



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

Características químico-estructurales de híbridos de *Nothofagus alpina* y *Nothofagus obliqua* a edad temprana

Profesor Patrocinante: Sr. Aldo Rolleri S.

Co-patrocinante: Sr. Fernando Droppelmann

Trabajo de Tesina presentado como parte
de los requisitos para optar al Título de
Ingeniera Forestal

FRANCESCA SOFÍA FEDELE LORCA

VALDIVIA

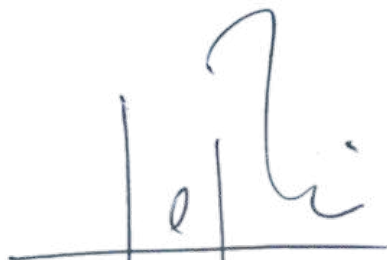
2025

i	Calificación del Comité de Titulación	i
ii	Resumen	ii
1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	3
3	MÉTODOS	4
4	RESULTADOS	9
4.1	Variación de la composición química de la madera de híbridos de Raulí x Roble y parentales	9
4.1.1	Análisis de varianza por grupo de cada categoría en función de la distancia médula a corteza (25 %, 50 % y 75 %)	12
4.1.2	Análisis de varianza entre grupos de cada categoría en función del total de datos médula a corteza	12
4.2	Variación de la estructura química de la madera de híbridos <i>Nothofagus alpina</i> x <i>Nothofagus obliqua</i> y parentales de médula a corteza.	16
4.2.1	Análisis de varianza por grupo de cada categoría en función de la distancia médula a corteza (25 %, 50 % y 75 %)	17
4.2.2	Análisis de varianza entre grupos de cada categoría en función del total de datos médula a corteza	18
5	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	21
5.1	Composición Química	21
5.2	Estructura química	22
6	REFERENCIAS	24
7	ANEXOS	27

Calificación del Comité de Titulación

	Nota
Patrocinante: Sr. Aldo Rolleri S.	7,0
Co-Patrocinante: Sr. Fernando Droppelmann F.	6,8
Informante: Sr. Óscar Thiers E.	6,5
Informante: Sr. Maximilian Wentzel V.	6,96

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.



Sr. Aldo Rolleri S

Resumen

El estudio abordó la caracterización fenotípica de rasgos de composición y estructura química en la madera de híbridos de *Nothofagus alpina* x *Nothofagus obliqua* y sus parentales, mediante espectroscopía infrarroja FT-IR; enfocándose en identificar tempranamente la variación en composición y estructura química. Se analizaron 38 híbridos clonales y 8 parentales de 4,5 años, a los cuales se le extrajo tarugos de incremento para estudiar su variación médula a corteza y entre diferentes grupos. Se utilizó un sistema de imágenes infrarrojo FT-IR con el cual se obtuvieron imágenes, y a partir de éstas, espectros promedio de absorbancia. De éstos se seleccionaron bandas de interés, que permitieron interpretar y evaluar la composición química mediante la confección de tablas de asignación y la estructura química, mediante índices de cristalinidad relativa. Los resultados indican que la capacidad de encontrar diferencias estadísticamente significativas en composición y estructura química varía en función del nivel y categoría de análisis, encontrándose diferencias entre híbridos clonales y parentales para estructura, en índices de cristalinidad relativa 1375/1512 y 1420/898, así como en la composición en contenido de lignina (1594 cm^{-1}) y hemicelulosa (1736 cm^{-1}). Se concluye que la hipótesis original se cumple; la técnica FT-IR es efectiva para caracterizar la composición químico-estructural de la madera en raulí, roble y sus híbridos, sin embargo, es necesario optimizar la metodología en función del diseño experimental. Se recomienda usar esta técnica infrarroja con una metodología que permita que la variación radial pueda ser evaluada anualmente en ambas maderas que componen el anillo de crecimiento, además de incrementar el tamaño muestral. La técnica tiene potencial para obtener segregación genética temprana, con aplicación en mejoramiento genético y optimización de viveros y plantaciones una vez revisados los aspectos metodológicos mencionados en el estudio.

Palabras clave: *Microscopía infrarroja, índices de cristalinidad relativa, fenotipado, estructura química, segregación temprana.*

1. INTRODUCCIÓN

Los avances en mejoramiento genético forestal son necesarios para incrementar los volúmenes y mejorar la resistencia de los bosques a las plagas; además de mejorar las características y propiedades de la madera. Zobel y Talbert (1984) indican dos maneras principales en las que se acorta el intervalo generacional en programas de mejora miento genético, selección temprana y crianza acelerada. Así, la intervención en los ciclos de mejoramiento permite tener individuos con mejores características, adaptación a diferentes climas, resistencias a plagas o enfermedades, exigencias de transformación de la biomasa y las propiedades de la madera.

