en las especies de coníferas no es de mala calidad, sino simplemente diferente. Por lo tanto, se debe adaptar al destino final para que pueda cumplir con los requisitos relacionados al uso y la satisfacción de las necesidades de los consumidores. Zobel y Van Buijtenen (70) indica que la madera juvenil en algunas ramas de la industria (particularmente en la industria de la pulpa y el papel) alcanza propiedades de rendimiento igual o superior al de la madera madura. Consecuentemente, no puede tratarse como un producto de bajo valor, sino más bien es necesario buscar nuevas alternativas para su procesamiento y utilización más racional. También Nawrot *et al.* (236) indica que la presencia de madera juvenil no puede ser eliminada, debido a que es producto del proceso de crecimiento y desarrollo de los árboles, y que solo se puede reducir su proporción dentro de ciertos límites, utilizando medidas silvícolas apropiadas (82,83).

Se puede destacar que, las familias identificadas como las mejores con el equipo *TreeSonic*, por arrojar mayor valor de velocidad acústica, también se destacaron por presentar menor valor de AMF, con asociación negativa y altamente significativa (V y AMF_{medio} $r=-0,45^{**}$). Marcando una fuerte relación entre el AMF y la velocidad acústica. Wang *et al.* (30) reportaron un coeficiente de determinación (R^2) valor de 0,855 entre la V y el AMF en *P. radiata* y Evans e Ilic (46) un valor de R^2 de 0,86 para una especie de latifoliadas (*Eucalyptus delegatensis*).

Este resultado era esperable y a su vez coincidente con hallazgos de Hasegawa *et al.* (115) y Buccur (157), quienes han señalado que una disminución en el AMF resultaría en un aumento de la velocidad porque las ondas sonoras viajan a través del eje de la celulosa a lo largo de las traqueidas con menor inclinación respecto al eje. Este comportamiento se explica debido a que, un menor valor de AMF respecto al eje de las traqueidas, indica una menor separación entre las fibrilas elementales con menos espacios porosos, propiciando un camino continuo y favoreciendo que el desplazamiento del sonido ocurra de manera más eficiente.

Por otra parte, la V mostró una correlación significativa y positiva con el espesor de pared celular ($r=0,31^{**}$). Por ello, la velocidad acústica es de utilidad para proporcionar estimaciones indirectas del AMF y del espesor de pared celular, parámetros difíciles de obtener (98,157), considerándose herramientas de buen soporte a nivel molecular (7).

Por otro lado, Dungey *et al.* (43) manifestaron que para maximizar la ganancia genética de la rigidez, sería más efectivo realizar la selección indirecta (a través del AMF y densidad) a edades tempranas. Indicaron para la rigidez heredabilidad alta en madera interna y moderada para madera externa. Esto remarca la importancia de identificar los mejores materiales genéticos para usos sólidos a través de la velocidad acústica a una edad precoz.

Luego de análisis de las distintas variables (anatómicas, físicas y mecánicas) a distintos niveles, árbol, rollizo, tablas aserradas en dimensiones comerciales y probetas pequeñas estandarizadas, se pudo constatar:

1) Diferencias estadísticamente significativas entre sitios para las variables velocidad acústica a los 10 años (V10), densidad obtenida con el equipo Metriguard® (DensMet) y módulos de elasticidad dinámicos medidos en piezas aserradas secas de dimensiones comerciales (MOEv, MOEr, MOEi), para los distintos tipos de densidades: básica (DB), anhidra (DA) y estacionada (DE) obtenidas a partir de probetas pequeñas libres de nudos y para el ángulo microfibrilar obtenidos a distintas edades (AMF4, AMF7, AMF10 y AMF11). La madera proveniente del sitio 2 mostró características más deseables que determinan su aptitud para estructuras (Mayor, V10, MOEv, MOEr, MOEi, DensMet, DB, DA, DE y menor AMF4, AMF7 y AMF11) como así también más homogéneas con menor variación en el sentido radial y axial de la densidad y menor variación del ángulo microfibrilar a 1,30 m de altura de fuste en las edades de 4 a 11 años. Con las demás variables estudiadas (velocidad acústica a los 11 años (V11), módulo de elasticidad dinámico para árboles en pie a los 10 y 11 años (MOEd10 y MOEd11), módulo de elasticidad (MOEe) y módulo de rotura (MOR) a la flexión estática y a nivel anatómico, espesor y proporción de pared celular, también se mantuvo la

tendencia de mayores valores (aunque sin diferencias significativas) para el sitio 2. Debido a la cercanía de los sitios y por corresponder a la misma clasificación de suelos y pertenecer a la misma región climática, se deduce que estas diferencias pueden deberse a los siguientes factores: **a) distribución de diámetros de los árboles**. El diámetro promedio a la altura de pecho para el 50 % de los árboles del sitio 1 superaron al sitio 2, entre 1,4 cm y 2,9 cm. Si bien entre sitios la diferencia en diámetros no fue significativa esto pudo influir en las propiedades de la madera. Para el sitio 1, el valor medio de dap fue de 27,8 cm, con rango entre 17 y 40,1 cm, con el 50 %, 25 % y 10 % de los árboles con dap mayores a 28, 31,2 y 37,6 cm, respectivamente. En sitio 2 arrojó un dap medio de 27 cm, con valores entre 17,2 y 39,8 cm, con el 50 %, 25 % y 10 % de los árboles con dap mayores a 26,3, 29,8 y 34,7 cm, respectivamente. c) Otra causa de la variación de las propiedades entre sitios, podría ser explicada por la **competencia debido a la cantidad desigual de familias establecidas en cada ensayo**. En el sitio 1 consistía de 37 familias y el sitio 2 de 66 familias. c) El tercer factor puede deberse al **uso de la tierra previo a la instalación del ensayo**. El sitio 1 correspondía a monte nativo y el sitio 2, tercera rotación de pinar. Las mejores condiciones físicas y de fertilidad del suelo del ensayo 1 (sitio 1), pudo haber contribuido a un crecimiento más acelerado en edades tempranas. En el sitio 2, debido a las reiteradas rotaciones con un mismo cultivo, el contenido de nutrientes en el suelo pudo verse disminuido. Según lo expresado Bailleres *et al.* (7) las rotaciones repetidas modifican la microestructura del suelo afectando a las propiedades de la madera. Por otro lado, según lo expresado por Martiarena *et al.* (238), la exportación de nutrientes producto de la cosecha y preparación del terreno para el establecimiento de la nueva plantación pueden afectar el contenido de fósforo disponible (P) y potasio (K) en el suelo. También, Goya *et al.* (239) señalaron que para los suelos de la provincia Misiones, el elemento más crítico es el fósforo, provocando una disminución del crecimiento de la plantación, por su baja disponibilidad en el suelo. Además, Legg y Bradley (35) y Watt *et al.* (62), indicaron que características específicas del sitio, cómo la temperatura media del aire, precipitaciones y componentes químicos del suelo (por ejemplo, el fósforo total) provocan variaciones en densidad y rigidez de la madera. A su vez, estudios realizados por Watt *et al.* (62,91) para *Pinus taeda* mencionan que el fósforo total, el boro y la relación C:N (carbono: nitrógeno) influyen en las propiedades de la madera. Del mismo modo, Bailleres *et al.* (7), de seis factores evaluados, indicaron en orden de importancia, como los más influyentes en el módulo de elasticidad de la madera de pino híbrido F₁ (PEE × PCH) cultivado en Australia, disponibilidad de agua, **uso anterior de la tierra** y tratamientos silvícolas.

2) Diferencias estadísticamente significativas entre familias para la velocidad acústica a los 10 y 11 años de edad (V10 y V11), para el módulo dinámico de árboles en pie a los 10 y 11 años (MOEd10 y MOEd11) y para el ángulo microfibrilar determinado a distintas edades

(AMF4, AMF7 y AMF11). En este sentido las familias identificadas a través de estas variables pertenecen al ranking 1 (R1: superior) y 2 de crecimiento (R2: medio). Las familias 01, 02, 03, 04 y 05 del R1 y la 07 del R2, presentaron mayores valores de V10, V11, MOEd10, MOEd11 y, menores valores medios de AMF4, AMF7 y AMF11, indicando un mejor potencial para la producción de madera con características más adecuadas para usos sólidos.

Los resultados determinados con el *TreeSonic* para árboles en pie, señalan la posibilidad de efectuar una selección indirecta (velocidad acústica) de ejemplares con mayores crecimientos y con características más compatibles con madera para usos sólidos (mayor MOE y densidad y menor AMF).

3) Diferencias estadísticamente significativas según la posición de muestra en la sección transversal del rollizo.

Los valores de la densidad (básica, anhidra y estacionada), área del anillo del crecimiento, el módulo de elasticidad dinámico (determinado por vibración, resonancia e impacto), el módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática, el espesor y proporción de pared celular aumentaron significativamente de la médula a la corteza. Mientras que el AMF disminuyó significativamente entre los 4 y 10 años de edad. La variación radial de propiedades de la madera está de acuerdo a la tendencia expresada por otros autores para el género *Pinus* (7,59,60,206,222,231,240,241) y también para otras especies (210,211). Pero el hallazgo de esta investigación respecto a la madera interna y externa, fue detectar la dificultad de las técnicas no destructivas para evaluación de la madera interna, con presencia de resinas. El módulo de elasticidad determinado por resonancia para las piezas internas que contenían resinas, fue mayor que el MOE de tablas internas sin resinas y de tablas externas, indicando que no sería adecuada la utilización del método por resonancia para evaluar la rigidez de la madera en piezas con estas particularidades. La presencia de resina distorsiona los valores reales de módulo de elasticidad y rotura (aumentan), provocando otros efectos no deseados. Como indica Coronel (68) la madera con resinas se torna más quebradizas ante pequeños cambios en el contenido de humedad. El módulo de elasticidad dinámico de la madera aserrada y seca, determinado a través de las técnicas acústicas (resonancia, vibración y, en menor medida, por impacto) para la madera interna, no resultaron buenos estimadores del módulo de elasticidad estático. Sí demostraron ser muy precisos para la predecir del módulo de elasticidad de la madera externa.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

La caracterización de las propiedades, anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de pino híbrido F₁ INTA-PINDO permitió conocer la variabilidad entre materiales genéticos y sitios. Este conocimiento, facilitó el desarrollo de modelos predictivos del módulo de elasticidad estático a partir del módulo de elasticidad dinámicos obtenidos con 3 técnicas no destructivas. Identificándose 5 familias, a través de la técnica acústica, con mayor potencial respecto a las características estructurales. Estas familias, a su vez, servirán de base para la selección y mejoramiento genético de este taxón en vista de la producción de madera de calidad para usos sólidos.

5.1 Conclusiones sobre mediciones de árboles en pie

El uso del *TreeSonic* permitió la caracterización eficiente de los árboles en pie. Proporcionó información de las variaciones en las propiedades de la madera debido al sitio y al material genético. A través de esta técnica acústica, se identificaron 5 familias (F19, F20, F28, F29 y F4) pertenecientes a la posición 1 y 2 del ranking de crecimiento, con características más adecuadas para usos estructurales. Con mayores valores de velocidad acústica y módulo de elasticidad dinámico de árboles en pie a los 10 y 11 años. Esto indica que sería factible realizar la selección por crecimiento y calidad de madera simultáneamente.

Con la medición del tiempo de vuelo sobre árboles en pie empleando *TreeSonic*, fue posible predecir a edades tempranas las propiedades tecnológicas, que definen la mayor aptitud de la madera de algunas familias de pino híbrido F₁ INTA-PINDO para uso estructural.

5.2 Conclusiones sobre mediciones de características morfológicas

Los valores medios de ancho de lumen, ancho de traqueidas, espesor y proporción de pared celular fueron similares entre sitios y familias. Con un aumento significativo del espesor y proporción de pared celular con la edad.

Se detectaron diferencias significativas entre sitios y materiales genéticos para el ángulo microfibrilar evaluado a los 4, 7 y 11 años de edad. El sitio 2 arrojó un valor medio menor de ángulo microfibrilar y con mayor homogeneidad en el sentido radial.

La utilización de un método no destructivo de obtención de muestras (barrenos de Presler), permitió la evaluación a nivel anatómico de la madera de 15 familias de pino híbrido F₁ INTA-PINDO. Se identificaron a través del ángulo microfibrilar 5 familias (F19, F20, F28, F29 y F4) de mayor potencial en cuanto a su comportamiento físico-mecánico. Estas también fueron

identificadas como mejores para fines estructurales a través de la velocidad acústica a los 10 y 11 años.

Para las variables analizadas a nivel anatómico se observaron mayores variaciones entre los 10 y 11 años, respecto a los períodos de 4 a 10 años. Lo que estaría indicando un cambio en las propiedades físicas y mecánicas a partir de los 11 años de edad, debido a la presencia de madera madura.

Las familias (F19, F51, F20, F28, F29) de la posición R1 del ranking genético de crecimiento y la familia F4 de la posición R2 del ranking, presentaron características indicadoras de un mejor desempeño para uso estructural. Arrojaron mayores valores de velocidad acústica, densidad verde, módulo de elasticidad dinámico para árboles en pie y menores valores de ángulo microfibrilar. A su vez, con mayor crecimiento a través del tiempo.

5.3 Conclusiones sobre evaluación de las propiedades en rollizos

El método de resonancia permitió la obtención de un valor medio de la rigidez de las trozas. Aunque sin diferencias significativas entre sitios y familias.

5.4 Conclusiones sobre clasificación visual estructural de la madera aserrada

Los defectos más relevantes registrados en la madera de pino híbrido F₁ INTA-PINDO fueron la presencia de nudos, médula y resinas. Otros factores que influenciaron a la calidad estructural de la madera fueron la proporción de madera interna y orientación de los anillos de crecimiento (corte tangencial y semitangencial) en cara transversal de pieza y ancho de anillos.

El porcentaje de madera de clase 1 tipificada visualmente por las normas IRAM e SPIB fueron muy similares en ambos sitios.

Con ambas normas de clasificación se logró un porcentaje elevado de madera de calidad superior. Sin embargo, la clasificación visual no fue suficiente para lograr los grados estructurales según la clasificación mecánica. Esto podría deberse a dos cuestiones principales. Primero, que la clasificación visual por grado de resistencia se realizó posteriormente al ensayo destructivo de resistencia a la flexión, y la longitud original de la pieza (3,15 m) se encontraba reducida al 50 % aproximadamente de su dimensión original. Por lo tanto, la calidad visual estructural de la madera estaría siendo sobreestimado. En segundo lugar, podría estar relacionado a los elevados valores característicos de MOE, MOR y densidad establecidos en las normas de clasificación visual estructural. Esto indica que los

criterios de estas normas sobre la calidad de madera de la clase 1 principalmente, deberían ser revisados.

Se alcanzó un mayor volumen de madera de clase superior y menor volumen de rechazo con la clasificación visual con la norma SPIB, respecto a la norma IRAM.

Las familias F28 y F29 del ranking 1 de crecimiento, presentaron una mayor proporción de madera de grado de calidad superior según las normas IRAM e SPIB.

5.5 Conclusiones sobre las propiedades resistentes de la madera aserrada obtenidas con diferentes métodos no destructivos (vibración transversal, resonancia acústica y onda de impacto), y destructivos

Las distintas técnicas no destructivas y destructivas de evaluación de las propiedades tecnológicas resistentes de la madera aserrada arrojaron resultados consistentes.

Las tres técnicas acústicas no destructivas permitieron detectar diferencias significativas entre sitios, pero no entre familias. La madera aserrada (tablas y tirantes) del sitio 2 presentó mayores valores de densidad obtenida con el equipo no destructivo (Metriguard®) (DensMet), y valores superiores de módulo de elasticidad dinámico obtenido por vibración transversal (MOEv), resonancia (MOEr), e impacto (MOEi).

No se detectaron diferencias significativas entre sitios, ni a nivel familiar para los parámetros módulo de elasticidad estático (MOEe) y módulo de rotura (MOR) obtenido con el método destructivo, mediante máquina universal de ensayos.

Los valores medios de módulo de elasticidad estático obtenido con máquina universal de ensayo fueron superiores respecto al módulo de elasticidad dinámico obtenidos con las tres técnicas acústicas.

La madera aserrada proveniente del sitio 2 presentó propiedades más homogéneas (menor variación en los valores de densidad, módulo de rotura, módulo de elasticidad estático y dinámico) y con mejores características para usos estructurales.

Las distintas técnicas no destructivas estudiadas predijeron con exactitud la calidad de la madera externa. Para las piezas internas cualquiera de los métodos utilizados sobreestimó el módulo de elasticidad estático con un error porcentual elevado. Previo a la clasificación mecánica con cualquiera de los métodos no destructivos, debiera realizarse la clasificación

visual eliminando todas aquellas piezas con infiltraciones de resina y presencia de médula para mejorar las predicciones.

La madera externa presentó valores más elevados de propiedades físicas y mecánicas, de mejor calidad para uso estructural que la interior.

Las piezas internas con médula e infiltración de resinas afectaron negativamente los valores de módulo de elasticidad dinámico determinado por resonancia. en menor medida a los obtenidos vibración transversal y por impacto. Pero demostraron ser más precisos para la estimación del módulo de elasticidad de la madera externa con características estructurales superiores.

Los resultados corroboran la aptitud superior de los métodos no destructivos para la evaluación de piezas de escuadrías comerciales de la posición externa de la madera.

El trabajo aporta datos que permiten esclarecer el comportamiento de la madera y la variación de las propiedades en función de la distancia a la médula, tipo de corte de la pieza (tangencial o semitangencial o radial), cantidad de anillos presentes en la pieza y presencia de nudos.

Los resultados mostraron que la técnica no destructiva de vibración transversal puede ser utilizada con éxito como parte de un sistema automatizado de clasificación de la madera estructural.

El equipo Metriguard® resultó efectivo para determinar el módulo de elasticidad dinámico por vibración transversal y la densidad estacionada de la madera aserrada en sus dimensiones originales. Fue también un buen predictor de la densidad de la madera libre de nudos.

El valor promedio de la resistencia (MOR) de la madera externa se ajusta apropiadamente a los valores de referencia especificado por la norma IRAM para las clases 1 y 2 de resistencia.

El valor medio del módulo de elasticidad estático (MOEe) de la madera externa alcanzó fácilmente la clase 2 adoptada por la norma IRAM. El valor de referencia de rigidez para la clase 1 según esta norma es muy superior en relación al valor registrado para el pino híbrido F₁ INTA-PINDO. La minoría de piezas (11% del volumen) alcanzaron la clase 1 para este parámetro.

La madera evaluada presentó dificultades para alcanzar los valores característicos de módulo de elasticidad (12 GPa o 12.000 N/mm²) para clasificar como clase 1 (calidad superior). Es posible que este inconveniente se deba a un problema de diseño de las normas y no al taxón de pino híbrido F₁ INTA-PINDO. Debido a que este comportamiento fue observado para otras especies de pinos resinosos (*Pinus elliottii* y *P. taeda*) de edades superiores al de este Taxón. Donde se indicó que la presencia de madera de primera calidad (clase 1) fue prácticamente nula para el parámetro módulo de elasticidad actualmente definido por la norma IRAM. Tal vez sería conveniente realizar un ajuste sobre el nivel de exigencia para el módulo de elasticidad de la clase 1 estipulado en las normas argentinas.

La clasificación visual previa no fue suficiente para asegurar el grado de resistencia mecánica para componentes estructurales. La proporción de madera del grado superior determinado con máquina universal resultó muy baja.

Para las tablas de corte tangencial, el módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática fue mayor respecto a las piezas de corte semitangencial y de la posición interna. El módulo de rotura resultó más sensible a la orientación de los anillos de crecimiento que el módulo de elasticidad.

Las piezas con mayor cantidad de anillos (pero de menor ancho), alcanzaron mayores valores de módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática.

La madera libre de médula prácticamente duplicó a los valores de módulo de elasticidad y de rotura de la madera, respecto a la madera con médula. Afectando de manera más significativa a la resistencia.

Luego de completar los estudios de otras propiedades mecánicas del pino híbrido, más los conocimientos generados en el presente estudio, se podría contemplar la posibilidad de incorporar este taxón a las normas argentinas dentro del grupo de pinos resinosos.

La proporción de madera con mejores características estructurales podría ser mejorado con la aplicación de tratamientos silvícolas y con un turno de corta a mayor edad que la evaluada.

5.6 Conclusiones sobre las propiedades físicas, porcentaje de área coloreada, ancho y área de anillos de crecimiento

Se detectaron diferencias entre sitios para los valores medios de densidades, básica, anhidra y estacionada. Fueron mayores para el sitio 2, desde edades más tempranas y con un

comportamiento más homogéneo en el perfil de fuste (menor variación axial y radial). A nivel familiar los valores de densidades fueron similares.

El valor promedio de la densidad estacionada (al 12 % de humedad) de la madera externa (probetas pequeñas estandarizadas) se ajusta adecuadamente a los valores de referencia establecido por la norma IRAM para clase 2, mientras que presentó dificultades para alcanzar el valor para la clase 1.

Los valores de contracción volumétrica, coeficiente de anisotropía y coeficientes de retracción radial y tangencial fueron similares entre sitios y familias.

El coeficiente de anisotropía obtenido indicó que la madera de pino híbrido F₁ INTA-PINDO, a los 11 años de edad no es una madera estable. Por lo que podría originar dificultades en el proceso de extracción del agua de la madera en el transcurso del secado. Es necesario una selección adecuada del programa de secado y el uso de soportes (pesas sobre las pilas de madera), que permita minimizar las deformaciones en las piezas.

Se obtuvieron diferencias significativas entre familias y alturas de fuste para el ancho y área de anillos de crecimiento, y porcentaje de área coloreada. Contrariamente, los sitios no tuvieron un efecto significativo sobre dichos caracteres.

La familia F51 presentó el mayor ancho y área promedio de anillos de crecimiento, seguida por las familias F19, F20, F28, F29 y F4. Las familias F19 y F20 arrojaron un mayor porcentaje de área coloreada. Estas pertenecen a la posición 1 y 2 del ranking genético de crecimiento.

Las familias de la posición 1 del ranking genético de crecimiento presentaron mayor ancho de anillos al año 1 y mantuvieron su superioridad a lo largo del tiempo.

El porcentaje de área coloreada de la sección interna de la rodaja aumentó en con la altura del árbol (sentido axial).

5.7 Conclusiones sobre relaciones entre métodos de medición y diferentes variables estudiadas

La eficiencia del método basado en la frecuencia fundamental de vibración transversal para determinar el módulo de elasticidad fue comprobada para el taxón estudiado. Se confirmó que existió una correlación fuerte y significativa de esta característica con los valores obtenidos a través del ensayo a la flexión estática.

Las técnicas de medición por resonancia mediante FFT de Fakopp® (Tablet) y vibración transversal (Metriguard®) arrojaron valores de módulos similares entre sí, y menores en comparación a los obtenidos por el método de impacto (TOF) (*TreeSonic* de Fakopp®) y máquina universal de ensayos.

El *TreeSonic* de Fakopp® mostró un valor de coeficiente de correlación más alto con el módulo de elasticidad estático en comparación con el Metriguard® y el clasificador por resonancia mediante FFT de Fakopp® (Tablet).

Las técnicas acústicas probadas fueron buenos predictores del módulo de elasticidad estático y permitieron la obtención de resultados consistentes comparados con los de máquina universal de ensayos.

Las técnicas no destructivas empleadas en este estudio resultaron ser estimadores eficientes del módulo de elasticidad y de la densidad de la madera. Sin embargo, los equipos fueron predictores menos precisos del módulo de rotura y de la densidad en comparación con el módulo de elasticidad.

5.8 Conclusiones generales

La madera proveniente del sitio 2, a partir de diferentes variables evidenció mejores propiedades para uso estructural.

La madera de pino híbrido F₁ INTA-PINDO presentó un comportamiento físico-mecánico semejante a otras especies del género *Pinus* implantadas en la región. Por lo tanto, los usos podrían ser equivalentes. Con la diferencia que este taxón se caracteriza por un mayor crecimiento, constituyendo este aspecto una ventaja competitiva respecto de otras especies.

Si bien, no se lograron diferencias estadísticamente significativas entre familias para todos los rasgos evaluados, sí se pudieron identificar contrastes relevantes entre materiales genéticos para la velocidad acústica y módulo de elasticidad para árboles en pie a los 10 y 11 años y para el ángulo microfibrilar a 4 edades evaluadas. Estas diferencias pueden servir de base para que los mejoradores exploren con mayor profundidad en el marco de la estrategia de mejora que se propongan para el pino híbrido F₁ INTA-PINDO.

La madera aserrada de pino híbrido F₁ INTA-PINDO a los 11 años de edad alcanzó y superó los valores mínimos de densidad, módulo de rotura y módulo de elasticidad a la flexión estática

en piezas externas de escuadrías comerciales exigidos por las normas IRAM 9662-3, para formar parte de la clase 2 de resistencia.

Las familias pertenecientes a la posición R3 del ranking, debido principalmente a la velocidad de crecimiento, resultan menos atractivas para ser reproducidas y transferidas al sector productivo para la generación de plantaciones comerciales.

CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Se sugiere desechar del programa de mejora a las familias pertenecientes a la posición 3 del ranking genético de crecimiento, debido a su menor crecimiento respecto a la posición 1 del ranking.

La coloración rosa es una característica no deseada en la industria de la madera para fabricación de productos sólidos. Por esta razón, se recomienda no efectuar la propagación y difusión de las familias F19 y F20 para usos estructurales, debido al mayor porcentaje de área coloreada que presentaron. Debieran realizarse estudios más detallados sobre la coloración, abarcando todo el perfil del fuste. Tal vez estas familias podrían ser recomendadas para usos de baja exigencia a solicitaciones o cargas externas por su resistencia debilitada, pero con características favorables en cuanto a la durabilidad debido a que la resina puede actuar como un protector natural ante el ataque de agentes biológicos.

Para usos sólidos se podría recomendar la propagación de los materiales de mayor crecimiento en diámetro (F51, F28, F29 y F4 de las posiciones 1 y 2 del ranking genético), a lo largo del tiempo evaluado y menor diámetro de la zona coloreada.

Se recomienda realizar estudios sobre características anatómicas de la madera que influyen en la permeabilidad (tamaño y la frecuencia de los canales de resina radiales y axiales, los radios parenquimáticos, la cantidad y constitución del duramen). Esto es relevante debido a que los extractivos condicionan la permeabilidad (reducen el fenómeno de contracción e hinchamiento y la penetración de líquidos) y repercuten en su comportamiento frente a tratamientos con preservantes, en el secado, pulpado químico, encolado, acabado y durabilidad.

En los ensayos de pino híbrido F₁ INTA-PINDO que se encuentran aún en diferentes etapas de evaluación, se recomienda realizar estudios anatómicos más detallados y complementarios sobre una mayor cantidad de ejemplares para las familias F19, F20, F28, F29 y F4, que resultaron más prometedoras en cuanto sus características anatómicas para usos estructurales. Los mismos podrían incluir análisis de los perfiles de microdensidad de todos los anillos de crecimiento y sus relaciones con la morfometría celular.

Estudiar los caracteres relacionados a la calidad estructural de la madera, utilizando modelos genéticos que permitan identificar la varianza genética aditiva y de dominancia en estos caracteres, dado que esto influye en la estrategia de mejoramiento.

También, sería adecuado evaluar la permeabilidad de la madera y de la variación radial del contenido de resina para las distintas familias, dada la influencia de esta característica sobre la calidad de la madera ya sea estructural o para usos de apariencia.

De acuerdo a las variables analizadas a nivel anatómico, la edad de transición se produciría entre los anillos 7 y 10. Es por ello que se recomienda constatar este comportamiento, tomando barrenos de los árboles en pie de ambos ensayos para evaluar anualmente dichas características en los años consecutivos a la última edad evaluada (11 años).

Por otra parte, se recomienda utilizar madera externa y libre de médula y resinas, si se desean realizar las predicciones del módulo de elasticidad real a partir de técnicas no destructivas. Debido a la mayor exactitud en las mediciones en este tipo de piezas. Para optimizar el resultado a obtener se aconseja una clasificación visual previa a la tipificación mecánica por resistencia.

A futuro se recomienda evaluar la calidad estructural de los rollizos y tablas obtenidos en todo el perfil del fuste (hasta el diámetro mínimo aprovechable). No obstante, es necesario destacar que los rollizos de la parte inferior del árbol, (beneficiados por la práctica de poda), son de mayor diámetro y producen rendimientos más elevados para piezas de tamaño estructural.

La posibilidad de incorporación de una clasificación mecánica automatizada en la línea de aserrado permitiría evaluar parámetros no percibidos visualmente, con una evaluación más objetiva. Proporcionando una mayor precisión, optimización de la velocidad del proceso y garantizando una mayor homogeneidad en la rigidez. También se lograría independencia de la destreza de un operador, evitando los errores propios de la intervención del ser humano en las tareas de clasificación de la madera.

Debieran ampliarse los estudios relacionados a la estabilidad dimensional y evaluación del comportamiento en el secado, abarcando distintos tipos de deformaciones, debido a que el material evaluado se comportó como una madera no estable dimensionalmente.

Por otro lado, sería conveniente evaluar plantaciones de las familias más prometedoras, bajo diferentes manejos silvícolas, dado que los nudos interfieren en la velocidad acústica y, por lo tanto, en el módulo de elasticidad dinámico y estático.

Adicionalmente, sería de utilidad la realización de mayor cantidad de ensayos estáticos en diferentes escuadrías de tamaño estructural con muestras seleccionadas para cada clase de

resistencia. Incorporar estudios relacionados con la resistencia a la tracción y a la penetración de clavos.

La composición química (macro y micro nutrientes), la humedad y caracterización física del suelo debería ser incluida en futuras investigaciones. Como factores que permitan explicar la variación en las características estructurales de la madera (ángulo microfibrilar, densidad y rigidez).

Determinar y cuantificar la influencia de la genética y el ambiente en la edad cambial, así como conocer la fenología de la formación del leño que luego constituirá la madera, ayudaría a dilucidar la forma de seleccionar a los árboles para maximizar la producción de madera, pensando en el producto a obtener (valor estructural o de apariencia).

Se recomienda la instalación de nuevos ensayos, con familias/progenies en común, en sitios contrastantes donde potencialmente podría implantarse el pino híbrido F₁ INTA-PINDO.

Las familias de mayor crecimiento mostraron mejor comportamiento físico-mecánico (F19, F20, F28, F29 y F4). Este hallazgo sugiere la factibilidad de seleccionar en base a su crecimiento volumétrico, sin que sean afectadas negativamente las características relacionadas a la calidad estructural de su madera. A futuro se podría recurrir a estos materiales genéticos para la multiplicación y transferencia al medio productivo.

La presencia de médula en la madera generó un impacto negativo sobre las propiedades mecánicas, afectando de manera más significativa a la resistencia. Por lo cual, resulta apropiado que no sea admitida la presencia de médula en la clase superior.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DERIVADA DE LA TESIS

Revistas

- ✓ Winck, R.A., Winck, L.R., Belaber, E.C., Aquino D.R., Area, M.C., Gauchat, M.E., 2023. Coloración en zona central de la troza, ancho de anillos de crecimientos y porcentaje de leño tardío en pino híbrido F₁ INTA-PINDO (*Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*). Floresta. 53(2):204-213.
- ✓ Winck, R.A.; Area, M.C., Belaber, E.C., Aquino, D.R., Fassola, H.E., Gauchat, M.E. 2022. Caracterización morfológica de las traqueidas de pino híbrido de rápido crecimiento. Maderas-Ciencia y Tecnología 24(43):1-12.

Jornadas y congresos

- ✓ Winck, R.A.; Area, M.C.; Belaber E.C.; Aquino, D.R.; Fassola, H.E.; Gauchat, M.E. 2023. Densidad aparente estacionada del pino híbrido F₁ INTA-PINDO de 11 años de edad. VIII Congreso Forestal Latinoamericano. V Congreso Forestal Argentino. Pg 577-580.
- ✓ Winck, R.A.; Area, M.C.; Aquino, D.R.; Fassola, H.E.; Keller, A.E.; Bragañolo, A.; Gauchat, M.E. 2022. Módulo de elasticidad estático y dinámico en tablas de escuadrías comerciales de pino híbrido. XXXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Pg 133-137.
- ✓ Winck, R.A.; Winck, L.R.; Belaber, E.C.; Aquino, D.R.; Fassola H.E.; Área, M.C.; Gauchat, María Elena. 2021. Parámetros indicadores de la calidad estructural de familias de pino híbrido F₁ INTA-PINDO. XXXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Pg 193-197.
- ✓ Winck, R.A., Gauchat, M.E., Area, M.C. Belaber, E.C. Fassola, H.E. 2020. Caracterización de la madera de familias de pino híbrido F₁ INTA-PINDO (*Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*) mediante métodos no destructivos. Caracterizar 2020. Caracterización de Materiales. IQUIMEFA-UBA-CONICET, Facultad de Farmacia y Bioquímica, UBA. Pg 90. ISBN 978-987-86-6400-2.
- ✓ Winck, R.A.; Rotundo, C.A.; Aquino, D.R.; Gauchat, M.E.; Area, M.C.; Belaber, E.C.; Fassola, H.E. 2019. Medición del tiempo de propagación de ondas para estimar rigidez de árboles en pie de Pino híbrido F₁ INTA-PINDO. XVIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Pag 465-467. ISSN 1668-5385.
- ✓ Rotundo, C.A.; Winck, R.A.; Aquino, D.R.; Gauchat, M.C.; Belaber, E.C.. 2019. Evaluación operativa de una metodología no destructiva para la determinación del módulo de elasticidad dinámico del Pino híbrido F₁. XVIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Pag 89-91. ISSN 1668-5385.

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN QUE ENMARCARON LA TESIS

- ✓ Proyecto INTA 2019-PE-E6-I146-001 “Mejoramiento genético de especies forestales cultivadas de rápido crecimiento: un desarrollo clave para el fortalecimiento de la foresto industria nacional”. Coordinadora: Dra. María Elena Gauchat. Cartera 2019-2022.
- ✓ Proyecto INTA 2019-PE-E7-I148-001 “Procesos y tecnologías sostenibles para el agregado de valor en las cadenas y regiones”. Coordinador: Ing. Agr. Alejandro Eduardo Saavedra. Cartera 2019-2022.
- ✓ Proyecto INTA 2019-PE-E1-I016-001. “Desarrollo de una silvicultura sostenible de bosques implantados de alta productividad”. Coordinadora: M.Sc. Ana María Lupi. Cartera 2019-2022.
- ✓ Proyecto Especial de Investigación (UNAM). Convocatoria 2017. “Validación de métodos sónicos como predictores de las propiedades de resistencia de la madera y su incorporación como criterio de selección en un programa de mejora genética de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*”. Directora: Rosa Angela Winck, Co-Directora: Teresa María Suárezs. Código 16/F155-PI. Duración: Enero de 2018-Diciembre del 2020.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO DE LA TESIS

- ✓ Proyecto INTA 2019-PE-E6-I146-001 “Mejoramiento genético de especies forestales cultivadas de rápido crecimiento: un desarrollo clave para el fortalecimiento de la foresto industria nacional”. Coordinadora: Dra. María Elena Gauchat. Cartera 2019-2022. Monto: \$ 9.771.000,00.

- ✓ Proyecto INTA 2019-PE-E7-I148-001 “Procesos y tecnologías sostenibles para el agregado de valor en las cadenas y regiones”. Coordinador: Ing. Agr. Alejandro Eduardo Saavedra. Cartera 2019-2022. Monto: \$ 6.300.000,00.

- ✓ Proyecto INTA 2019-PE-E1-I016-001. “Desarrollo de una silvicultura sostenible de bosques implantados de alta productividad”. Coordinadora: M.Sc. Ana María Lupi. Cartera 2019-2022. Monto: \$ 4.870.000,00.

- ✓ Empresa Pindó S.A., quien facilitó el sitio donde oportunamente se instaló uno de los ensayos de progenies financiando el mantenimiento, el cuidado del mismo a lo largo de los 11 años de duración del ensayo. Financió, el apeo de los árboles, transporte a la industria y aserrado de los rollizos, y secado de la madera aserrada para ensayos.

- ✓ INTA EEA Montecarlo, institución responsable de la instalación de ambos ensayos, mantenimiento, cuidado a lo largo de los 11 años de duración de los ensayos 1 y 2, financiamiento del apeo de los árboles y transporte a la industria de los rollizos provenientes del ensayo ubicado en el sitio Laharrague. Facilitó el laboratorio de microscopía para la evaluación de las características anatómicas, instalaciones y equipamientos para efectuar los ensayos no destructivos de la madera.

- ✓ UNAM-IMAM-FCF de Eldorado (Misiones), que permitió el uso del laboratorio de tecnología de la madera y equipamientos necesarios para la evaluación destructiva de la madera con maquina universal de ensayos.

ANEXOS

Anexo 1. Criterios de clasificación visual y valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad por clase de resistencia según las normas IRAM 9662-3 e IRAM 9670.

Anexo 1. Tabla 1: Criterios de clasificación visual de la norma IRAM 9662-3.

Defecto		Unidad	Clase 1	Clase 2
Médula		–	No se admite	Se admite
Nudosidad		cm/cm	Menor o igual a 1/3	Menor o igual a 2/3
Dirección de las fibras		cm/cm	Desviación menor que 1:9	Desviación menor que 1:7
Anillos de crecimiento		mm	Menor que 10	Menor que 15
Fisuras	No pasantes	m	El largo de las fisuras no pasantes no debe ser mayor que 1,50 m y que 1/2 del largo de la pieza.	
	Pasantes	m	El largo de las fisuras pasantes no debe ser mayor que 1,0 y que 1/4 del largo de la pieza. En los extremos, su largo no debe ser mayor que 2 veces al ancho de la tabla.	
Combado y encorvado		mm	Menor a 12	
Revirado		mm/mm	Menor que 2 mm por cada 25 mm de ancho	
Abarquillado			Sin restricciones para el abarquillado	
Arista faltante		mm/mm	Transversalmente menor que 1/3 de la cara o canto donde aparece Sin restricciones para la longitud	
Ataques biológicos		–	No se admiten zonas atacadas por hongos causantes de pudrición. Se admiten zonas atacadas por hongos cromógenos. Se admiten orificios causados por insectos con diámetro inferior a 2 mm	
Madera de reacción		mm/mm	Menor o igual a 2/5	Menor o igual a 3/5
Otros		–	Daños mecánicos, depósitos de resina y otros defectos se limitan por analogía con alguna característica similar.	

Anexo 1. Tabla 2: Valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad para cada clase de resistencia según norma IRAM 9662-3.

Clase de resistencia	Resistencia a la flexión⁽¹⁾ (N/mm ²)	Resistencia a la tracción⁽²⁾ (N/mm ²)	Módulo de Elasticidad⁽³⁾ (N/mm ²)	Densidad⁽⁴⁾ (kg/m ³)
1	18	11	12.000	420
2	11	7	7.000	390

Nota: ⁽¹⁾ Valor característico (5 %) calculado para una altura de referencia de 150 mm de acuerdo con la norma UNE EN 384:2004 (242). Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.

⁽²⁾ Valor característico (5 %) calculado para un ancho de referencia de 150 mm de acuerdo con la UNE EN 384:2004 (242).

⁽³⁾ Valor característico medio calculado para un contenido de humedad de referencia de 12 % de acuerdo con la UNE EN 384:2004 (242).

⁽⁴⁾ Valor característico (5 %) calculado para un contenido de humedad de referencia de 12 % conforme a la norma UNE EN 384:2004 (242).

Anexo 1. Tabla 3: Criterios de clasificación visual de la norma IRAM 9670.

Defectos admisibles de la madera	Característica	Unidad	Requisitos	
			Grado 1	Grado 2
Inclinación de grano	Inclinación de grano	cm/cm	1/10	1/8
Nudo en la zona central de la cara	Diámetro medio	mm	Menor o igual a 0,37 a	Menor o igual a 0,62 a
Sumatoria de los diámetros de nudos en una longitud igual al ancho de la cara	Dimensión en la cara o canto	mm	Menor o igual a dos veces el diámetro máximo permitido en la cara	
Nudo en zona de borde de la cara	Dimensión en la cara	mm	Menor o igual a 0,24 a.	Menor o igual a 0,44 a.
Nudo en el canto	Dimensión en el canto	mm	Menor o igual a 0,50 e.	Menor o igual a 0,75 e.
Rajaduras en los extremos	Largo	mm	Igual al ancho	1,5 del ancho
Grietas superficiales de secado	-	-	Admitidas	
Grietas laterales	Profundidad	mm	0,25 e	0,60 e
Combado	-	Mm/100mm	0,50 % del largo	0,90 % del largo
Encorvado	-	Mm/100mm	0,25 % del largo	0,50 % del largo
Revirado	-	Mm/100mm	0,50 % del largo	0,90 % del largo
Abarquillado	-	Mm/100mm	1 % del ancho	2 % del ancho
Manchado	-	-	Se admite siempre y cuando no afecta la terminación final	
Agujeros de nudo, nudos saltadizos	-	-	Se evalúan como nudos sanos pero se admiten hasta 1 por metro lineal	Se evalúan como nudos sanos pero se admiten hasta 3 por metro lineal
Médula	-	-	Se admite	
Arista faltante	-	-	No se admite	Se admite una sola arista faltante que abarque hasta ¼ del

				espesor, $\frac{1}{4}$ del ancho, y que esté ubicada en los cuartos extremos de la viga
Número promedio de anillos por pulgada	-	-	Igual o mayor que 2	Menor que 2

Nota: Con "a" se designa el ancho de la cara de la pieza, y con "e" se designa al espesor de la pieza.

Anexo 1. Tabla 4: Valores característicos que se espera presenten las piezas de madera que cumplan con la norma IRAM 9670.