La segregación de especies e individuos de alto valor radica en la obtención de buenas propiedades de la madera que dependen de la composición químico-estructural de las células que la componen, y la influencia del ambiente o sitio donde se desarrolla el bosque. La determinación inicial de las características y propiedades de la madera están dictaminados por un componente genético y uno ambiental. (Lebedev *et al.* 2020). Estos rasgos de la madera, producto de la interacción genotipo y ambiente, se puede caracterizar mediante un proceso llamado fenotipado. Este consiste en *medir* las características observables de la madera, a diferencia del genotipado, que se puede apreciar fundamentalmente mediante secuenciación génica (Orgogozo *et al.* 2015). Últimamente se han descrito métodos de fenotipado indirecto, o fenotipado de alto rendimiento. Este es capaz de caracterizar rasgos de composición químico-estructurales que determinan las propiedades de la madera, entre las que se encuentra la espectroscopia de infrarrojo cercano “NIR” del inglés *Near-Infrared Spectroscopy* (que permite determinar densidad básica y características de longitud y grosor de la fibra), los rayos X que permiten medir el ángulo de las microfibrillas y con ello calcular el Módulo Elástico (MOE). En ese contexto, la espectroscopía NIR se utiliza para determinar la composición química de la madera; Javier-Astete (2021) describe su uso para determinar la presencia y cantidad de componentes clave en la madera, como lignina, hemicelulosa y celulosa. Así mismo, Thygesen *et al.* (2005) y Popescu *et al.* (2009) describieron el uso de rayos X en conjunto con la espectroscopia infrarroja para determinar estructura de la celulosa en las fibras vegetales, mediante la difracción de rayos X, así como la capacidad de diferenciar entre maderas duras y blandas.

La capacidad de observar las diferencias en la composición química se ha estudiado mediante NIR. Atkinson *et al.* (1997), utiliza dicha técnica para diferenciar la composición química de *Betula péndula*, *Bétula pubescens* y su híbrido, mediante el análisis de la hoja, disecada y pulverizada, encontrando diferencias entre ellos, además de su híbrido, distinguiendo una tendencia además en parecerse más

químicamente a un progenitor. La microscopía infrarroja avanza a pasos agigantados en el mundo de la segregación, se observa en el estudio de macrohuellas dactilares de infrarrojo que Wang *et al.* (2015) aplica para discriminar entre dos variantes de latifoliadas *Radix paeoniaes*, donde utiliza el reconocimiento de patrones estadísticos en conjunto con la espectroscopía para observar las diferencias. Mientras que Chen *et al.* (2010) utilizan el FT-IR (Espectroscopía Infrarroja Transformada de Fourier, o *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* en inglés) para discriminar entre maderas duras y maderas blandas desde su composición química, mediante un análisis multivariado que involucra la huella espectrómetra (macrohuella dactilar de IR) y el análisis termogravimétrico. Así mismo, Lacerda *et al.* (2024) utiliza la capacidad de auto aprendizaje del *machine learning* para entrenar sistemas que identifican huellas químicas de la espectroscopía FT-IR. Esta técnica mide la absorción de radiación infrarroja para identificar y caracterizar la composición química, detecta vibraciones y rotaciones en respuesta a la radiación y genera un espectro al que se denomina “huella química”; tiene las ventajas de ser rápida, no destructiva, aplica a sólidos, líquidos y gases; y permite identificar casi cualquier tipo de material por su huella química a una resolución micrométrica. En el ámbito de las ciencias forestales permite la caracterización química de la madera, y su resolución es tan detallada que es capaz de detectar cambios en la estructura molecular (TFS 2016; Bruker 2022).

Por otro lado, el rasgo estructura química, que se define como la composición molecular conocida como matriz lignocelulósica y por el nivel de ordenamiento de sus componentes principales, se evalúa a través de la cristalinidad relativa (Thygesen *et al.* 2005; Vârban *et al.* 2021). La estructura se representa mediante índices de cristalinidad relativa, que es uno de los rasgos responsable de las propiedades mecánicas de la madera (Colom y Carrillo 2005; Thygesen *et al.* 2005; Wentzel *et al.* 2024).