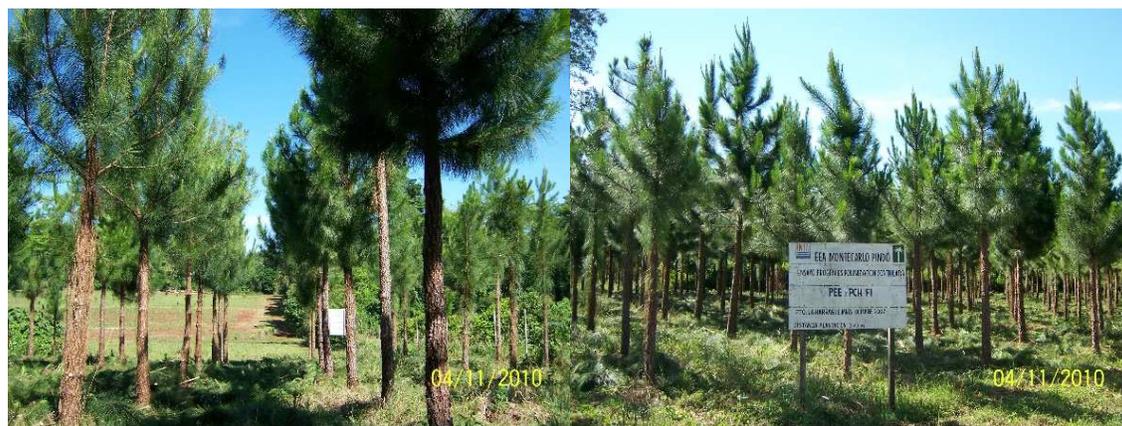
Valores de la madera de Grado 1	
Resistencia característica en flexión	23,9 N/mm ²
Resistencia característica en tracción	12,0 N/mm ²
Resistencia característica en compresión paralela a las fibras	23,9 N/mm ²
Resistencia característica en compresión perpendicular a las fibras (aplastamiento)	5,8 N/mm ²
Resistencia característica en corte	2,7 N/mm ²
Módulo de elasticidad a la flexión	9000 N/mm ²
Valores de la madera de Grado 2	
Resistencia característica en flexión	11,9 N/mm ²
Resistencia característica en tracción	6,0 N/mm ²
Resistencia característica en compresión paralela a las fibras	11,9 N/mm ²
Resistencia característica en compresión perpendicular a las fibras (aplastamiento)	5,8 N/mm ²
Resistencia característica en corte	2,7 N/mm ²
Módulo de elasticidad a la flexión	7500 N/mm ²

Anexo 1. Tabla 5: Relación entre la clasificación según IRAM 9670 y la SPIB.

Norma IRAM 9670	SPIB
Grado I	Selecta (madera densa)
	Grado I (madera no densa)
Grado II	Grado II (madera no densa)
	Grado III (madera no densa)

Anexo 2. Tabla 1: Caracterización de los ensayos de progenies de pino híbrido F₁ INTA-PINDO.

Caracterización	Sitio 1	Sitio 2
Localidad	Puerto Laharrague	Colonia Delicia
Latitud (°S)	26° 33'	26° 09'
Longitud (°O)	54° 40'	54° 26'
Altitud (msnm)	174	241
Tipo de suelo	Ultisol	Ultisol
Uso anterior	Bosque nativo	3 ^{era} rotación de pino
Fecha de plantación	10/10/2007	26/07/2007
Nº de árboles	925	1980
Nº de familias	37	66
Nº de bloques	5	6
Espaciamiento (m)	3 x 3	3 x 3
Sobrevivencia al 1er año (%)	94	85
Árboles/familia	25	30
Árboles /hectárea	1111	1111
Poda por lo bajo	3 años	3 años
Raleo	No	No



Anexo 2. Figura 1: Poda realizada a los 3 años de edad.

Anexo 3. Figura 1: Rodajas para calcular el área coloreada.



Anexo 3. Figura 1: Rodajas obtenidas a las alturas de fuste 0,10 m, 1,30 m y 4,45 m.



Anexo 3. Figura 2: Zona coloreada en madera aserrada y en la rodaja.

Anexo 4. Imágenes ilustrativas de las características de la madera evaluada.



Madera con nudo y médula



Madera con médula



Madera madera externa libre de defectos



Madera interna



Corte semitangencial



Corte tangencial

Anexo 5. Modelos probados y seleccionados para estimar el módulo de elasticidad dinámico y la velocidad acústica de árboles en pie a los 10 y 11 años.

Anexo 5. Tabla 1: Modelos probados y modelos seleccionados para evaluar el MOEd10 y MOEd11.

Variable	Modelos	Efectos fijos	Efecto aleatorio	Estructura de correlación	Heterocedasticidad	AIC	BIC
MOEd10	Modelo 1	Sitios y Familias	Árbol	Errores independientes	var/Ident	1438,07*	1503,43*
MOEd10	Modelo 2	Sitios y Familias	Árbol	Sin estructura	var/Ident	1438,07	1503,43
MOEd10	Modelo 3	Sitios y Familias	Árbol	Auto-regresiva de orden 1	var/Ident	1440,07	1509,06
MOEd11	Modelo 4	Sitios y Familias	Árbol	Errores independientes	var/Ident	1585,73*	1651,16*
MOEd11	Modelo 5	Sitios y Familias	Árbol	Sin estructura	var/Ident	1585,73	1651,16
MOEd11	Modelo 6	Sitios y Familias	Árbol	Auto-regresiva de orden 1	var/Ident	1587,73	1656,79

Nota:

*Modelos seleccionados por el AIC y BIC, estructura de correlación: errores independientes.

Anexo 5. Tabla 2: Salidas del InfoStat® de los modelos seleccionados para el MOEd10.

Modelos lineales generales y mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.001_MOEd10_REML<-lme(MOEd10~1+Sitios+Familias  
,random=list(TREE=pdIdent(~1))  
,method="REML"  
,control=lmeControl(niterEM=150  
,msMaxIter=200)  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.data00  
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.001_MOEd10_REML

Variable dependiente: MOEd10

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma
295	1438,07	1503,43	-701,03	0,96

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	279	4759,90	<0,0001
Sitios	1	279	1,55	0,2139
Familias	14	279	5,45	<0,0001

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Formula: ~1|TREE

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	2,56

MOEd10 - Medias ajustadas y errores estándares para Sitios

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Sitios	Medias	E.E.	
1	11,13	0,21	A
2	11,06	0,26	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

MOEd10 - Medias ajustadas y errores estándares para Familias

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Familias	Medias	E.E.	
07	13,18	0,68	A
01	13,06	0,61	A
03	13,05	0,55	A
05	12,71	0,70	A
04	12,04	0,76	A
13	11,28	0,73	B
02	11,14	0,61	B
11	11,00	0,60	B
15	10,47	0,71	B
08	10,44	0,57	B
12	10,34	0,67	B
09	9,60	0,53	B
14	9,58	0,63	B
06	9,55	0,51	B
10	9,00	0,61	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 5. Tabla 3: Salidas del InfoStat® de los modelos seleccionados para el MOEd11.

Modelos lineales generales y mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.003_MOEd11_REML<-lme(MOEd11~1+Sitio+Familias  
,random=list(TREE=pdIdent(~1))  
,method="REML"  
,control=lmeControl(niterEM=150  
,msMaxIter=200)  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.data04  
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.003_MOEd11_REML

Variable dependiente: MOEd11

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma
296	1585,73	1651,16	-774,87	1,24

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	280	4423,86	<0,0001
Sitios	1	280	2,56	0,1110
Familias	14	280	7,54	<0,0001

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent
Formula: ~1|TREE

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	3,31

MOEd11 - Medias ajustadas y errores estándares para Sitios

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Sitio	Medias	E.E.	
1	13,87	0,27	A
2	13,51	0,33	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

MOEd11 - Medias ajustadas y errores estándares para Familias

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Familias	Medias	E.E.	
01	17,24	0,79	A
03	16,72	0,71	A
07	16,60	0,88	A
04	16,58	0,98	A
05	14,88	0,91	A
02	13,93	0,79	B
11	13,22	0,77	B
06	13,05	0,66	B
13	12,95	0,94	B
09	12,33	0,67	B
08	12,33	0,74	B
15	12,25	0,91	B
12	11,82	0,86	B
10	11,64	0,79	B
14	9,83	0,81	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 5. Tabla 4: Salidas del InfoStat® de los modelos seleccionados para la V10.

Modelos lineales generales y mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.001_V10_REML<-lme(V10~1+Sitios+Familias  
,random=list(TREE=pdIdent(~1))  
,method="REML"  
,control=lmeControl(niterEM=150  
,msMaxIter=200)  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.data00  
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.001_V10_REML

Variable dependiente: V10

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma
301	4361	4427	-2163	154

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	285	18289	<0,0001
Sitios	1	285	25	<0,0001
Familias	14	285	5	<0,0001

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent
Formula: ~1|TREE

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	411

V10 - Medias ajustadas y errores estándares para Sitios

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Sitios	Medias	E.E.	
1	3522	34	A
2	3298	40	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

V10 - Medias ajustadas y errores estándares para Familias

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Familias	Medias	E.E.	
03	3740	88	A
01	3737	98	A
07	3727	110	A
05	3593	97	A
04	3567	122	A
13	3449	117	A
02	3441	98	A
11	3343	96	B
15	3297	113	B
12	3293	107	B
08	3241	92	B
06	3212	81	B
09	3207	83	B
14	3168	101	B
10	3135	98	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 5. Tabla 5: Salidas del InfoStat® de los modelos seleccionados para la V11.

Modelos lineales generales y mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.003_V11_REML<-lme(V11~1+Sitios+Familias  
, random=list(TREE=pdIdent(~1))  
, method="REML"  
, control=lmeControl(niterEM=150  
, msMaxIter=200)  
, na.action=na.omit  
, data=mlm.modeloR.data01  
, keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: `mlm.modelo.0003_V11_REML`

Variable dependiente: V11

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma
301	4422	4488	-2193	171

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	285	16528	<0,0001
Sitios	1	285	1	0,4493
Familias	14	285	6	<0,0001

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: `pdIdent`

Formula: `~1|TREE`

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	457

V11 - Medias ajustadas y errores estándares para Sitios

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Sitios	Medias	E.E.	
1	3630	38	A
2	3624	45	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

V11 - Medias ajustadas y errores estándares para Familias

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Familias	Medias	E.E.	
07	4068	122	A
03	3979	98	A
01	3978	109	A
04	3977	136	A
05	3840	108	A
02	3675	109	B
11	3609	107	B
13	3558	131	B
06	3526	91	B
12	3461	119	B
15	3441	126	B
08	3426	102	B
09	3417	92	B
10	3331	109	B
14	3120	112	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 6. Salidas del InfoStat® de los modelos probados para evaluar el módulo de elasticidad en rollizos.

Anexo 6. Tabla 1: Salidas del InfoStat® del modelo utilizado para evaluar el MOEd en rollizos con distribución gaussiana o normal.

Modelos lineales generalizados mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlgm.modelo.001_MOEd_REML<-glm(MOEd~1+Sitios+Familias
, family=myFamily
, na.action=na.omit
, data=R.data05)
```

Resultados para el modelo: mlgm.modelo.001_MOEd_REML

Variable dependiente: MOEd

General

Familia	Enlace	Convergencia	Escala
gaussian	identity	Alcanzada	0,68

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Deviance
90	236,66	279,16	-101,33	50,09

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (Wald) para los efectos fijos

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Sitios	1	74	3,41	0,0688
Familias	14	74	0,58	0,8704

MOEd - Medias ajustadas y errores estándares para Sitios

Inversa de la función de enlace con efecto aleatorio=0

DGC (Alfa=0.05)

Sitios	PredLin	E.E.	Media	E.E.	
1	8,23	0,12	8,23	0,12	A
2	7,91	0,12	7,91	0,12	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

MOEd - Medias ajustadas y errores estándares para Familias

Inversa de la función de enlace con efecto aleatorio=0

DGC (Alfa=0.05)

<u>Familias</u>	<u>PredLin</u>	<u>E.E.</u>	<u>Media</u>	<u>E.E.</u>	
05	8,58	0,34	8,58	0,34	A
08	8,42	0,31	8,42	0,31	A
14	8,37	0,34	8,37	0,34	A
09	8,21	0,34	8,21	0,34	A
04	8,19	0,34	8,19	0,34	A
01	8,18	0,34	8,18	0,34	A
10	8,08	0,34	8,08	0,34	A
11	8,06	0,41	8,06	0,41	A
13	7,96	0,34	7,96	0,34	A
02	7,94	0,34	7,94	0,34	A
06	7,91	0,34	7,91	0,34	A
03	7,85	0,31	7,85	0,31	A
15	7,79	0,34	7,79	0,34	A
07	7,78	0,31	7,78	0,31	A
12	7,73	0,37	7,73	0,37	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Anexo 6. Tabla 2: Salidas del InfoStat® del modelo utilizado para evaluar el MOEd en rollizos con distribución inversa gaussiana.

Modelos lineales generalizados mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlgm.modelo.002_MOEd_ML<-glm(MOEd~1+Sitios+Familias
, family=myFamily
, na.action=na.omit
, data=R.data05)
```

Resultados para el modelo: mlgm.modelo.002_MOEd_ML

Variable dependiente: MOEd

General

Familia	Enlace	Convergencia	Escala
inverse.gaussian	1/mu^2	Alcanzada	1,1E-03

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Deviance
90	215,29	257,78	-90,64	0,08

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (Wald) para los efectos fijos

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Sitios	1	74	3,85	0,0536
Familias	14	74	0,66	0,8070

MOEd - Medias ajustadas y errores estándares para Sitios

Inversa de la función de enlace con efecto aleatorio=0

DGC (Alfa=0.05)

Sitios	PredLin	E.E.	Media	E.E.	
2	0,02	4,5E-04	7,90	0,11	A
1	0,01	4,3E-04	8,22	0,12	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

MOEd - Medias ajustadas y errores estándares para Familias*Inversa de la función de enlace con efecto aleatorio=0**DGC (Alfa=0.05)*

Familias	PredLin	E.E.	Media	E.E.	
12	0,02	1,4E-03	7,72	0,33	A
07	0,02	1,2E-03	7,78	0,28	A
15	0,02	1,3E-03	7,79	0,30	A
03	0,02	1,2E-03	7,84	0,28	A
06	0,02	1,2E-03	7,91	0,31	A
02	0,02	1,2E-03	7,93	0,31	A
13	0,02	1,2E-03	7,95	0,31	A
11	0,02	1,5E-03	8,05	0,38	A
10	0,02	1,2E-03	8,08	0,32	A
01	0,01	1,2E-03	8,17	0,32	A
04	0,01	1,2E-03	8,18	0,32	A
09	0,01	1,2E-03	8,21	0,32	A
14	0,01	1,1E-03	8,37	0,33	A
08	0,01	1,0E-03	8,42	0,31	A
05	0,01	1,1E-03	8,57	0,34	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Anexo 6. Tabla 3: Salidas del InfoStat® del modelo utilizado para evaluar el MOEd en rollizos con distribución gamma.

Modelos lineales generalizados mixtos

Especificación del modelo en R

```
mlgm.modelo.003_MOEd_ML<-glm(MOEd~1+Sitios+Familias
, family=myFamily
, na.action=na.omit
, data=R.data05)
```

Resultados para el modelo: mlgm.modelo.003_MOEd_ML

Variable dependiente: MOEd

General

Familia	Enlace	Convergencia	Escala
Gamma	log	Alcanzada	0,01

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Deviance
90	221,74	264,24	-93,87	0,66

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (Wald) para los efectos fijos

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Sitios	1	74	3,55	0,0636
Familias	14	74	0,61	0,8464

MOEd - Medias ajustadas y errores estándares para Sitios

Inversa de la función de enlace con efecto aleatorio=0

DGC (Alfa=0.05)

Sitios	PredLin	E.E.	Media	E.E.	
1	2,11	0,01	8,22	0,12	A
2	2,07	0,01	7,91	0,12	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

MOEd - Medias ajustadas y errores estándares para Familias

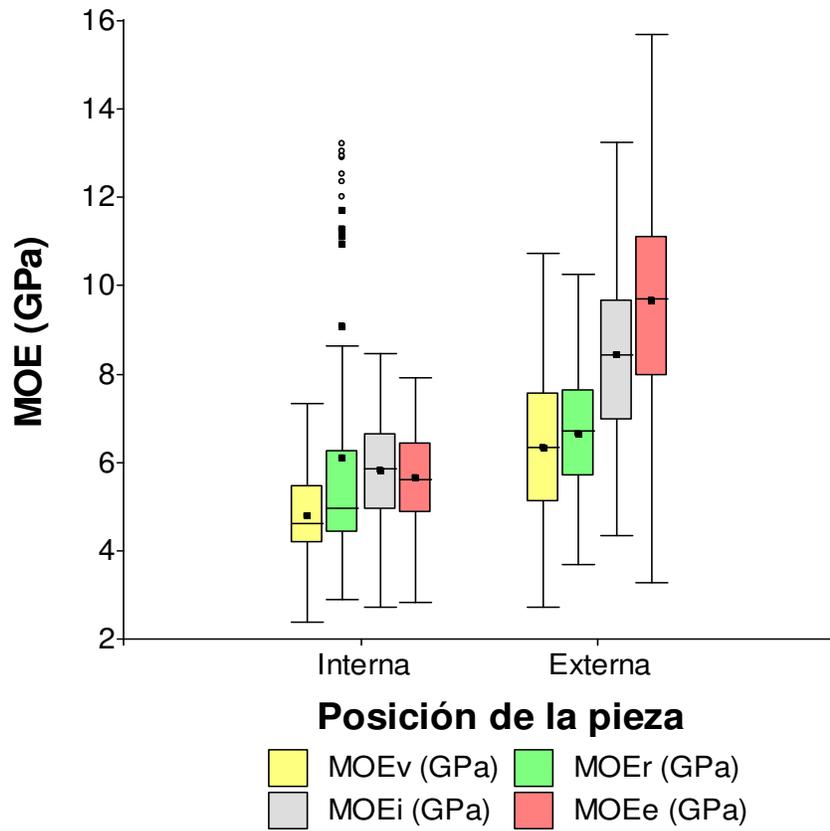
Inversa de la función de enlace con efecto aleatorio=0

DGC (Alfa=0.05).

<u>Familias</u>	<u>PredLin</u>	<u>E.E.</u>	<u>Media</u>	<u>E.E.</u>	
05	2,15	0,04	8,56	0,34	A
08	2,13	0,04	8,44	0,31	A
14	2,12	0,04	8,36	0,33	A
09	2,11	0,04	8,21	0,33	A
04	2,10	0,04	8,17	0,33	A
01	2,10	0,04	8,17	0,33	A
10	2,09	0,04	8,08	0,32	A
11	2,09	0,05	8,06	0,39	A
13	2,07	0,04	7,95	0,32	A
02	2,07	0,04	7,95	0,32	A
06	2,07	0,04	7,91	0,32	A
03	2,06	0,04	7,84	0,29	A
15	2,05	0,04	7,80	0,31	A
07	2,05	0,04	7,78	0,29	A
12	2,05	0,04	7,73	0,34	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Anexo 7. Figura 1. Gráfico de cajas medias y dispersión para el módulo de elasticidad dinámico por vibración transversal (MOEv), por resonancia (MOEr), por ondas de impacto (MOEi) y módulo de elasticidad estático (MOEe) de piezas internas y externas.



Anexo 7. Figura 1: Gráfico de cajas (medias \pm 3 desvíos estándares) para el MOEv, MOEr, MOEi y MOEe para piezas interna y externas.

Anexo 8. Estadística descriptiva para parámetros estructurales, módulo de elasticidad y módulo de rotura a la flexión estática, densidad estacionada al 12 % de humedad y ángulo microfibrilar según sitios y familias a los 11 años.

Anexo 8. Tabla 1: Estadística descriptiva del módulo de elasticidad estático obtenido con ensayo destructivo y corregido al 12 % de contenido de humedad (MOEe12%) para las 15 familias evaluadas.

Variable	Código Familias	Sitio 1			Sitio 2		
		n	Media	D.E.	n	Media	D.E.
MOEe12% (GPa)	01	7	10,27 (7,01-13,31)	2,93	7	8,91 (5,91-12,10)	2,28
	02	8	9,91 (4,96-14,01)	3,45	7	8,12 (6,04-10,20)	1,7
	03	12	9,63 (4,78-16,11)	3,6	9	9,57 (6,25-13,00)	2,63
	04	10	8,3 (5,07-11,52)	2,01	10	11,35 (6,78-14,30)	2,68
	05	9	9,81 (6,52-11,42)	1,84	9	10,76 (6,80-14,30)	2,93
	06	6	8,31 (4,68-11,28)	2,65	9	8,98 (5,30-15,52)	3,31
	07	7	9,24 (6,42-10,11)	1,37	14	9,38 (5,19-13,35)	2,74
	08	10	7,75 (5,88-12,28)	1,95	5	10,53 (8,05-13,06)	2,06
	09	5	7,45 (3,47-10,29)	2,68	7	8,47 (4,68-12,66)	3,04
	10	8	9,88 (5,86-14,85)	2,88	5	9,35 (7,78-12,14)	1,84
	11	6	7,9 (5,33-10,89)	2,12	6	9,36 (5,81-13,14)	2,56
	12	2	8,65 (8,05-9,24)	0,84	8	9,71 (6,14-15,06)	2,94
	13	7	7,79 (5,21-10,09)	1,64	8	9,59 (4,15-13,76)	3,15
	14	8	7,93 (5,69-13,79)	2,79	7	8,11 (5,82-10,63)	1,9
	15	7	8,86 (5,73-12,44)	2,54	7	8,61 (5,00-12,96)	2,94

n=cantidad de piezas ensayadas por familia; D.E.=desvío estándar. ()=valor mínimo y máximo del MOEe12%.

Anexo 8. Tabla 2: Estadística descriptiva del módulo de rotura obtenido con ensayo destructivo y corregido al 12 % de contenido de humedad (MOR12%) para las 15 familias evaluadas.

Variable	Código Familias	Sitio 1			Sitio 2		
		n	Media	D.E.	n	Media	D.E.
MOR12% (kg/cm ²)	01	7	398 (153-630)	157	7	329 (191-580)	128
	02	8	410 (194-624)	152	7	333 (263-424)	58
	03	12	350 (116-641)	149	9	354 (151-531)	150
	04	10	344 (211-525)	117	10	445 (180-628)	133
	05	9	415 (238-559)	126	9	427 (139-710)	201
	06	6	343 (186-536)	125	9	380 (172-731)	176
	07	7	388 (194-540)	132	14	321 (142-559)	135
	08	10	331 (174-486)	104	5	424 (231-652)	168
	09	5	339 (147-482)	121	7	406 (154-633)	167
	10	8	475 (212-689)	182	5	443 (370-545)	90
	11	6	378 (211-517)	118	6	438 (290-584)	122
	12	2	414 (377-450)	52	8	447 (315-656)	121
	13	7	435 (224-645)	124	8	368 (217-636)	154
	14	8	359 (233-675)	148	7	310 (209-460)	94
	15	7	411 (184-633)	168	7	336 (178-493)	120

n=cantidad de piezas ensayadas por familia; D.E.=desvío estándar. ()=valor mínimo y máximo del MOR12%.

Anexo 8. Tabla 3: Estadística descriptiva de la densidad al 12 % de contenido de humedad obtenido por mediciones en laboratorio (DE12%) para las 15 familias evaluadas.

Variable	Código Familias	Sitio 1			Sitio 2		
		n	Media	D.E.	n	Media	D.E.
DE12% (kg/m3)	01	32	487 (352-640)	89	38	473 (342-660)	87
	02	44	434 (347-576)	63	47	457 (311-610)	65
	03	50	442 (313-583)	71	35	455 (327-617)	77
	04	41	415 (289-526)	64	41	484 (313-663)	94
	05	42	413 (276-558)	68	37	479 (370-610)	65
	06	37	437 (304-622)	83	38	406 (294-591)	73
	07	37	424 (283-578)	72	56	450 (306-649)	80
	08	50	435 (306-641)	77	29	440 (313-607)	81
	09	33	433 (275-611)	75	34	476 (353-641)	80
	10	22	410 (317-543)	70	36	421 (306-541)	69
	11	20	437 (348-587)	68	21	471 (365-638)	84
	12	17	430 (326-575)	85	30	482 (353-654)	91
	13	32	445 (311-623)	87	32	492 (326-660)	87
	14	31	441 (319-627)	86	23	430 (326-605)	82
	15	28	455 (302-564)	68	22	472 (326-622)	93

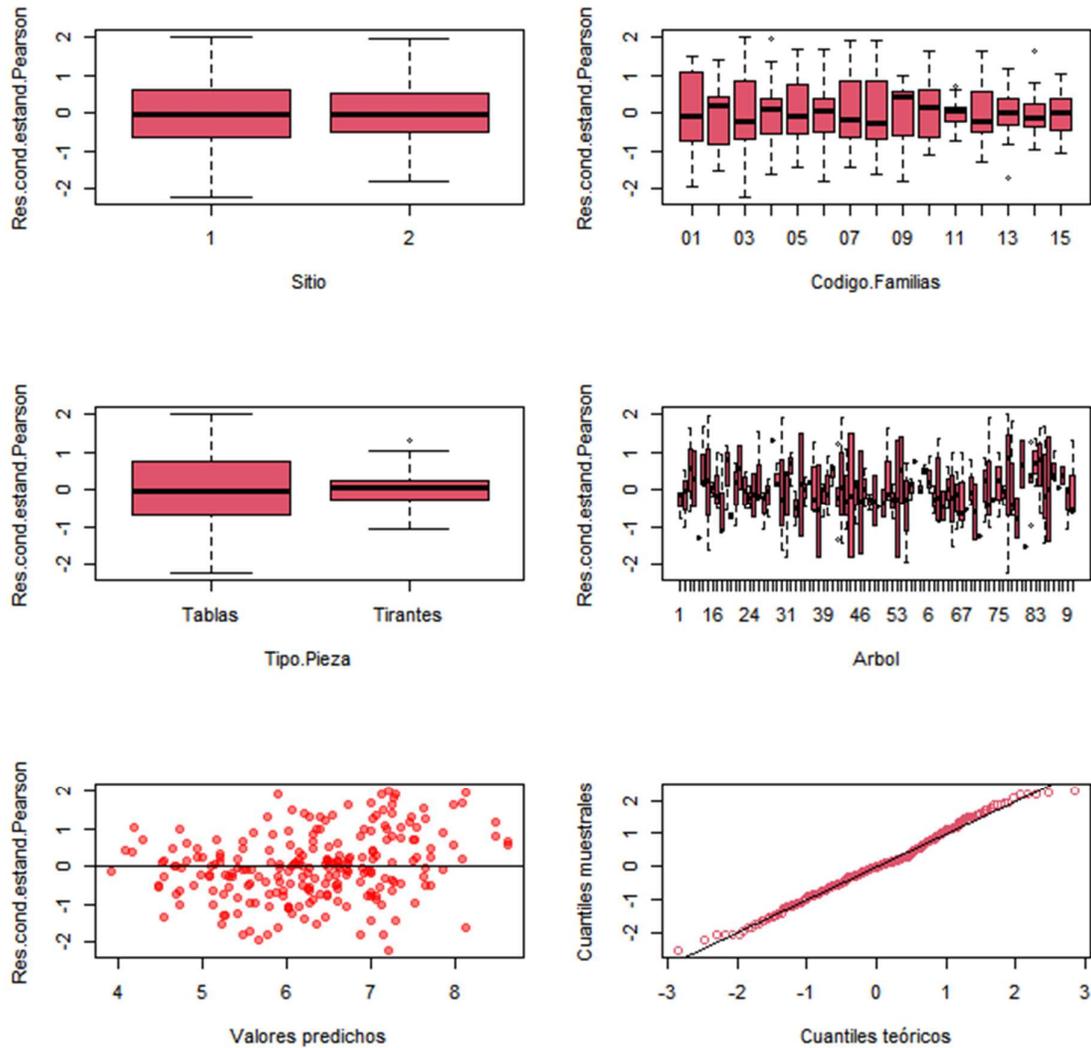
n=cantidad de piezas ensayadas por familia; D.E.=desvío estándar. ()=valor mínimo y máximo de la DE12%.

Anexo 8. Tabla 4: Estadística descriptiva del ángulo microfibrilar del leño tardío a los 11 años de edad (AMF11) para las 15 familias evaluadas.

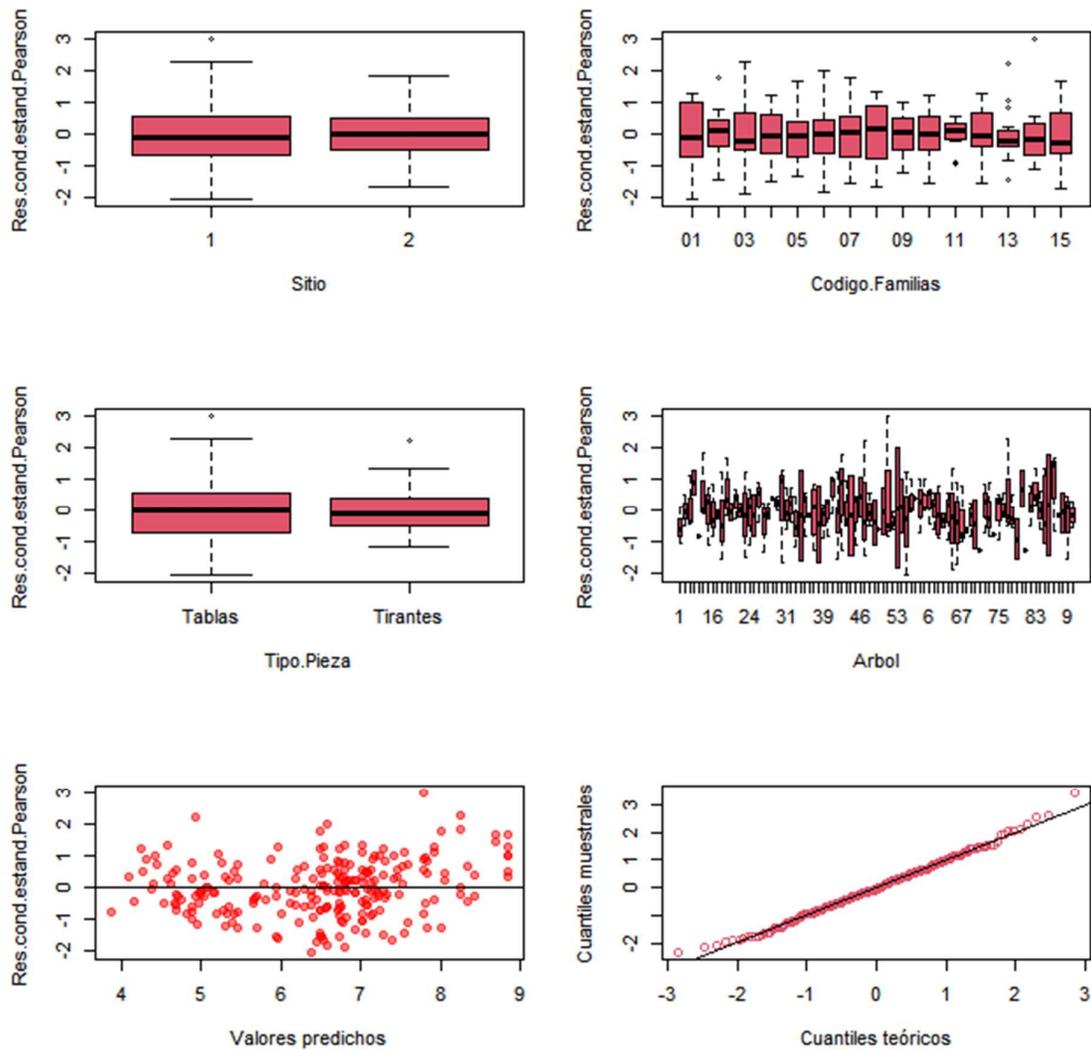
Variable	Código Familias	Sitio 1			Sitio 2		
		n	Media ()	D.E.	n	Media ()	D.E.
AMF11 (°)	01	5	16,9 (14,6-18,8)	1,5	5	21,0 (20,0-21,8)	0,8
	02	5	18,4 (14,9-21,2)	2,8	5	19,7 (17,8-22,3)	1,9
	03	5	17,0 (15,4-17,5)	0,9	5	19,1 (15,5-22,4)	2,6
	04	5	18,3 (15,7-19,9)	1,7	5	19,7 (18,8-21,3)	1,0
	05	5	18,4 (16,9-20,4)	1,4	5	21,9 (19,3-23,3)	1,6
	06	5	19,4 (17,6-21,6)	1,8	5	20,8 (18,5-23,0)	1,8
	07	5	17,2 (16,0-18,6)	1,2	5	18,4 (17,3-19,8)	1,0
	08	5	21,3 (20,0-23,6)	1,4	5	19,9 (19,1-20,8)	0,8
	09	5	18,0 (16,2-20,6)	1,6	5	18,2 (16,4-19,8)	1,3
	10	5	18,9 (15,7-21,6)	2,1	5	22,1 (16,5-28,9)	4,8
	11	5	18,7 (17,0-21,4)	1,7	5	22,3 (18,2-26,4)	3,3
	12	5	19,5 (17,5-22,6)	2,3	5	20,3 (18,2-22,4)	1,6
	13	5	20,1 (18,4-22,7)	2,1	5	22,9 (16,6-27,0)	3,7
	14	5	21,4 (18,0-27,8)	4,5	5	18,7 (15,8-23,1)	3,2
	15	5	20,2 (18,0-24,1)	2,7	5	20,8 (16,5-22,7)	2,6

n=cantidad de piezas ensayadas por familia; D.E.=desvío estándar. ()=valor mínimo y máximo del AMF11.

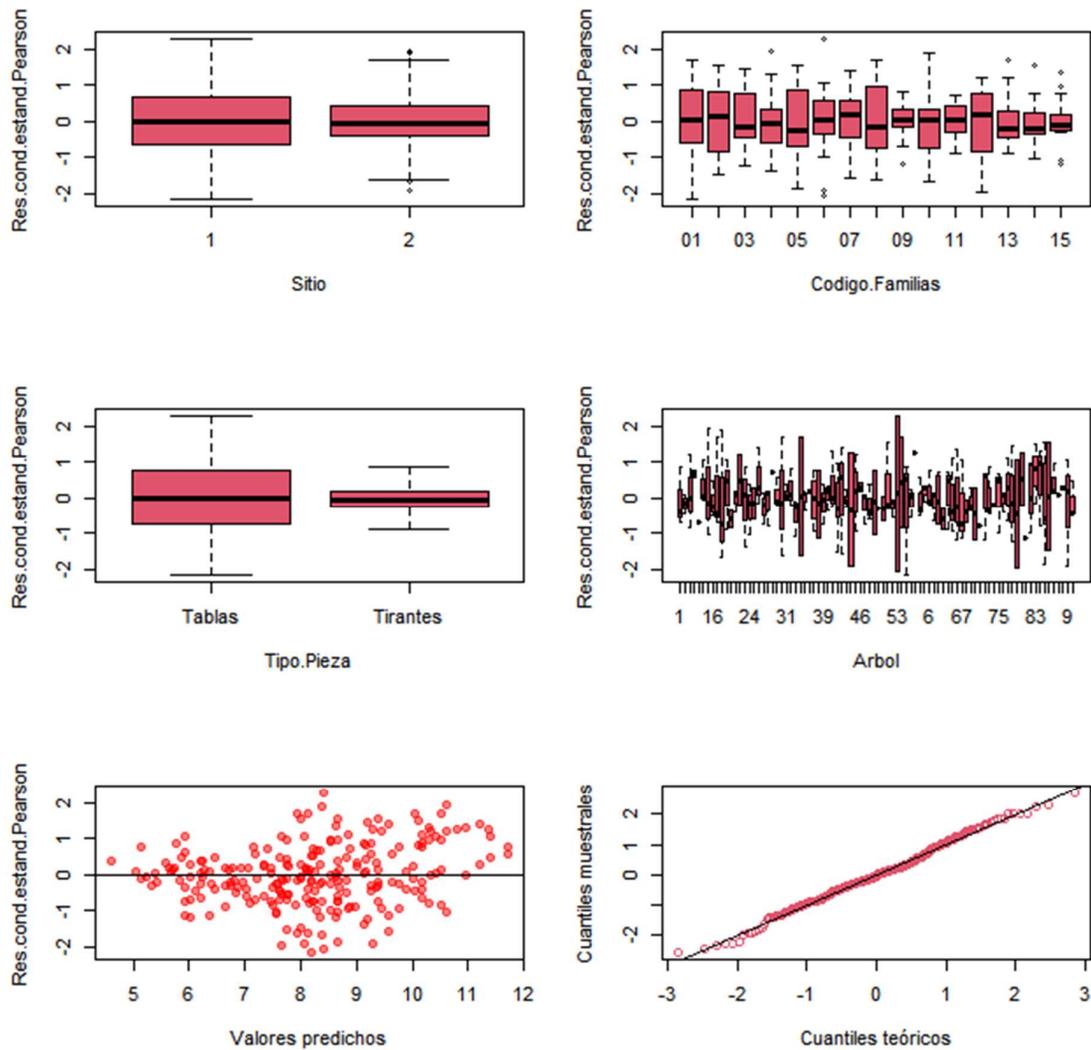
Anexo 9. Modelos seleccionados para el análisis de los módulos dinámicos por vibración (MOEv), resonancia (MOEr) e impacto (MOEi), módulo de elasticidad a la flexión estática (MOEe), módulo de rotura (MOR) y densidad con el equipo Metriguard® (DensMet). Valores corregidos al 12 % de contenido de humedad.



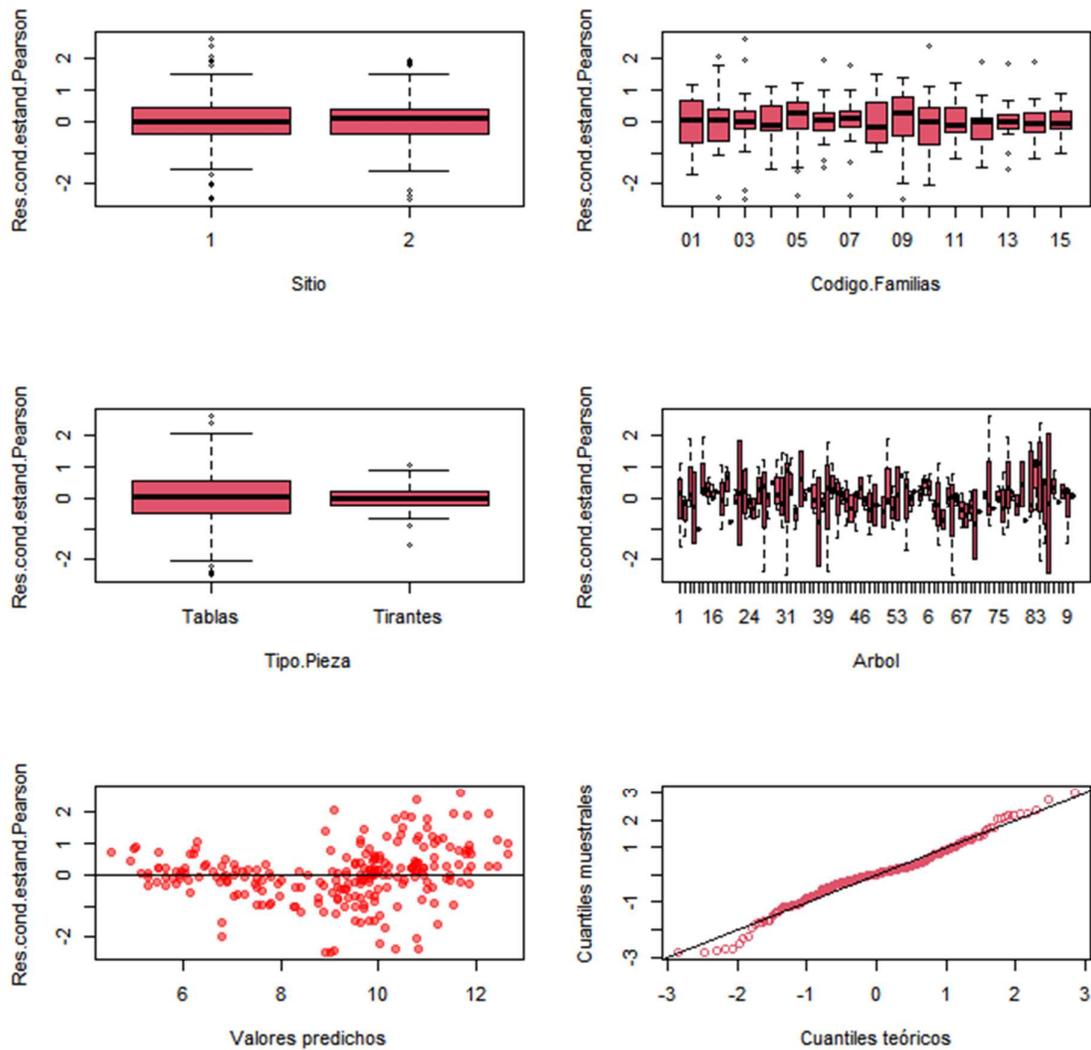
Anexo 9. Figura 1: Residuos *estudentizados* para los parámetros de efectos fijos (sitios, familias y tipo de pieza) y aleatorio (árbol) del modelo de análisis seleccionado para el módulo de elasticidad dinámico por vibración (MOEv). Diagramas de dispersión entre los residuos *estudentizados* y los valores predichos. Gráfico Q-Q plot. Las barras indican los errores estándares.



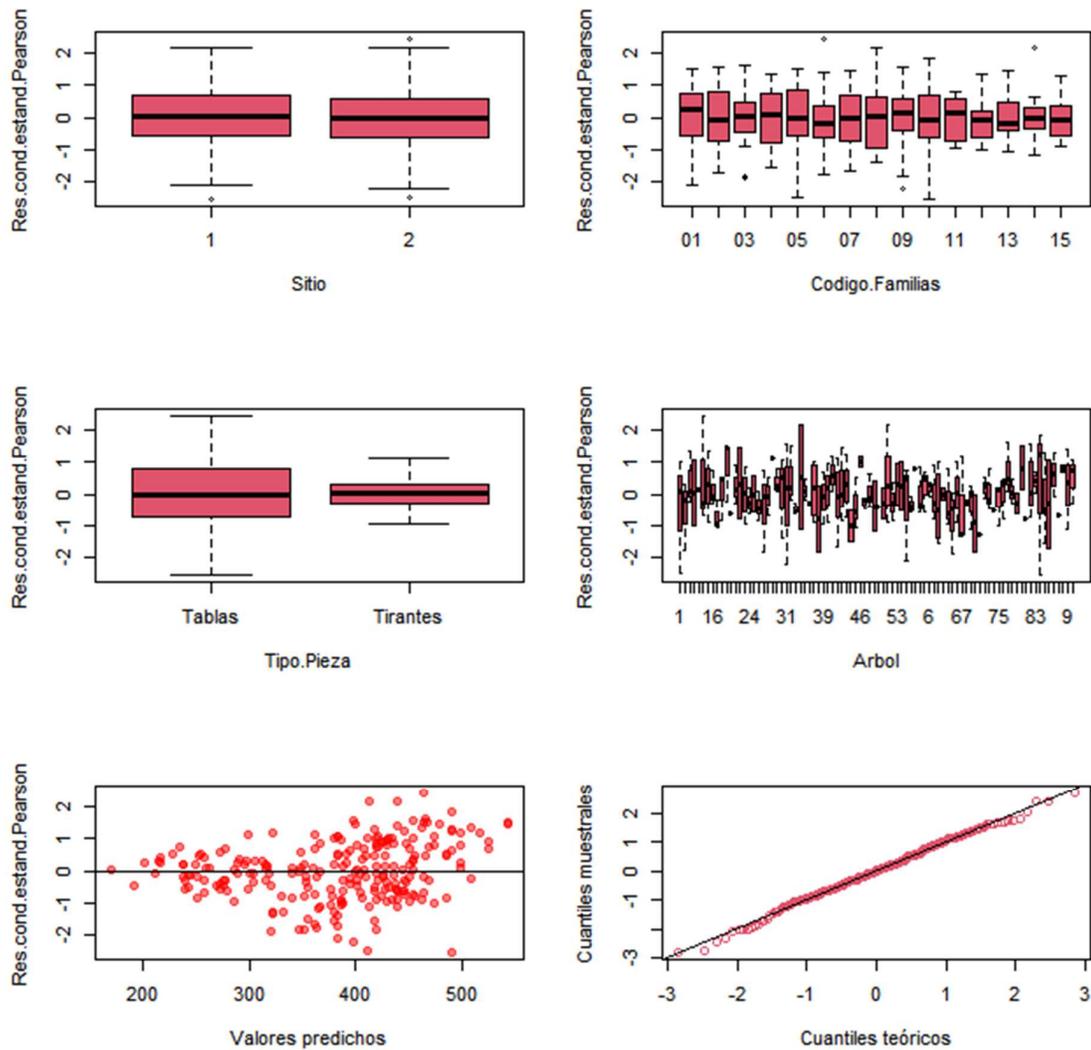
Anexo 9. Figura 2: Residuos *estudentizados* para los parámetros de efectos fijos (sitios, familias y tipo de pieza) y aleatorio (árbol) del modelo de análisis seleccionado para el módulo de elasticidad dinámico por resonancia (MOEr). Diagramas de dispersión entre los residuos *estudentizados* y los valores predichos. Gráfico Q-Q plot. Las barras indican los errores estándares.