Recientemente además se sabe que se puede determinar la estructura por medio de la razón de bandas de absorbancia características de celulosa amorfa o celulosa cristalina. En ese ámbito, Colom y Carrillo (2005), Lionetto *et al.* (2012), Wentzel *et al.* (2019) y Wentzel *et al.* (2024), han estado estudiando la relación entre la cristalinidad y las propiedades de la madera, específicamente en relación con la estructura cristalocímica y la capacidad del FT-IR para observarla. Wentzel *et al.* (2024) describió una buena correlación entre un índice de cristalinidad relativa y el MOE.

Hoy en día, hay un interés renovado por las especies nativas para ayudar a diversificar la matriz forestal del país. En este contexto, la Universidad Austral de Chile cuenta con proyectos en desarrollo en toda la cadena de producción de material genético hasta el establecimiento y mantención de ensayos permanentes de híbridos de raulí-roble (RaxRo) (UACH 2019). Según FUCOA (2020), la Cooperativa de

Mejoramiento Genético de la Universidad Austral de Chile está trabajando desde el 2017 específicamente con el híbrido *Nothofagus alpina* x *Nothofagus obliqua* que se genera a nivel natural como consigna Donoso et al. (1990); con el objeto de obtener individuos con la amplia distribución geográfica del roble y la calidad de madera del raulí. Existen ensayos clonales permanentes con individuos de edades entre 1 y 7 años, establecidos en la Región de los Ríos, Araucanía y Biobío, asociados a proyectos apoyados financieramente por FIA (Fundación para la Innovación Agraria) y por el Gobierno Regional de Los Ríos y su Consejo Regional, a través del Fondo de Innovación para la Competitividad Regional (FIC-R), mandado por medio de la Corporación Regional de Desarrollo Productivo de la Región de Los Ríos y ejecutado por la Universidad Austral de Chile. Durante el desarrollo de este trabajo de investigación, se encontraba en su etapa 2: “Desarrollo de una base genética híbrida de roble raulí para establecimiento de plantaciones comerciales de alta productividad”. Financiado a través del Fondo de innovación para la competitividad regional (FIC-R) del Gobierno Regional y su Consejo Regional.

Basado en lo anterior, la intención del presente trabajo de tesina es evaluar la tecnología y, en función de ella, desarrollar una metodología que permita apoyar la segregación de híbridos de *N. alpina* x *N. obliqua* por su composición química-estructural de la madera a temprana edad, mediante el fenotipado de rasgos, usando microscopía infrarroja FTIR. A partir de ello, se plantea la hipótesis de que la estructura química permite diferenciar entre híbridos de *Nothofagus alpina* x *Nothofagus obliqua* a edades tempranas, siendo este factor más determinante que la composición química.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es: “Evaluar la capacidad que tiene la microscopía infrarroja FTIR para diferenciar las especies roble, raulí e híbridos a edades tempranas.”

En base a ello, los objetivos específicos consisten en:

1. Evaluar la variación de la **composición** química de la madera de híbridos y puros de *Nothofagus obliqua* y *Nothofagus alpina* de médula a corteza usando microscopía infrarroja FT-IR.

2. Evaluar la variación de la **estructura** química de la madera de híbridos y puros de *Nothofagus obliqua* y *Nothofagus alpina* de médula a corteza usando microscopía infrarroja FT-IR.

3. MÉTODOS

El área de estudio corresponde al ensayo permanente UA2090 - Trafún, ubicado en la comuna de Panguipulli, Región de Los Ríos, Chile ($39^{\circ}43'13.54''S$ $-72^{\circ}27'55.25''O$). El diseño experimental del ensayo es de bloques completos al azar (DBCA) con parcelas STP (*Single Tree Plot*, o un árbol por parcela) con espaciamiento de 2,5 x 2,5 m. Cada bloque cuenta con 100 clones híbridos (RaxRo) y 10 controles de especies puras de roble y raulí. La distribución de los bloques del ensayo se observa en la imagen aérea representada en la figura 1.



Figura 1. Distribución de bloques de Ensayo Trafún (bloques 1-8). Fuente: Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal de la Universidad Austral de Chile

La procedencia genética de los individuos híbridos de Raulí x Roble, así como los parentales de Raulí, corresponden a cruzamientos controlados realizados en el marco del proyecto FIC-R en el Huerto Semillero Clonal “Huillilemu” (CONAF, Región de Los Ríos) localizado en la comuna de San José de la Mariquina, los individuos correspondientes a roble puro son de semilla mezcla no mejorada. Los híbridos tienen procedencia de cinco familias de cruzamientos controlados, que dan origen a los 10 clones muestreados, en el cuadro 1 se indican los códigos de los clones, la familia a la que pertenecen y el número de rametos (diferentes individuos que corresponden a un mismo clon). Los clones parentales (madre y padre) con que se generaron estas cruces tienen apariencia de clones puros de raulí, sin embargo,

son resultado de introgresión por cuanto al observar la progenie de estas cruza aparecen una gran cantidad de individuos con rasgos de raulí y roble.