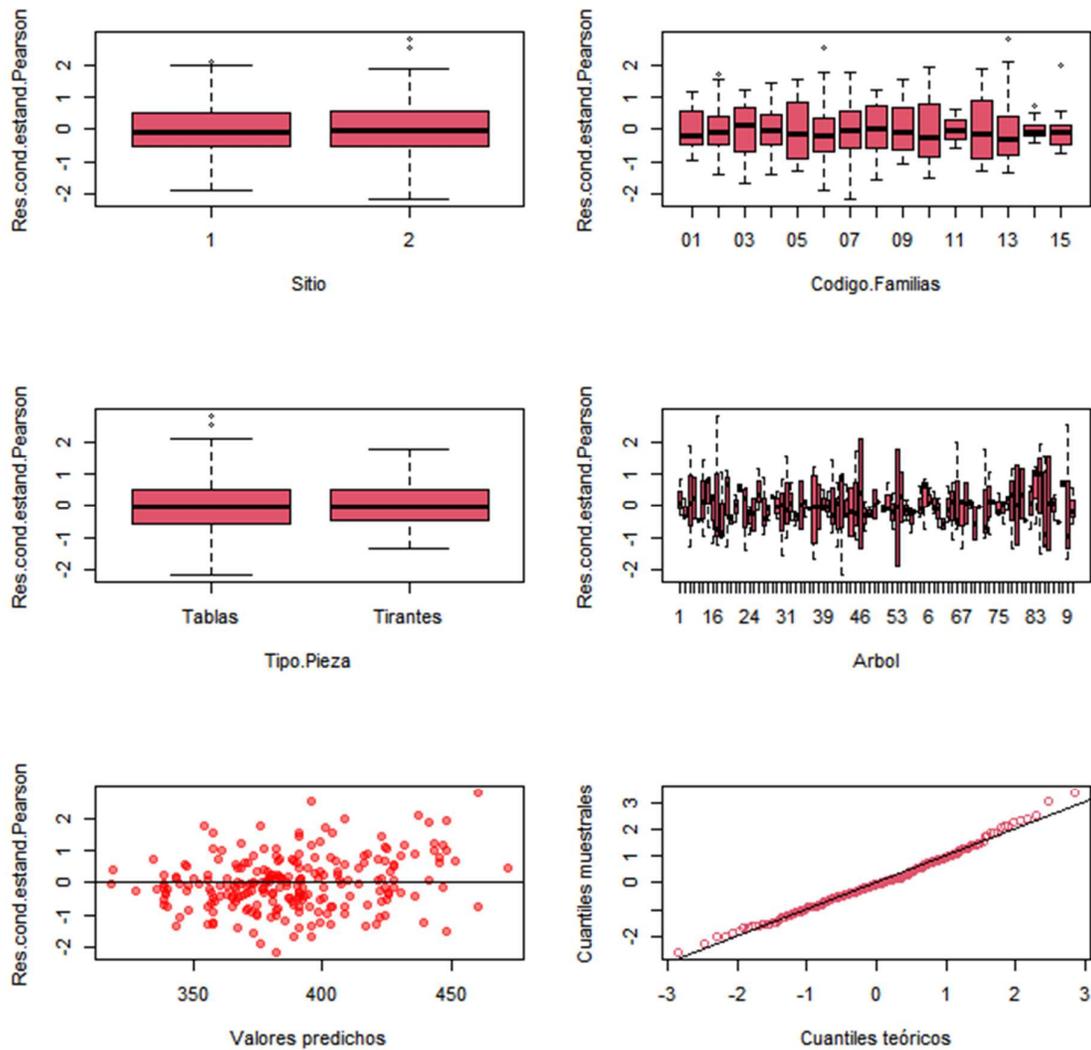
Anexo 9. Figura 3: Residuos *estudentizados* para los parámetros de efectos fijos (sitios, familias y tipo de pieza) y aleatorio (árbol) del modelo de análisis seleccionado para el módulo de elasticidad dinámico por impacto (MOEi). Diagramas de dispersión entre los residuos *estudentizados* y los valores predichos. Gráfico Q-Q plot. Las barras indican los errores estándares.



Anexo 9. Figura 4: Residuos *estudentizados* para los parámetros de efectos fijos (sitios, familias y tipo de pieza) y aleatorio (árbol) del modelo de análisis seleccionado para el módulo de elasticidad a la flexión estática (MOEe). Diagramas de dispersión entre los residuos *estudentizados* y los valores predichos. Gráfico Q-Q plot. Las barras indican los errores estándares.

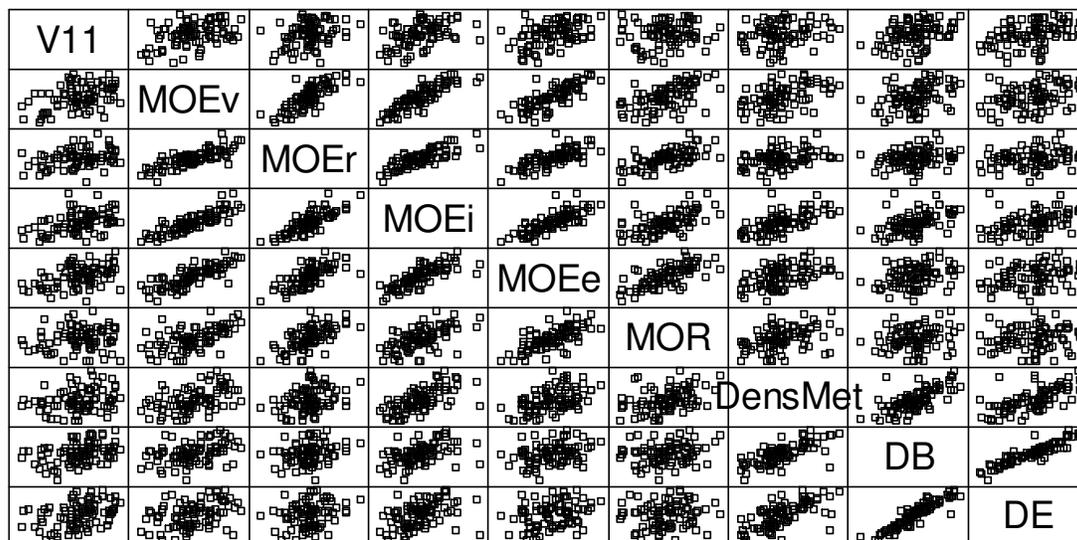


Anexo 9. Figura 5: Residuos *estudentizados* para los parámetros de efectos fijos (sitios, familias y tipo de pieza) y aleatorio (árbol) del modelo de análisis seleccionado para el módulo de rotura a la flexión estática (MOR). Diagramas de dispersión entre los residuos *estudentizados* y los valores predichos. Gráfico Q-Q plot. Las barras indican los errores estándares.



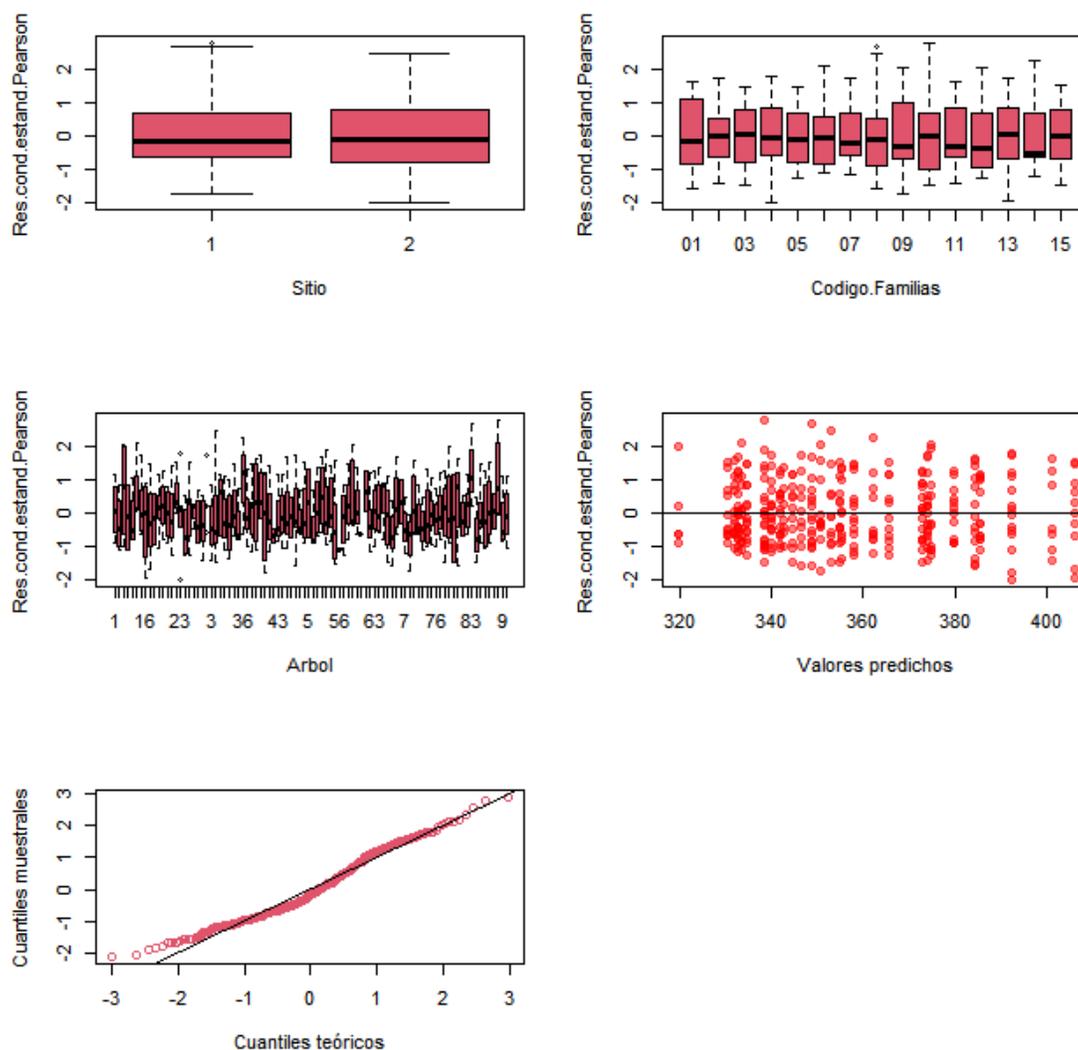
Anexo 9. Figura 6: Residuos *estudentizados* para los parámetros de efectos fijos (sitios, familias y tipo de pieza) y aleatorio (árbol) del modelo de análisis seleccionado para la densidad medida con el equipo Metriguard® (DensMet). Diagramas de dispersión entre los residuos *estudentizados* y los valores predichos. Gráfico Q-Q plot. Las barras indican los errores estándares.

Anexo 10. Correlaciones de Pearson entre variables obtenidas a partir de árboles en pie, en piezas aserradas y en probetas pequeñas.

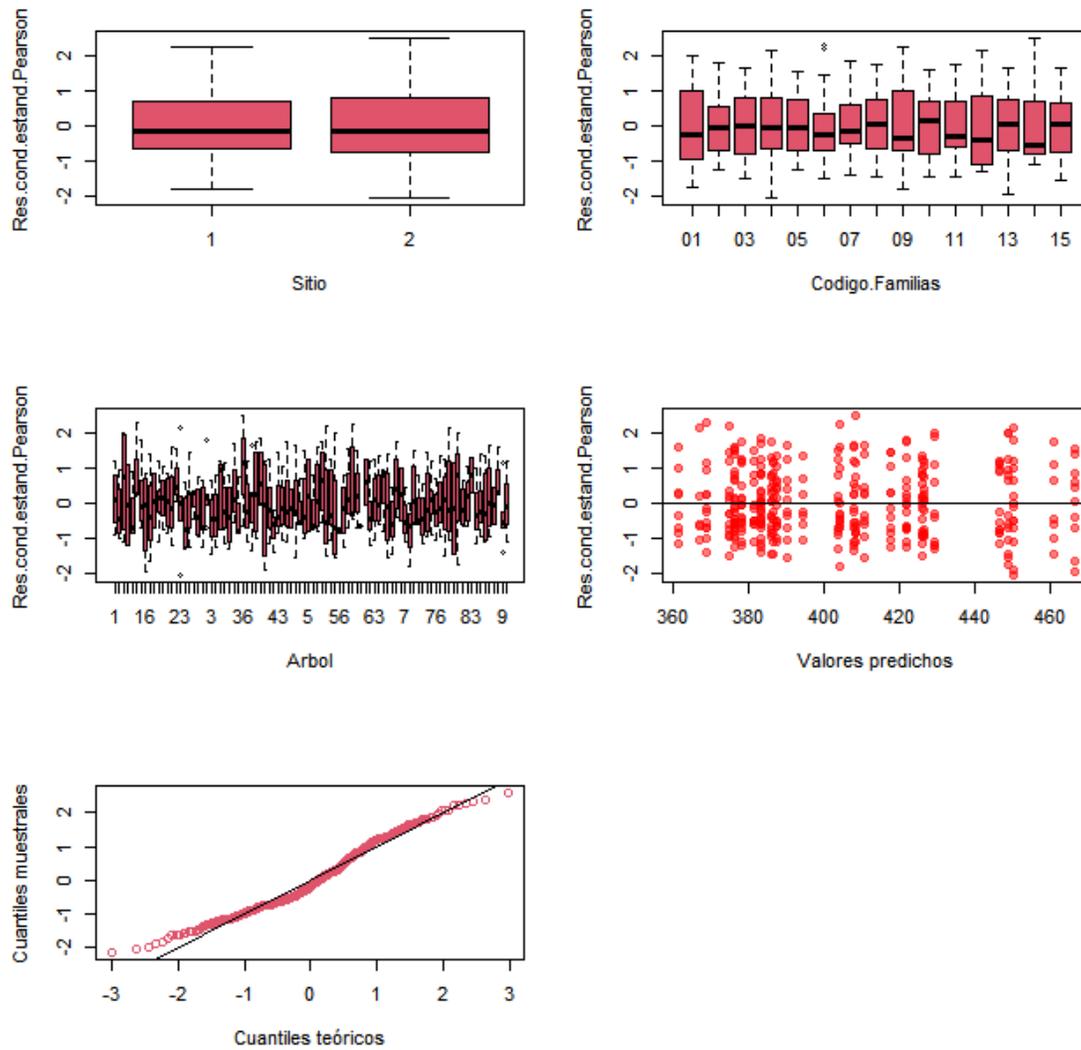


Anexo 10. Figura 1. Gráfico de correlaciones de Pearson entre variables velocidad acústica a los 11 años de edad (V11), módulos dinámicos obtenido por vibración trasnversal (MOEv), resonancia (MOEr), e impacto (MOEi), módulo de elasticidad estático (MOEe), módulo de rotura (MOR), densidad obtenida con Metriguard® (DensMet), densidad básica (DB) y densidad estacionada (DE). Los valores de las propiedades mecánicas de la madera aserrada y de la densidad estacionada fueron corregida al 12 % de contenido de humedad.

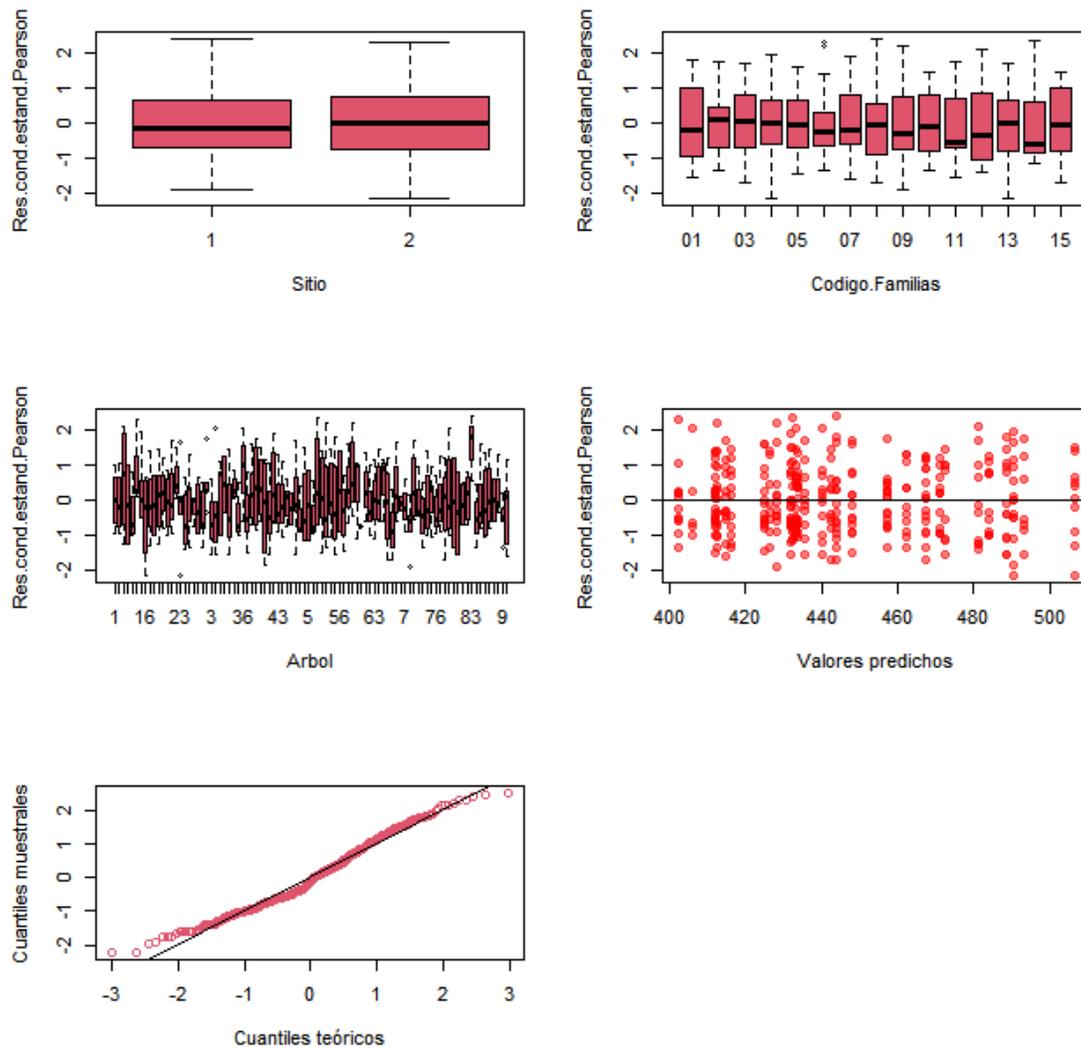
Anexo 11. Modelos seleccionados para el análisis de las densidades básica, anhidra y estacionada al 12 % de contenido de humedad a la altura de 1,30 m.



Anexo 11. Figura 1: Residuos *estudentizados* para los parámetros de efectos fijos (sitios y familias) y aleatorio (árbol) del modelo de análisis seleccionado para la densidad básica (DB) para la altura de 1,30 m. Diagramas de dispersión entre los residuos *estudentizados* y los valores predichos. Gráfico Q-Q plot. Las barras indican los errores estándares.

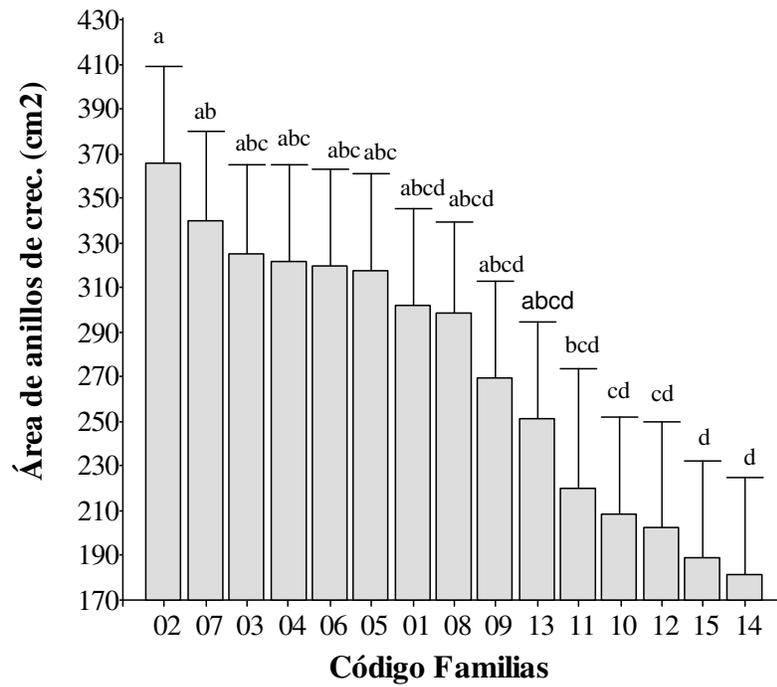


Anexo 11. Figura 2: Residuos *estudentizados* para los parámetros de efectos fijos (sitios y familias) y aleatorio (árbol) del modelo de análisis seleccionado para la densidad anhidra (DA) para la altura de 1,30 m. Diagramas de dispersión entre los residuos *estudentizados* y los valores predichos. Gráfico Q-Q plot. Las barras indican los errores estándares.

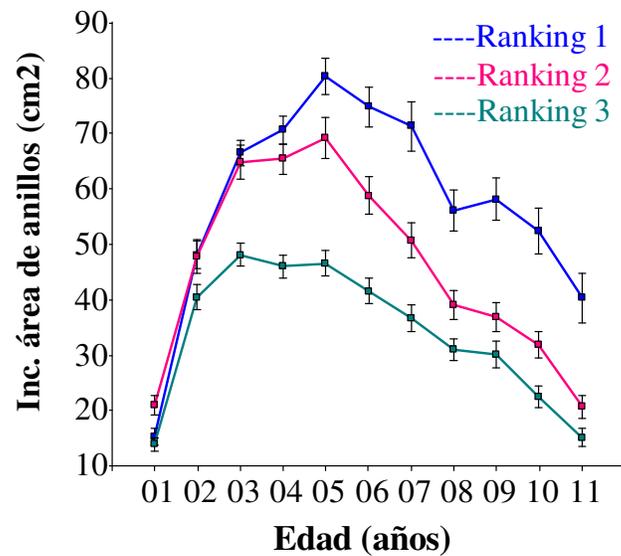


Anexo 11. Figura 3: Residuos *estudentizados* para los parámetros de efectos fijos (sitios y familias) y aleatorio (árbol) del modelo de análisis seleccionado para la densidad estacionada corregida al 12% de contenido de humedad (DE) para la altura de 1,30 m. Diagramas de dispersión entre los residuos *estudentizados* y los valores predichos. Gráfico Q-Q plot. Las barras indican los errores estándares.

Anexo 12. Área promedio de anillos de crecimiento por familias.

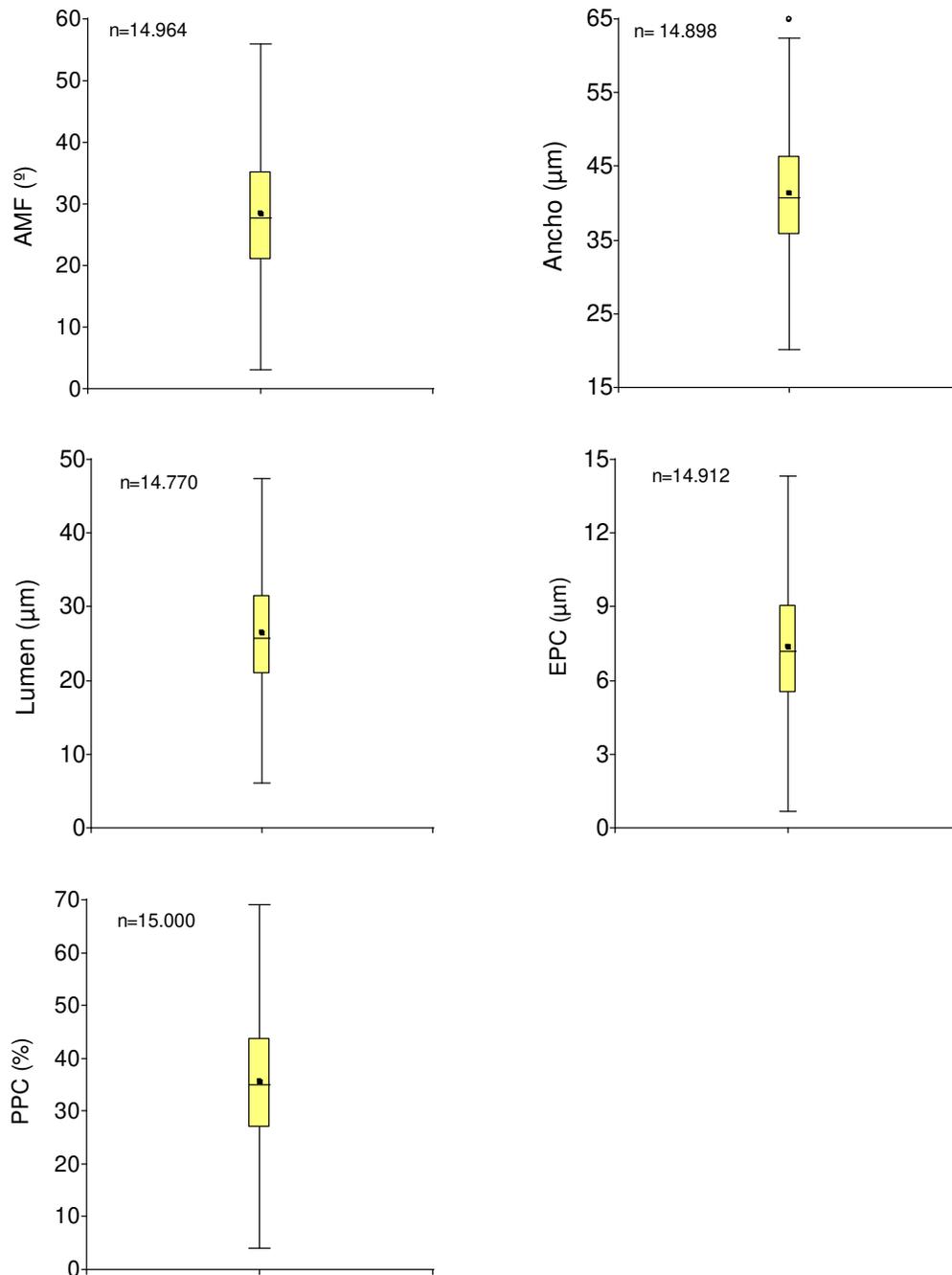


Anexo 12. Figura 1. Área promedio de anillos de crecimiento (cm²) por familias.



Anexo 12. Figura 2. Incremento medio anual en el área de los anillos.

Anexo 13. Figura 1. Dispersión de todos los datos de las mediciones de los caracteres anatómicos.



Anexo 13. Figura 1. Gráficos (± 3 desvíos estándar) de todos los datos de las mediciones de los caracteres anatómicos (ángulo microfibrilar: AMF, ancho, lumen, EPC: espesor de pared celular, PPC: proporción de pared celular).

Anexo 14. Tabla 1: Salidas del InfoStat® del modelo utilizado para el análisis del ángulo microfibrilar a los 7 años para el sitio 1.

Modelos lineales generales y mixtos

SITIOS = 1

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.002_AMF7_REML<-lme(AMF7~1+Código Familias
,random=list(Arbol=pdIdent(~1))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.dataC1
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.002_AMF7_REML

Variable dependiente: AMF7

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma
75	401,77	437,38	-183,89	1,49

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	60	4483,14	<0,0001
Código Familias	14	60	1,58	0,1106

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Formula: ~1|Arbol

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	3,97

Anexo 14. Tabla 2: Salidas del InfoStat® del modelo utilizado para el análisis del ángulo microfibrilar a los 7 años para el sitio 2

SITIOS = 2

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.003_AMF7_REML<-lme(AMF7~1+Código Familias
,random=list(Arbol=pdIdent(~1))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.dataC2
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.003_AMF7_REML

Variable dependiente: AMF7

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma
75	358,78	394,67	-162,39	1,00

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	61	8244,13	<0,0001
Código Familias	14	61	2,34	0,0117

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Formula: ~1|Arbol

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	2,66

AMF7 - Medias ajustadas y errores estándares para Código Familias

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Código Familias	Medias	E.E.					
11	33,37	1,27	A				
13	32,15	1,16	A	B			
10	31,29	1,27	A	B	C		
09	30,48	1,27	A	B	C		
06	30,05	1,27	A	B	C	D	
12	29,88	1,27	A	B	C	D	
02	29,70	1,27		B	C	D	
15	29,61	1,27		B	C	D	
03	29,43	1,27		B	C	D	E
01	29,31	1,27		B	C	D	E
04	28,80	1,27		B	C	D	E
08	28,79	1,27		B	C	D	E
14	27,75	1,27			C	D	E
07	26,62	1,27				D	E
05	25,97	1,27					E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Anexo 14. Tabla 3: Salidas del InfoStat® del modelo utilizado para el análisis del ángulo microfibrilar a los 10 años para el sitio 1.

Modelos lineales generales y mixtos

SITIOS = 1

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.002_AMF10_REML<-lme(AMF10~1+Código Familias
,random=list(Arbol=pdIdent(~1))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.dataC1
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.002_AMF10_REML

Variable dependiente: AMF10

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma
75	409,08	444,69	-187,54	1,58

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	60	2722,88	<0,0001
Código Familias	14	60	0,98	0,4855

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Formula: ~1|Arbol

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	4,22

Anexo 14. Tabla 4: Salidas del InfoStat® del modelo utilizado para el análisis del ángulo microfibrilar a los 10 años para el sitio 2.

SITIOS = 2

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.003_AMF10_REML<-lme (AMF10~1+Código Familias
, random=list (Arbol=pdIdent (~1))
, method="REML"
, control=lmeControl (niterEM=150
, msMaxIter=200)
, na.action=na.omit
, data=mlm.modeloR.dataC2
, keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.003_AMF10_REML

Variable dependiente: AMF10

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma
75	355,60	391,48	-160,80	0,97

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	61	6481,74	<0,0001
Código Familias	14	61	1,40	0,1791

Parámetros de los efectos aleatorios

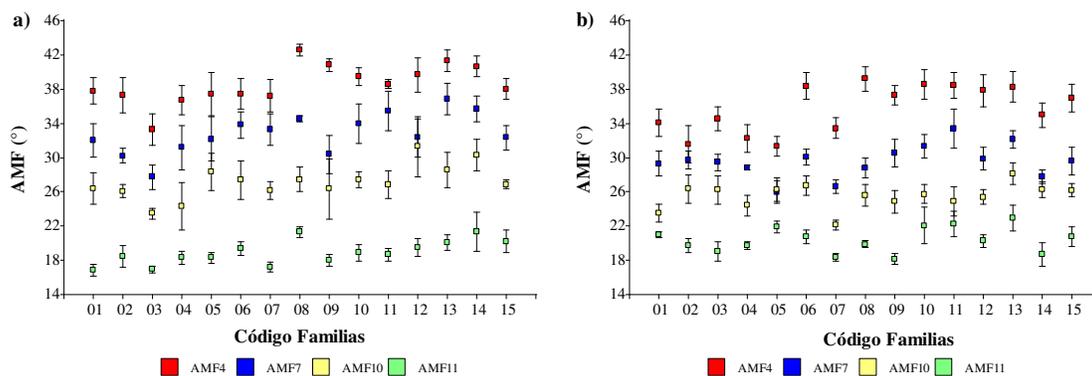
Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Formula: ~1|Arbol

Desvíos estándares y correlaciones

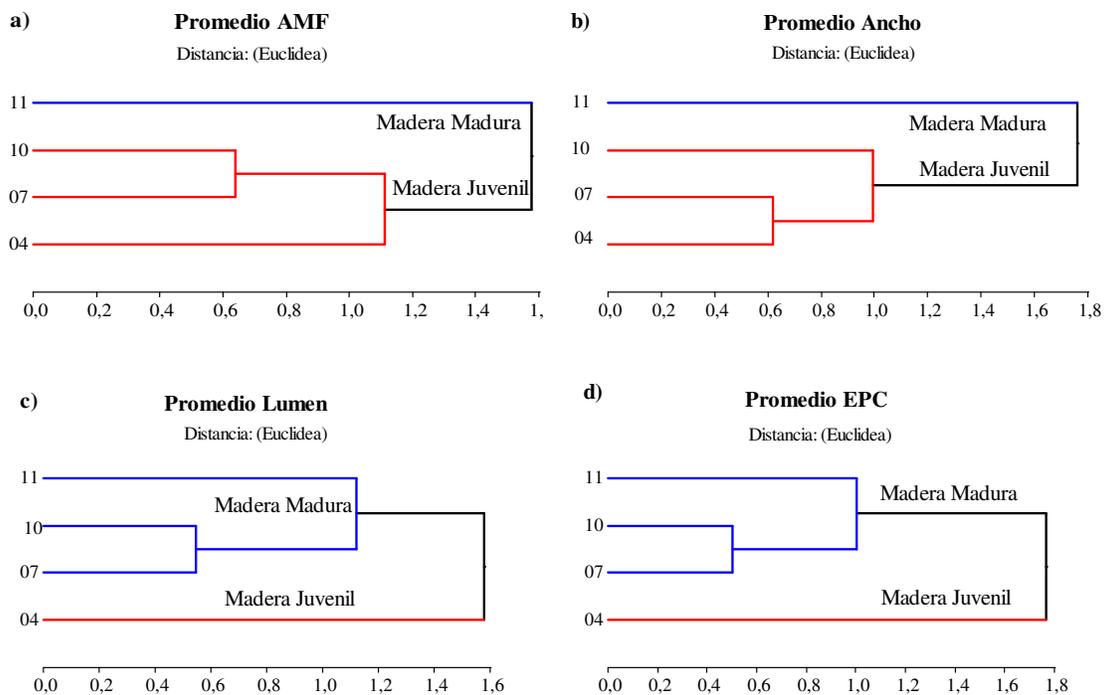
	(const)
(const)	2,59

Anexo 15. Variación del ángulo microfibrilar por edad y familia en ambos sitios.



Anexo 15. Figura 1. Variación del ángulo microfibrilar por familias a los 4 (AMF4), 7 (AMF 7), 10 (AMF10) y 11 (AMF11) años de edad para (a) sitio 1 y (b) sitio 2.

Anexo 16. Delimitación de la madera juvenil y madura en función de las variables anatómicas evaluadas.



Anexo 16. Figura 1. Edad de estabilización de las características anatómicas evaluadas, ángulo microfibrilar (AMF) (a), ancho de traqueidas (b), ancho de lumen (c), espesor de pared celular (EPC) (d).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sutton WRJ. The need for planted forests and the example of radiata pine. *New For.* 1999;17(1–3):95–110.
2. Carle JB, Holmgren LPB. Wood from planted forests: Global outlook to 2030. *Plant For Uses, Impacts Sustain.* 2008;58(10469):47–59.
3. Gustavsson L, Madlener R, Hoen HF, Jungmeier G, Karjalainen T, Klöhn S, et al. The role of wood material for greenhouse gas mitigation. Vol. 11, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.* 2006. p. 1097–127.
4. Keller A., Crechi E. Efecto del raleo sobre el crecimiento y la producción de *Pinus*. XXXIV Jornadas Forestales de Entre Ríos. 2020. 1–5 p.
5. Cappa EP, Marcó M, Garth Nikles D, Last IS. Performance of *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea*, their F₁, F₂ and backcross hybrids and *Pinus taeda* to 10 years in the Mesopotamia region, Argentina. *New For.* 2013;44(2):197–218.
6. Dungey HS. Pine hybrids - A review of their use performance and genetics. *For Ecol Manage.* 2001;148(1–3):243–58.
7. Bailleres H, Lee D, Kumar C, Psaltis S, Hopewell G, Brancheriau L. Improving returns from southern pine plantations through innovative resource characterisation. Vol. 61. 2019. 170 p.
8. Gauchat ME, Belaber EC, Cappa EP, Scherer RA, Reis HD. Parámetros genéticos de Progenies híbridas F₁ entre *Pinus elliottii* var. *elliottii* y *P. caribaea* var. *hondurensis* generadas en Argentina. In: *Actas: 4º Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano Iguazú, Misiones, Argentina.* 2013.
9. IRAM 9662-3. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y elliotti (*Pinus taeda* y *elliottii*). Inst Argentino Norm y Certificación, Buenos Aires. 2015;1–15.
10. IRAM 9670. Madera estructural. Clasificación y requisitos. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos del noreste argentino mediante una evaluación visual. Inst Argentino Norm y Certificación, Buenos Aires. 2002;1–52.
11. Acevedo P, Winck RA, Suirezs MT, Gauchat ME, Belaber E. Compresión paralela y tracción perpendicular de la madera de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *P. caribaea* var. *hondurensis*. XXX Jornadas Forestales de Entre Ríos. 2016. 1–5 p.
12. Klein EH. Variación radial y longitudinal del leño de *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Morelet cultivado en el Nordeste de Misiones, Argentina. *Univ Nac Misiones.* 2018;44.
13. Pereyra O, Suirezs TM, Bobadilla EA, Weber EM, Gamarra NG. Estudio de los pesos específicos aparentes, contracciones, hinchamiento, anisotropía y punto de saturación de fibras de la madera del híbrido *Pinus elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. In III

- Congreso Iberoamericano de Productos Forestales. Buenos Aires; Argentina.; 2007.
14. Winck RA, Winck LR, Belaber EC, Aquino DR, Fassola HE, Área MC, et al. Parámetros indicadores de la calidad estructural de familias de pino híbrido F₁ INTA-PINDO. XXXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. 2021. 193–197 p.
 15. Rotundo CA. Estimación de parámetros genéticos de la calidad de la madera en árboles de pino híbrido (*Pinus elliotii* var. *elliotii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*) utilizando metodologías no destructivas. FCEQyN-FCF. Universidad Nacional de Misiones; 2021.
 16. Guillaumet AA, Manavella RD, Filippetti MC, Armas A. Caracterización del híbrido *Pinus elliotii* var. *elliotii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* “ F₂ ” para su utilización en vigas laminadas encoladas. CIMAD 11 – 1º Congr Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção, Coimbra, Port. 2011;1–8.
 17. Alvarez, E., y Lerda FE. Determinación experimental de la anisotropía, punto de saturación de las fibras y pesos específicos aparentes de la madera del híbrido *Pinus elliotii* var. *Elliotii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* cultivada en Misiones. Vol. 6, XXV Jornadas Forestales de Entre Ríos Concordia. 2011. p. 1–6.
 18. Winck RA, Area MC, Belaber EC, Aquino DR, Fassola HE. Caracterización morfológica de las traqueidas de pino híbrido de rápido crecimiento. Maderas Cienc y Tecnol. 2022;24(44):1–22.
 19. Winck RA, Area MC, Belaber EC, Aquino DR, Fassola HE, Gauchat ME. Densidad aparente estacionada del pino híbrido F₁ INTA-PINDO de 11 años de edad. VIII Congreso Forestal Latinoamericano. V Congreso Forestal Argentino; 2023. 577–580 p.
 20. Winck, R.A.; Area, M.C.; Aquino, D.R.; Fassola, H.E.; Keller, A. E.; Bragaño, A.; Gauchat ME. Módulo de elasticidad estático y dinámico en tablas de escuadrías comerciales de pino híbrido. XXXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos; 2022. 133–137 p.
 21. Gapare WJ, Ivković M, Baltunis BS, Matheson CA, Wu HX. Genetic stability of wood density and diameter in *Pinus radiata* D. Don plantation estate across Australia. Tree Genet Genomes. 2010;6(1):113–25.
 22. Fox TR, Jokela EJ, Allen HL. The development of pine plantation silviculture in the Southern United States. J For. 2007;105(7):337–47.
 23. Burdon RD, Paul Kibblewhite R, Walker JCF, Megraw RA, Evans R, Cown DJ. Juvenile versus mature wood: A new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to *Pinus radiata* and *P. taeda*. For Sci. 2004;50(4):399–415.
 24. Fank PY. Caracterización físico-mecánica del pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliotii*) cultivado en el nordeste argentino para uso estructural. Universidad Tecnología Nacional. Facultad Regional Concepción del Uruguay; 2018.
 25. Ballarin, A.; Ballarin, A.; Calil Júnior C. Classificação visual e mecânica simplificada da

- madeira de Pinus spp. II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera y II Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción, Buenos Aires, Argentina. 2017. 1–11 p.
26. Moya L, Domenech L, Cardoso A, Oneill H, Baño V. Proposal of visual strength grading rules for Uruguayan pine timber. *Eur J Wood Wood Prod.* 2017;75(6):1017–9.
 27. Merlo E, Alvarez-Gonzalez JG, Santaclara O, Riesco G. Modelling modulus of elasticity of *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain with standing tree acoustic measurements, tree, stand and site variables. *For Syst.* 2014;23(1):153–66.
 28. Matheson AC, Dickson RL, Spencer DJ, Joe B, Ilic J. Acoustic segregation of *Pinus radiata* logs according to stiffness. *Ann For Sci.* 2002;59(5–6):471–7.
 29. Evison DC, Apiolaza LA. Incorporating economic weights into radiata pine breeding selection decisions. *Can J For Res.* 2015;45(1):135–40.
 30. Wang X, Carter P, Ross RJ, Brashaw BK. Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials - A path to increased profitability. *For Prod J.* 2007;57(5):6–14.
 31. Wang X. Acoustic measurements on trees and logs: A review and analysis. *Wood Sci Technol.* 2013;47(5):965–75.
 32. Matheson AC, Gapare WJ, Ilic J, Wu HX. Inheritance and genetic gain in wood stiffness in radiata pine assessed acoustically in young standing trees. *Silvae Genet.* 2008;57(2):56–64.
 33. Bucur V. *Acoustics of wood.* 2da Ed. Timell TE, Wimmer R, editors. Springer; 2006. 403 p.
 34. Wessels CB, Malan FS, Rypstra T. A review of measurement methods used on standing trees for the prediction of some mechanical properties of timber. *Eur J For Res.* 2011;130(6):881–93.
 35. Legg M, Bradley S. Measurement of stiffness of standing trees and felled logs using acoustics: A review. *J Acoust Soc Am* [Internet]. 2016;139(2):588–604. Available from: <http://dx.doi.org/10.1121/1.4940210>
 36. Eckard, J.T., Isik, F., Bullock, B., Li, B., & Gumpertz M. Selection Efficiency for Solid Wood Traits in. *For Sci.* 2010;56(3):233–41.
 37. Chen ZQ, Karlsson B, Lundqvist SO, García Gil MR, Olsson L, Wu HX. Estimating solid wood properties using Pilodyn and acoustic velocity on standing trees of Norway spruce. *Ann For Sci.* 2015;72(4):499–508.
 38. Chen ZQ, Gil MRG, Karlsson B, Lundqvist SO, Olsson L, Wu HX. Inheritance of growth and solid wood quality traits in a large Norway spruce population tested at two locations in southern Sweden. *Tree Genet Genomes.* 2014;10(5):1291–303.
 39. Hong Z, Fries A, Lundqvist SO, Andersson Gull B, Wu HX. Measuring stiffness using acoustic tool for Scots pine breeding selection. *Scand J For Res.* 2015;30(4):363–72.