Cuadro 1. Cruza de clones parentales que dan origen a los híbridos clonales que participan del estudio, y la cantidad de rametos de cada clon o parental. Obteniéndose un total de 46 individuos y, por lo tanto, 46 tarugos.

CLON	Cruza de clones parentales	Cantidad de rametos
H37	U1*U3 - 10	5
H52	U1*U3 - 29	4
H4	U2*U6 - 29	4
H53	U3*U7 - 15	3
H57	U4*U7 - 7	2
H61	U5*U1 - 1	3
H63	U5*U1 - 5	5
H67	U5*U1 - 11	4
H69	U5*U1 - 13	4
H62	U5*U1 - 29	3
PARENTAL	Procedencia	Cantidad de individuos
Raulí	Cruzamiento controlado	4
Roble	Semillas de mezcla no mejorada	4

En el ensayo se colectaron 38 tarugos de incremento de 5 mm de diámetro (barreno *Pressler*) a 38 rametos híbridos clonales de *N. alpina* x *N. obliqua*, además de 4 tarugos de incremento de individuos parentales de *N. alpina* y 4 de individuos parentales de *N. obliqua*, obteniéndose un tarugo por individuo, asegurando al menos dos a máximo cinco rametos por clon obteniendo así un total de 46 tarugos extraídos al DAP (diámetro a la altura del pecho, 1,3 m), como se observa en la figura 2.



Figura 2. Recolección de muestras en híbridos de Raulí x Roble en terreno usando tarugo de incremento a la altura del DAP.

Este material fue debidamente almacenado y etiquetado (figura 3) y se llevó al laboratorio donde se secaron en estufa a 40 °C durante 48 horas, posteriormente el mismo material fue acondicionado en cámara de clima a 20 °C con 60 % de humedad relativa (HR) con la finalidad de homogeneizar el contenido de humedad de equilibrio cercano al 12 %, luego se mantuvieron en desecadores durante las mediciones con microscopia infrarroja.



Figura 3. Almacenaje de Tarugos de incremento almacenados para ser medidos.

A continuación, para conocer la variación de los rasgos de composición químico-estructural presente en cada muestra, fue usado un sistema de imágenes infrarrojo FT-IR conformado por un espectrómetro PerkinElmer Frontier MIR/NIR y un microscopio infrarrojo Spotlight/400 MIR. El modo de uso del equipo fue en reflectancia y tanto para el *background* como las mediciones se usaron las siguientes condiciones: resolución espectral de 4 cm⁻¹, 25 μm de resolución píxel y 16 escaneos. La obtención del *background* se realizó diariamente para la eliminación de ruido espectral producido por las condiciones ambientales variables de humedad y CO₂. El uso del equipo se observa en imágenes en anexo.

Los tarugos fueron fijados usando un molde de madera, ver anexo. En cada tarugo se realizaron 3 mediciones, al 25 %, 50 % y 75 %, de distancia de médula a corteza, como se esquematiza en la figura 4.

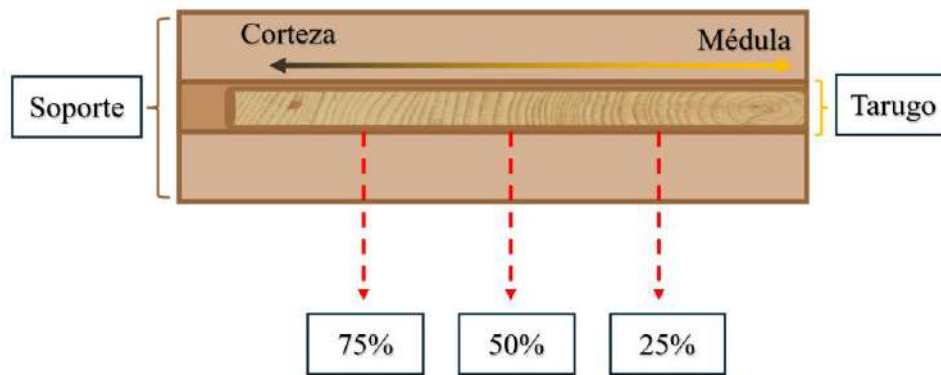


Figura 4. Puntos de medición en cada tarugo y su posicionamiento en el soporte (*mounting stick*), para su análisis.