40. Auty D, Achim A. The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands. *Forestry*. 2008;81(4):475–87.
41. Lasserre JP, Mason EG, Watt MS. Assessing corewood acoustic velocity and modulus of elasticity with two impact based instruments in 11-year-old trees from a clonal-spacing experiment of *Pinus radiata* D. Don. *For Ecol Manage*. 2007;239(1–3):217–21.
42. Gapare WJ, Baltunis BS, Ivković M, Wu HX. Genetic correlations among juvenile wood quality and growth traits and implications for selection strategy in *Pinus radiata* D. Don. *Ann For Sci*. 2009;66(6):606–606.
43. Dungey HS, Matheson AC, Kain D, Evans R. Genetics of wood stiffness and its component traits in *Pinus radiata*. *Can J For Res*. 2006;36(5):1165–78.
44. Merlo E, Caballé G, Santaclara O, Leza FJL. Selección genética de procedencias de *Pinus pinaster* por crecimiento y calidad de madera para uso estructural en edades tempranas. II Congr Latinoam Estructuras Madera. 2017;1–9.
45. Yin, Y., Bian, M., Song, K., Xiao, F., & Xiaomei J. Influence of microfibril angle on within-tree variations in the mechanical properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*). *IAWA J*. 2011;32(4):431–42.
46. Evans R, Ilic J. Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. *For Prod J*. 2001;51(3):53–7.
47. Watt MS, Sorensson C, Cown DJ, Dungey HS. Determining the main and interactive effect of age and clone on wood density , microfibril angle , and modulus of elasticity for *Pinus radiata*. *Can J For Res*. 2010;40(8):1550–7.
48. MAGyP, MECCyT, SAyDS, Presidencia de la Nación Argentina. Plan estratégico forestal y foresto industrial Argentina 2030 [Internet]. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP). Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 2019. p. 1–180. Available from: <https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/sycf/publicacion-forestales-11-diciembre-2019.pdf>
49. Secretaria de Agroindustria. Sector Forestal 2017. 2018. p. 41.
50. Belaber EC, Gauchat ME, Reis HD, Borralho NM, Cappa EP. Genetic parameters for growth, stem Straightness, and branch quality for *Pinus elliotii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* F 1 hybrid in Argentina. *For Sci*. 2018;64(6):595–608.
51. Belaber EC. Parámetros genéticos en progenies híbridas F₁ de *Pinus elliotii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* y su utilización en un programa de mejora en el noreste argentino. *Univ Nac Misiones*. 2016;143.
52. Walker JCF. Primary wood processing: principles and practice. 2da Ed. University of Canterbury C, Zealand N, editors. Published by Springer, P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands.; 2006. 603 p.

53. Gonzales del Campo M del M. Desarrollo de materiales biohíbridos funcionales mediante ensamblado de nanofibras de celulosa y sepiolita. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias. Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM), CSIC. PP 196. 2017.
54. Rowland SP, Roberts EJ. The nature of accessible surfaces in the microstructure of cotton cellulose. *J Polym Sci Part A-1 Polym Chem.* 1972;10(8):2447–61.
55. Panshin AJ, De Zeeuw C. Textbook of wood technology. Structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada. 4ta Ed. New York, McGraw-Hill; 1980.
56. Butterfield B. Microfibril angle in wood: Proceedings of the IAWA/IUFRO International Workshop on the Significance of Microfibril Angle to Wood Quality. Butterfield B., editor. Westport, New Zealand, November, 1997. Christchurch; 1998. 410 p.
57. Donaldson L. Microfibril angle: Measurement, variation and relationships - A review. *IAWA J.* 2008;29(4):345–86.
58. Walker JCF, Butterfield BG. The importance of microfibril angle for the processing industries. *New Zeal For.* 1995;40(November):34–40.
59. Winck RA, Fassola HE, Tomazello MF, Area MC. Case study: Microfibril angle and its relationship with basic density in *Pinus taeda* L. wood from silvopastoral systems. *O Pap.* 2013;74(5):55–61.
60. Deresse, T.; Shepard, R.K.; Shaler SM. Microfibril angle variation in red pine (*Pinus resinosa* Ait.) and its relation to the strength and stiffness of early juvenile wood. *For Prod J.* 2003;53((7/8)):34–40.
61. Donaldson LA. Effect of physiological age and site on microfibril angle in *Pinus radiata*. *IAWA J.* 1996;17(4):421–9.
62. Watt MS, Clinton PW, Coker G, Davis MR, Simcock R, Parfitt RL, et al. Modelling the influence of environment and stand characteristics on basic density and modulus of elasticity for young *Pinus radiata* and *Cupressus lusitanica*. *For Ecol Manage.* 2008;255(3–4):1023–33.
63. Coronel E. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. 1ra parte: Fundamentos de las propiedades mecánicas de las maderas. Instituto de Tecnología de la Madera, editor. Santiago del Estero, Argentina.; 1994. 335 p.
64. Deucox V, Varcin É, Leban JM. Relationships between the intra-ring wood density assessed by X-ray densitometry and optical anatomical measurements in conifers. Consequences for the cell wall apparent density determination. *Ann For Sci.* 2007;61(3):251–62.
65. Cato S, McMillan L, Donaldson L, Richardson T, Echt C, Gardner R. Wood formation from the base to the crown in *Pinus radiata*: Gradients of tracheid wall thickness, wood

- density, radial growth rate and gene expression. *Plant Mol Biol.* 2006;60(4):565–81.
66. Forest Products Laboratory. Wood handbook - Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory USDA-General Technical Report FPL–GTR–190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service; 2010. 508 p.
 67. IRAM 9663. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.; 2013.
 68. Coronel E. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. 2º parte: Fundamentos de las propiedades mecánicas de las maderas. Instituto de Tecnología de la Madera, editor. Santiago del Estero, Argentina.; 1994. 335 p.
 69. Schimleck L, Antony F, Dahlen J, Moore J. Wood and fiber quality of plantation-grown conifers: A summary of research with an emphasis on loblolly and radiata pine. In: *Forests.* 2018.
 70. Zobel, B.J.; Van Buijtenen JP. Wood variation: its causes and control. Springer-V. Berlin, Germany; 1989. 363 p.
 71. Burdon RD, Moore JR. Adverse genetic correlations and impacts of silviculture involving wood properties: Analysis of issues for radiata pine. *Forests.* 2018;9(6).
 72. Wu, H.; McRae T.; Southerton, S.; Gapare, W.; Baltunis, B.; Li, X.; Dillon, S.; Ivkovic, M.; Powell, M.; Dieters, M.; Harding, K.; Matherson, C.; Ilic J. Quantitative and molecular genetics of juvenile wood traits in radiata and slash / Caribbean pines [Internet]. Vol. 61. Forest & Wood Products Australia.; 2009. 309 p. Available from: <https://www.fwpa.com.au/resources/reports/resources/85-quantitative-and-molecular-genetics-of-juvenile-wood-traits-in-radiata-and-slash-caribbean-pines.html>
 73. Treacy M, Evertsen J, Dhubháin ÁN. A comparison of mechanical and physical wood properties of a range of *Sitka spruce* provenances. *COFORD (National Council For Res Dev.* 2000;40.
 74. López JA. Mejoramiento genético de la calidad de la madera. In: *I Jornada Sobre Potencial Foresto-Industrial del Eucalipto en Santiago del Estero.* 2005. p. 1–6.
 75. Long JM, Conn AB, Batchelor WJ, Evans R. Comparison of methods to measure fibril angle in wood fibres. *Appita J.* 2000;53:206–9.
 76. Hein PRG, Lima JT. Relationships between microfibril angle, modulus of elasticity and compressive strength in *Eucalyptus* wood. *Maderas Cienc y Tecnol.* 2012;14(3):267–74.
 77. Hein PRG, Silva JRM, Brancheriau L. Correlations among microfibril angle, density, modulus of elasticity, modulus of rupture and shrinkage in 6-year-old *Eucalyptus urophylla* × *e. grandis*. *Maderas Cienc y Tecnol.* 2013;15(2):171–82.
 78. Xu J, Lu J, Bao F, Evans R, Downes G, Huang R, et al. Cellulose microfibril angle

- variation in *Picea crassifolia* tree rings improves climate signals on the Tibetan plateau. *Trees - Struct Funct.* 2012;26(3):1007–16.
79. Xu J, Lu J, Bao F, Evans R, Downes GM. Climate response of cell characteristics in tree rings of *Picea crassifolia*. *Holzforschung.* 2013;67(2):217–25.
 80. Xu J, Lu J, Evans R, Downes GM. Climatic signal in cellulose microfibril angle and tracheid radial diameter of *Picea crassifolia* at different altitudes of the Tibetan plateau, northwest China. *Wood Sci Technol.* 2015;49(6):1307–18.
 81. Barnett JR, Bonham VA. Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. *Biol Rev Camb Philos Soc.* 2004;79(2):461–72.
 82. Larson PR, Kretschmann DE, Clark III A, Isebrands JG. Formation and properties of juvenile wood in Southern Pines A Synopsis. *Gen. Tech.* 2001.
 83. Gorman TM, Kretschmann DE, Green DW, Wiemann MC. Effect of site characteristics on juvenile wood transition in lodge pole pine in the inland northwest. *Wood Fiber Sci.* 2018;50(2):180–92.
 84. Winck RÁ, Fassola HE, Área MC. Efecto del raleo sobre las propiedades anatómicas de la madera de *Pinus taeda*. *Maderas Cienc y Tecnol.* 2015;17(2):391–406.
 85. Harding, K.J., Copely, T.R., Toon, P.G.; Dieters MJ. IUFRO Forest Genetics Meeting Proceedings 1. In 2004. p. 1–490.
 86. Kojima Y, Yamamoto H. Effect of microfibril angle on the longitudinal tensile creep behavior of wood. *J Wood Sci.* 2004;50(4):301–6.
 87. Fabisiak E, Moliński W. Variation in the microfibril angle in the tangential walls of the larch wood tracheids (*Larix decidua* Mill.) from plantation culture. *Folia For Pol.* 2007;38:41–53.
 88. Lenz P, MacKay J, Rainville A, Cloutier A, Beaulieu J. The influence of cambial age on breeding for wood properties in *Picea glauca*. *Tree Genet Genomes.* 2011;7(3):641–53.
 89. Moore JR, Nanayakkara B, Mckinley RB, Garrett LG. Effects of nutrient removal by harvesting practices and fertiliser addition on end-of-rotation radiata pine wood quality. *For Ecol Manage* [Internet]. 2021;494:119269. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119269>
 90. Wang H, Kimberley MO, Magesan GN, Mckinley RB, Lee JR, Lavery JM, et al. Midrotation effects of biosolids application on tree growth and wood properties in a *Pinus radiata* plantation Related papers growth and wood properties in a *Pinus radiata* plantation. *Can J For Res.* 2006;36(8):1921–30.
 91. Watt MS, Trincado G. Modelling the influence of environment on basic density of the juvenile wood for *Pinus radiata* grown in Chile. *For Ecol Manage* [Internet]. 2019;448:112–8. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.001>
 92. Krajnc L, Farrelly N, Harte AM. The influence of crown and stem characteristics on

- timber quality in softwoods. For Ecol Manage. 2019 Mar 1;435:8–17.
93. Ruano A, Hermoso E. Juvenile-mature Wood Evaluation Along the Bole Considering the Influence of Silvicultural Treatments. *Maderas Cienc y Tecnol.* 2021;23(21):1–10.
 94. Lasserre JP, Mason EG, Watt MS, Moore JR. Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood. For Ecol Manage. 2009 Oct 10;258(9):1924–31.
 95. Gapare WJ, Wu HX, Abarquez A. Genetic control of the time of transition from juvenile to mature wood in *Pinus radiata* D. Don. *Ann For Sci.* 2006;63(8):871–8.
 96. Apiolaza LA, Butterfield B, Chauhan SS, Walker JCF. Characterization of mechanically perturbed young stems: Can it be used for wood quality screening? *Ann For Sci.* 2011;68(2):407–14.
 97. Cown DJ, Hebert J, Ball R. Modelling *Pinus radiata* lumber characteristics. Part 1: Mechanical properties of small clears. 1999;29(2):203–13.
 98. Lenz P, Auty D, Achim A, Beaulieu J, Mackay J. Genetic improvement of white spruce mechanical wood traits-early screening by means of acoustic velocity. 2013;4:575–94. Available from: www.mdpi.com/journal/forestsArticle
 99. Nanayakkara B, Lagane F, Hodgkiss P, Dibley M, Smaill S, Riddell M, et al. Effects of induced drought and tilting on biomass allocation, wood properties, compression wood formation and chemical composition of young *Pinus radiata* genotypes (clones). *Holzforschung.* 2014;68(4):455–65.
 100. Emms GW, Nanayakkara B, Harrington JJ. Application of longitudinal-wave time-of-flight sound speed measurement to *Pinus radiata* seedlings. *Can J For Res.* 2013;43(8):750–6.
 101. Roth BE, Li X, Huber DA, Peter GF. Effects of management intensity, genetics and planting density on wood stiffness in a plantation of juvenile loblolly pine in the southeastern USA. For Ecol Manage. 2007 Jul 31;246(2–3):155–62.
 102. Ross RJ, Pellerin RF, Salsig WW, Falk RH. Inspection of timber bridges using stress wave timing nondestructive evaluation tools. For Prod Lab USDA-General Tech Rep FPL–GTR–114. 1999;17.
 103. Ross RJ, Pellerin RF. Nondestructive evaluation of wood. Second Ed. Department of Agriculture, Forest Service FPL, editor. General Technical Report FPL-GTR-238. Madison, WI: U.S. Madison, WI: U.S.; 2015. 169 p.
 104. Íñiguez González G. Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Dep Construcción y Vías Rural Esc Técnica Super Ing Montes Univ politécnica Madrid. 2007;1–236.
 105. Musa J. Application of Acoustic Emission (AE) technique in various materials (metals,

- woods and bricks). University Malaysia Sarawak; 2002.
106. Gholizadeh S, Lemana Z, Baharudin BTHT. A review of the application of acoustic emission technique in engineering. Vol. 54, Structural Engineering and Mechanics. 2015. 1075–1095 p.
 107. SilviScan [Internet]. [cited 2022 Mar 30]. Available from: <http://www.silviscan.com>
 108. Meder R, Thumm A, Marston D. Sawmill trial of at-line prediction of recovered lumber stiffness by NIR spectroscopy of *Pinus radiata* cants. J Near Infrared Spectrosc. 2003;11(2):137–43.
 109. Hanhijärvi A, Ranta-Maunus A, Turk G. Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques: Report of the Combigrade-project - Phase 1. VTT Publications. 2005. 3–81 p.
 110. Argüelles Álvarez R, Arriaga Martitegui F. Estructuras de madera: diseño y cálculo. AITIM – Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera y Corcho, editor. Madrid, España.; 2000. 650 p.
 111. UNE 56544. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de Coníferas. Asociación Española de Normalización y Certificación.; 2011.
 112. SPIB. Standard Grading Rules for Southern Pine Lumber. Southern Pine Inspection Bureau. Florida, EEUU; 2014.
 113. SPIB. Standard Grading Rules for Southern Pine Lumber. Southern Pine Inspection Bureau. Florida, EEUU.; 1994.
 114. Wang X, Ross RJ, Erickson JR, Forsman JW, McClellan JW, Barbour RJ, et al. Nondestructive evaluation of standing trees with stress wave methods. Stress Int J Biol Stress. 2000;33(October):11.
 115. Hasegawa M, Takata M, Matsumura J, Oda K. Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood. Ultrasonics. 2011;51(3):296–302.
 116. Graff K. Wave motion in elastic solids. Dover Publ. New York.; 1991. 649 p.
 117. Bucur V. Relationship between grain angle of wood specimens and ultrasonic velocity. Catgut Acoust Soc Inc. 1984;41:30–5.
 118. Ross R. J. and Pellerin R.F. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review. Forest Products Laboratory US Department of Agriculture. Madison; 1994. 40 p.
 119. Chauhan SS, Walker JCF. Variations in acoustic velocity and density with age, and their interrelationships in radiata pine. For Ecol Manage. 2006;229(1–3):388–94.
 120. Grabianowski M, Manley B, Walker JCF. Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber. Wood Sci Technol. 2006;40(3):205–16.
 121. Hitman HM200 [Internet]. [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.fibre-gen.com/>

122. Fakopp [Internet]. [cited 2022 Mar 31]. Available from: <https://www.fakopp.com/es/>
123. F D. Course in Nondestructive testing of wood. Apuntes y presentaciones del curso. In: ETS Ingenieros de Montes-ETS Arquitectura, UPM, Madrid. 2005.
124. Metriguard. <https://www.metriguard.com>.
125. Silva F, Haberle TJ, Müller H, Münz R, Visentini JM. Normales del clima de la región de Montecarlo. XVIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. 2019. 526–528 p.
126. Pérez López C. Muestreo estadístico: conceptos y problemás resueltos. 1ra ed. Editorial Alhambra, editor. 2005. 392 p.
127. Franklin GL. Permanent preparations of macerated wood fibers. Trop Woods. 1937;49:21–2.
128. Huang, C.L.; Kutscha, N.P.; Leaf, G.J.; Megraw RA. Comparison of microfibril angle measurement techniques. In: IAWA and IUFRO. Butterfield, B.G (ed.). Microfibril angle in wood. IAWA and IUFRO: Christchurch, New Zealand. pp. 177-205; 1997.
129. Yin, Y.; Song, K.; Liu, B.; Jiang X. Variation of microfibril angle in plantation trees of *Cunninghamia lanceolata* determined by pit apertures and x-ray diffraction. IAWA J. 2011;32(1):77–87.
130. IAWA. International Association of Wood Anatomy. List of microscopic features for softwood identification. IAWA J. 2004;25(1):1–70.
131. Johansson T, Hjelm B. Frequency of false heartwood of stems of poplar growing on farmland in Sweden. Forests. 2013;4(1):28–42.
132. Winck RA, Winck LR, Belaber EC, Aquino DR, Aréa MC, Gauchat ME. Colored area, growth-ring width, and latewood percentage in Hybrid Pine F₁ INTA-PINDO. Floresta. 2023;53(2):204–13.
133. IRAM 9532. Método de determinación de humedad. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales; 1973. p. 11.
134. IRAM 9544. Norma para métodos de determinación de densidad aparente en maderas. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales; 1973. p. 6.
135. Sobue N. Measurement of young's modulus by the transient longitudinal vibration of wooden beams using a fast Fourier transformation spectrum analyzer. Mokuzai Gakkaishi. 1986;32(9):744–7.
136. Metriguard. Model 340 E-Computer Operation & Maintenance Manual. Metriguard Inc. SE, 1120. SE Latah Street.; 2002. 65 p.
137. UNE-EN 408. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de propiedades físicas y mecánicas. Madrid, España.; 2004. p. 34.
138. IRAM 9543. Método de determinación de las contracciones totales, axial, radial y tangencial y punto de saturación de las fibras. Instituto Argentino de Racionalización de

- Materiales; 1966. p. 4.
139. IRAM 9664. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.; 2013. p. 1–18.
 140. González A, Palazón A. Ensayos industriales de materiales combustibles y lubricantes. Buenos Aires: Talleres gráficos Buschi; 1955. 390 p.
 141. www.statgraphics.com.
 142. Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. RCW. InfoStat. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.; 2020.
 143. Di Rienzo JA, Macchiavelli R, Casanoves F. Modelos lineales mixtos. Aplicaciones en InfoStat. 2017. 253 p.
 144. Balzarini M, Macchiavelli R, Casanoves F. Aplicaciones de Modelos Mixtos en Agricultura y Forestería. Curso de Capacitacion Centro Agronomico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE. 2004;189.
 145. Bandera-Fernández E, Pérez-Pelea L. Los modelos lineales generalizados mixtos. Su aplicación en el mejoramiento de plantas. Cultiv Trop. 2018;39(1):127–33.
 146. Di Rienzo JA, Guzmán AW, Casanoves F. A multiple-comparisons method based on the distribution of the root node distance of a binary tree. J Agric Biol Environ Stat. 2002;7(2):129–42.
 147. Software R. Studio 3.6.3 [Internet]. Available from: <http://www.r-project.org/>
 148. Di Rienzo JA, Macchiavelli RE, Casanoves F. Modelos lineales generalizados mixtos. Aplicaciones en InfoStat. 2017. 104 p.
 149. Wood SN. Generalized additive models: an introduction with R. 2nd. Edition. CRC 545 Press, Florida, U.S.; 2017. 497 p.
 150. Schneider, P. R y Tonini H. Utilização de variáveis dummy em equações de volume para *Acacia mearnsii* De Wild. Ciência Florest. 2003;13(2):121–9.
 151. Winck RA, Fassola HE, Barth SR, Crechi EH, Keller AE, Videla D, et al. Modelos predictivos de biomasa aérea de *Eucalyptus grandis* para el noreste de Argentina. Ciência Florest. 2015;25(3):595–606.
 152. Huang S., Yang, Y., Wang, Y. A critical look at procedures for validating growth and yield models. In En: Amaro A., Reed D., Soares P. (Eds.) Modelling Forest Systems. CABI-Publishings, Wallingford.; 2003. p. 271–93.
 153. Essien C, Cheng Q, Via BK, Loewenstein EF, Wang X. An acoustics operations study for Loblolly pine (*Pinus taeda*) standing saw timber with different thinning history. Vol. 11, BioResources. 2016. 7512–7521 p.
 154. Briggs DG, Thienel G, Turnblom EC, Lowell E, Dykstra D, Ross RJ, et al. Influence of

- thinning on the acoustic velocity of Douglas fir trees in western Washington and Western Oregon. In: Proceedings of the 15th international symposium on nondestructive testing of wood [Internet]. Duluth, Minnesota-USA, pp 113–123; 2008. Available from: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/33743>
155. Raczkowski J, Helińska-Raczkowska L, Moliński W. Relationship between lengthwise ultrasound transmission and tracheid length in wood of selected softwood species. *Fol For Pol Ser B*. 2004;35:3–12.
 156. Pelizan TR. Estudo de propriedades mecânicas de peças roliças de Eucalipto Citriodora utilizando a técnica de ultra-som. Tesis doctoral, Universidade de São Paulo; 2004.
 157. Bucur V. Acoustics of wood. 1ra Ed., editor. CRC Press, Boca Raton; 1995. 300 p.
 158. Ribeiro PG, González JC, Gonçalves R, Faustino Teles R, de Souza F. Ultrasound waves for assessing the technological properties of *Pinus caribaea* var *hondurensis* and *Eucalyptus grandis* wood. *Maderas Cienc y Tecnol*. 2013;15(2):195–204.
 159. Alfredsen G, Larnøy E, Militz H. Dynamic MOE testing of wood: The influence of wood protecting agents and moisture content on ultrasonic pulse and resonant vibration. *Wood Res*. 2006;51(1):11–20.
 160. Jones TG, Emms GW. Influence of acoustic velocity, density, and knots on the stiffness grade outturn of radiata pine logs. *Wood Fiber Sci*. 2010;42(1):1–9.
 161. Wessels CB, Dowse GP, Smit HC. The flexural properties of young *Pinus elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* timber from the Southern Cape and their prediction from acoustic measurements. *South For*. 2011;73(3–4):137–47.
 162. Harding KJ, Nester MR, Dieters MJ, Zbonak A. and, Copley TR. Managing subtropical exotic pine plantations for improved wood production. Vol. 61. *Forest & Wood Products Australia*.; 2010. 115 p.
 163. Wang X, Ross RJ, Brashaw BK, Panches J, Erickson JR, Forsman JW, et al. Diameter effect on stress-wave evaluation of modulus of elasticity of logs. *Wood Fiber Sci*. 2004;36(3):368–77.
 164. Lasserre JP, Mason EG, Watt MS. The effects of genotype and spacing on *Pinus radiata* [D. Don] corewood stiffness in an 11-year old experiment. *For Ecol Manage*. 2005;205(1–3):375–83.
 165. Carson SD, Cown DJ, McKinley RB, Moore JR. Effects of site, silviculture and seedlot on wood density and estimated wood stiffness in radiata pine at mid-rotation. *New Zeal J For Sci*. 2014;44(1):1–12.
 166. Li X, Huber DA, Powell GL, White TL, Peter GF. Breeding for improved growth and juvenile corewood stiffness in slash pine. *Can J For Res*. 2007;37(10):1886–93.
 167. Winck RA, Rotundo CA, Aquino DR, Gauchat ME, Area MC, Belaber E, et al. Medición del tiempo de propagación de ondas para estimar rigidez de árboles en pie de Pino

- híbrido F₁ INTA-PINDO. XVIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. 2019. 465–467 p.
168. Winck RA, Gauchat ME, Area MC, Belaber EC, Fassola HE. Caracterización de la madera de familias de pino híbrido F₁ INTA-PINDO (*Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*) mediante métodos no destructivos. In: Caracterizar 2020 Caracterización de Materiales IQUIMEFA-UBA-CONICET, Facultad de Farmacia y Bioquímica, UBA-176 pg. 2020. p. 176.
 169. Rotundo C., Winck RA, Aquino DR, Gauchat ME, Belaber E. Evaluación operativa de una metodología no destructiva para la determinación del módulo de elasticidad dinámico del Pino híbrido F₁. XVIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. 2019. 89–91 p.
 170. Bucur V. Acoustics of wood. In: 13th International Congress on Sound and Vibration 2006, ICSV 2006. 2006. p. 89–104.
 171. Harding KJ, Copley TR, Peters RF, Dieters MJ, Nester MR, Keys MG, et al. Selecting hybrid pine clones for deployment - The pointy end of wood quality improvement. New Zeal J For Sci. 2008;38(1):120–31.
 172. Winck RA, Suirezs MT, Aquino DR, Fassola HE, Videla D. Relación entre módulo de elasticidad y densidad de la madera de *Pinus taeda* Relationship between elasticity modulus and density of *Pinus taeda* wood. XVII Jornadas Técnicas For y Ambient. 2016;400–2.
 173. Íñiguez González GI, Arriaga Martitegui F, Herrero ME, Argüelles Álvarez R. Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. Inf la Construcción. 2007;59(506):97–105.
 174. Hermoso Prieto E. Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid, España.; 2001.
 175. Piter JC. Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural. Desarrollo de un método para el *Eucalyptus grandis* de Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ingeniería. Buenos Aires, Argentina.; 2003.
 176. Kumar M, Saranpää P, Barnett JR, Wilkinson MJ. Juvenile-mature wood transition in pine: Correlation between wood properties and candidate gene expression profiles. Euphytica. 2009;166(3):341–55.
 177. Winck RA, Winck LR, Belaber EC, Aquino DR, Area MC, Gauchat ME. Coloración en zona central de la troza, ancho de anillos de crecimientos y porcentaje de leño tardío en pino híbrido F₁ INTA-PINDO (*Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var.

- hondurensis*). Floresta. 2023;
178. Essien C, Via BK, Acquah G, Gallagher T, McDonald T, Eckhardt L. Effect of genetic sources on anatomical, morphological, and mechanical properties of 14-year-old genetically improved loblolly pine families from two sites in the southern United States. *J For Res* [Internet]. 2018;29(6):1519–31. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0584-3>
 179. Saucedo-Ibarra J, Borja-de la Rosa A, Lima JT, Corona-Ambriz A, Machuca-Velasco R. Efecto del ángulo microfibrilar en las características tecnológicas de la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*. *Maderas Cienc y Tecnol*. 2022;24:1–31.
 180. Li Y, Dungey H, Yanchuk A, Apiolaza LA. Improvement of non-key traits in radiata pine breeding programme when long-term economic importance is uncertain. *PLoS One*. 2017;1–15.
 181. Yang BZ, Seale RD, Shmulsky R, Dahlen J, Wang X. Comparison of nondestructive testing methods for evaluating No. 2 southern pine lumber: Part A, modulus of elasticity. *Wood Fiber Sci*. 2015;47(4):375–84.
 182. Yang BZ, Seale RD, Shmulsky R, Dahlen J, Wang X. Comparison of nondestructive testing methods for evaluating no. 2 southern pine lumber: Part B, modulus of rupture. *Wood Fiber Sci*. 2017;49(2):134–45.
 183. França TSFA, França FJN, Seale RD, Shmulsky R. Bending strength and stiffness of No. 2 grade southern pine lumber. *Wood Fiber Sci*. 2018;50(2):1–15.
 184. Videla, D., Fassola, H.E., Winck Rc de tablas de *P taeda* para uso estructural por método vibración transversal y su validación con ensayos destructivos en maquina universal. . A. Clasificación de tablas de *Pinus taeda* para uso estructural por método vibración transversal y su validación con ensayos destructivos en maquina universal. 4º Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. 2013. 1 p.
 185. Pošta J, Ptáček P, Jára R, Terebesyová M, Kuklík P, Dolejš J. Correlations and differences between methods for non-destructive evaluation of timber elements. Vol. 61, *Wood Res*. 2016. 129–140 p.
 186. Hassan KTS, Horáček P, Tippnera J. Evaluation of stiffness and strength of scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques. *BioResources*. 2013;8(2):1634–45.
 187. Yin Y, Nagao H, Liu X, Nakai T. Mechanical properties assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantation wood with three acoustic-based nondestructive methods. *J Wood Sci*. 2010;56(1):33–40.
 188. Villasante A, Iniguez-Gonzalez G, Puigdomenech L. Comparison of various multivariate models to estimate structural properties by means of non-destructive techniques (NDTs) in *Pinus sylvestris* L. timber. *Holzforschung*. 2019;73(4):331–8.

189. Teranishi M, Koizumi A, Hirai T. Evaluation of quality indexes of bending performance and hardness for hardwoods. *J Wood Sci.* 2008;54(5):423–8.
190. Mora CR, Schimleck LR, Mahon JM, Isik F, Mahon JM, Clark A, et al. Relationships between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees. *Can J For Res.* 2009;39(8):1421–9.
191. Winck RA, Fassola HE, Videla D, Suirezs TM, Area MC, Pezzutti R. Calidad de rollizos y de tablas de *Pinus taeda* en rodales con distintas densidades finales a los 20 años de edad. VIII Congreso Internacional de Sistemas Agroforestales- III Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles; 2015. p. 372–6.
192. Chauhan S, Sethy A. Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. *Maderas Cienc y Technol.* 2016;18(2):373–82.
193. Chauhan SS, Entwistle KM, Walker JCF. Differences in acoustic velocity by resonance and transittime methods in an anisotropic laminated wood medium. *Holzforschung.* 2005;59(4):428–34.
194. Divós F, Tanaka T. Relation Between Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Wood. *Acta Silv Lign Hung.* 2005;1:105–10.
195. Yang BZ, Seale RD, Shmulsky R, Dahlen J, Wang X. Comparison of nondestructive testing methods for evaluating no. 2 southern pine lumber: Part B, modulus of rupture. *Wood Fiber Sci.* 2017;49(2):134–45.
196. França, F. J., Seale, R. D., Ross, R. J., Shmulsky, R., & França TSA. Using transverse vibration nondestructive testing techniques to estimate stiffness and strength of southern pine lumber. Res. Paper FPL-RP-695. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.; 2018. 8 p.
197. França FJN, Seale RD, Shmulsky R, França TSFA. Assessing southern pine 2x4 and 2x6 lumber quality: longitudinal and transverse vibration. *Wood Fiber Sci.* 2019;51(1):1–14.
198. França FJN, França TSFA, Daniel Seale R, Shmulsky R. Nondestructive evaluation of 2 by 8 and 2 by 10 southern pine dimensional lumber. *For Prod J.* 2020;70(1):79–87.
199. Wang SY, Chen JH, Tsai MJ, Lin CJ, Yang TH. Grading of softwood lumber using non-destructive techniques. *J Mater Process Technol.* 2008;208(1–3):149–58.
200. Pazlar, T., Srpčič, J., Plos, M., & Turk G. Non-destructive tests for strength grading of Slovenian structural sawn timber. In *Proceedings of the 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium* (p. 231-238).; 2011. p. 8.
201. Dowse GP. Selected mechanical properties and the structural grading of young *Pinus patula* sawn timber. Tesis de Maestría, University of Stellenbosch, Faculty of AgriSciences. Stellenbosch, South Africa.; 2010.

202. Ramos R, Villalba D, Gómez R, Zitto AS, Piter JC. Comportamiento mecánico y densidad de la madera de pino resinoso cultivado en Entre Ríos: análisis comparativo de los resultados obtenidos para 2 plantaciones de distinta edad. In: XXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos. 2015. p. 1–5.
203. SANS 10163-1. The structural use of timber. Part 1: Limit-states design. South African National Standard.; 2003.
204. SANS 10163-1. The structural use of timber. Part 1: Limit states design. South African National Standard; 2001.
205. Lachenbruch B, Moore JR, Evans R. Radial variation in wood structure and function in woody plants, and hypotheses for its occurrence. In: Size- and age-related changes in tree structure and function Tree physiology,. Meinzer FC, Lachenbruch B, Dawson TE (eds). Springer, The Netherlands; 2011. p. 121–64.
206. Soto L, Valenzuela L, Lasserre JP. Effect of initial planting density in dynamic modulus of elasticity in standing trees and logs of 28 years old radiata pine plantation in sandy soil. Maderas Cienc y Technol. 2012;14(2):209–24.
207. Zhang SY, Ren H, Jiang Z. Wood density and wood shrinkage in relation to initial spacing and tree growth in black spruce (*Picea mariana*). J Wood Sci [Internet]. 2021;67(1):67–30. Available from: <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01965-9>
208. Gonçalves JC, Santos N, Da Silva FG, Souza RS, De Paula MH. Growth ring width of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and its relationship with wood properties. Sci For Sci. 2018;46(118):309–17.
209. Fassola HE, Videla D, Winck RA, Area MC, Crechi EH, Keller AE, et al. Relación entre métodos acústicos con propiedades anatómicas y físico mecánicas de *Pinus taeda* L. sometido a raleos. XVI Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Eldorado. 2014. 611–618 p.
210. Bučar DG, Bučar B. Strength grading of structural timber using the single mode transverse damped vibration method. Wood Res. 2011;56(1):67–76.
211. Faggiano B, Grippa MR, Calderoni B. Non-destructive tests and bending tests on chestnut structural timber. Vol. 778, Advanced Materials Research. 2013. 167–174 p.
212. Cruz H, Machado JS. Effects of beetle attack on the bending and compression strength properties of pine wood. Adv Mater Res. 2013;778:145–51.
213. Schulgasser K, Witzum A. How the relationship between density and shrinkage of wood depends on its microstructure. Wood Sci Technol. 2015;49(2):389–401.
214. Riesco Muñoz G, Díaz González J. Características físicas de la madera de pino procedente de raleos en el Noroeste de España. Maderas Cienc y Technol. 2007;9(3):233–44.
215. Winck RA. Influencia del raleo sobre las características anatómicas y las propiedades

- físicas y mecánicas de la madera de *Pinus taeda* L. de la región NE de la Argentina. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Misiones. FCF. Eldorado. Misiones. Argentina; 2013.
216. Weber EM. Densidad básica de madera de *Pinus taeda* L. Marion de diferentes edades, Misiones, Argentina. Floresta. 2005;65(3):487–94.
 217. Winck RA, Palacio M, Bragañolo A, Belaber E, Gauchat ME, Aquino DR, et al. Peso específico aparente en dos procedencias de *Pinus taeda*. XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Eldorado, Misiones.; 2019. p. 474–6.
 218. Sackser, M.R.; Valdés, P.A.; Grance, L.A.; Bohren, A.V.; Aguilera, M.A.; Andrade, N.Y.; Grance JRF. Densidad de la madera de *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm de 21 años de edad, a distintas alturas desde la médula a la corteza; estimación del límite madera juvenil–madura. Rev For Yvyrareta. 2018;26:29–37.
 219. Hernández, L. D. C. M., & Zamora-Campos EM. Variación del peso específico de una prueba de procedencias/progenie de *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr. y Golf. en la región de los Tuxtla Veracruz, México. For Veracruzana. 2004;6(2):41–6.
 220. Diaconu D, Wassenberg M, Spiecker H. Variability of European beech wood density as influenced by interactions between tree-ring growth and aspect. For Ecosyst [Internet]. 2016;3(6):1–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1186/s40663-016-0065-8>
 221. Martiarena R, Crechi E, Pinazo M, Wallis A Von, Marquina J, Monteoliva S. Efecto del raleo sobre el crecimiento y la densidad de la madera de *Pinus taeda* implantado en Misiones, Argentina. Ciência Florest. 2014;24(3):655–63.
 222. Kimberley MO, Cown DJ, McKinley RB, Moore JR, Dowling LJ. Modelling variation in wood density within and among trees in stands of New Zealand-grown radiata pine. New Zeal J For Sci [Internet]. 2015;45(1):1–13. Available from: <http://dx.doi.org/10.1186/s40490-015-0053-8>
 223. Haselein CR, Cechin E, Santini EJ, Gatto DA. Características estruturais da madeira de *Pinus elliottii* Engelm aos 30 anos de idade. Ciência Florest. 2000;10(2):135–44.
 224. Kärenlampi PP, Riekkinen M. Pine heartwood formation as a maturation phenomenon. J Wood Sci. 2002;48(6):467–72.
 225. Wiedenhoef A, Regis B. Structure and function of wood. In: In: ED Rowel, R M & Rowel, R M Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton. 2005. p. 485p.
 226. Zimmer KP, Høibø OA, Vestøl GI, Larnøy E. Variation in treatability of Scots pine sapwood: A survey of 25 different northern European locations. Wood Sci Technol. 2014;48(5):1049–68.
 227. Baraúna EEP, Lima JT, Vieira R da S, da Silva JRM, Monteiro TC. Effect of anatomical and chemical structure in the permeability of “amapá” wood. Cerne. 2014;20(4):529–34.

228. Leggate W, Shirmohammadi M, McGavin RL, Chandra K, Knackstedt M, Knuefing L, et al. Influence of wood's anatomical and resin traits on the radial permeability of the hybrid pine (*Pinus elliottii* x *Pinus caribaea*) wood in Australia. *BioResources*. 2020;15(3):6851–73.
229. Leggate W, Redman A, Wood J, Bailleres H, Lee DJ. Radial permeability of the hybrid pine (*Pinus elliottii* x *Pinus caribaea*) in Australia. *BioResources*. 2019;14(2):4358–72.
230. Ahmed SA, Sehlstedt-Persson M, Karlsson O, Morn T. Uneven distribution of preservative in kiln-dried sapwood lumber of Scots pine: Impact of wood structure and resin allocation. *Holzforschung*. 2012;66(2):251–8.
231. Bendtsen B, Senft J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. *Wood Fiber Sci*. 1986;18(1):23–38.
232. Groom L, Shaler S, Mott L. Mechanical properties of individual southern pine fibers. Part III: Global relationships between fiber properties and fiber location within an individual tree. *Wood Fiber Sci*. 2002;34(2):238–50.
233. Nuñez VS. Dinámica de la actividad cambial en pino híbrido y sus especies parentales. Estudio de caso. Tesina de grado. Universidad Nacional de Misiones.FCF; 2018.
234. Boschiero Ferreira AT. Caracterização da estrutura anatômica do lenho, dos anéis de crescimento e dos canais de resina de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr, et Golf. Teses de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, Brazil.; 2009.
235. Winck RA, Martínez MI, Romberg EI, Fassola HE, Aquino DR, Bohren AV. Morphometry of tracheids of *Pinus taeda* L. from a pruning test in ne Argentina. *Floresta*. 2019;49(3):503–12.
236. Nawrot M, Pazdrowski W, Walkowiak R, Szymański M, Kaźmierczak K. Analysis of coniferous species to identify and distinguish juvenile and mature wood. *J For Sci*. 2014;60(4):143–53.
237. Wang Y, Zhang R, Zhou Z. Radial variation of wood anatomical properties determines the demarcation of juvenile-mature wood in *schima superba*. *Forests*. 2021;12(4):1–22.
238. Martiarena RA, Von Wallis A, Fernandez R, Knebel O. Efecto de prácticas de preparación de terreno sobre el contenido de nutrientes y el crecimiento en plantaciones forestales. *Av en Ing Agrícola*. 2007;(June):303–10.
239. Goya JF, Pérez C, Frangi JL, Fernández R. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecol Austral*. 2003;13(2):139–50.
240. Jordan L, He R, Hall DB, Clark A, Daniels RF. Variation in loblolly pine ring microfibril angle in the southeastern United States. *Wood Fiber Sci*. 2007;39(2):352–63.
241. Lachenbruch B, Johnson GR, Downes GM, Evans R. Relationships of density,

microfibril angle, and sound velocity with stiffness and strength in mature wood of Douglas-fir. *Can J For Res.* 2010;40(1):55–64.

242. EN 384. Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee for Standardization, Brussels.; 2016.