Cada punto de observación equivale a una imagen infrarroja de (100 x 500 μm) de la energía absorbida por la muestra. A partir de cada imagen infrarroja, esquematizada en anexo, se obtuvo un espectro promedio. La totalidad de espectros obtenidos fueron procesados simultáneamente, usando el *software* Spektrum de PerkinElmer: línea base interactiva, normalización y finalmente una deconvolución.

A continuación, los datos permiten describir y comparar la composición químico-estructural de las muestras de híbridos y parentales.

Para la descripción de la composición química, los espectros promedios procesados fueron transformados en datos de absorbancia de energía infrarroja. Nueve bandas de interés descritas por bibliografía fueron seleccionadas para la confección de una tabla de asignación (Cuadro 2).

La estructura química fue descrita mediante el uso de 3 índices de cristalinidad que se obtienen en base al cálculo de una razón entre las alturas máxima de 2 bandas de interés, indicadas en las fórmulas [1], [2] y [3].

De esta forma, el primer índice se define como:

$$CriRa_{1317/1336} = \frac{\text{Altura banda } 1317 \text{ cm}^{-1}}{\text{Altura banda } 1336 \text{ cm}^{-1}} \quad [1]$$

Dónde *CriRa* corresponde a la cristalinidad relativa “a”; la banda 1317 cm^{-1} corresponde a la vibración en el plano CH₂ en celulosa, es decir, celulosa cristalina; y la banda 1336 cm^{-1} corresponde a la vibración CH en celulosa, adjudicándose a la fase amorfa de la celulosa.

El segundo índice se define como:

$$B) \text{ CriRb}_{1420/898} = \frac{\text{Altura banda } 1420 \text{ cm}^{-1}}{\text{Altura banda } 898 \text{ cm}^{-1}} \quad [2]$$

Donde las regiones características de las señales de celulosa se atribuyeren a bandas en $1420\text{--}1428 \text{ cm}^{-1}$, asignadas a la región cristalina, y en $896\text{--}898 \text{ cm}^{-1}$, asignadas a la región amorfa de la celulosa.

Finalmente, se realizó el cálculo de la razón de bandas de carbohidratos y lignina:

$$C) \text{ CriRc}_{1375/1512} = \frac{\text{Altura banda } 1375 \text{ cm}^{-1}}{\text{Altura banda } 1512 \text{ cm}^{-1}} \quad [3]$$

Dónde *CriRc* es cristalinidad relativa “c”. Definiéndose la banda 1375 cm^{-1} como la deformación de celulosa y hemicelulosa, mientras que la banda 1512 cm^{-1} describe la vibración esquelética aromática de C=C en lignina.

Para el análisis de la composición químico-estructural, los datos respectivos fueron sometidos a un análisis estadístico que consta de una prueba inicial de Shapiro-Wilk para determinar normalidad. En el caso de considerarse una distribución normal, los datos se someten a la prueba de ANOVA 1 factor, a fin de determinar la existencia de diferencias entre los grupos de muestras; en caso de que la distribución de los datos se alejase de la distribución normal, se someten a la prueba de Kruskal-Wallis con el mismo fin. Todas las pruebas se realizaron con un nivel de significancia de $P < 0,05$.

Posterior a los análisis de varianza, se realiza un cruce individual de cada set de las comparaciones por familia y por híbridos clonales individuales, mediante la prueba de Tukey en el caso de las bandas de distribución normal, y comparaciones múltiples de Dunn para las bandas que no caían en esa categoría.

Aquellos casos en que se obtuviesen resultados en los cruces individuales que no se viesen reflejados en el análisis global, fueron corroborados en comparaciones individuales.

El análisis de varianza con los datos de composición y estructura química se definen en 2 grandes niveles, cada uno de ellos consta de categorías de análisis y en ellas se realiza la revisión de distintos grupos:

En el primer nivel, se revisó la variación de estructura y composición de médula a corteza, a fin de conocer las posibles diferencias en composición y estructura entre posiciones. En una primera categoría de análisis, se estableció la diferencia entre las tres posiciones descritas para la totalidad de las muestras. Se realiza una segunda categoría de análisis en que se agrupa la totalidad de los híbridos clonales, las muestras de *N. alpina* y *N. obliqua* creando tres grupos, cada uno de ellos es caracterizado de médula a corteza. Finalmente, cada híbrido clonal se caracterizó de forma independiente para determinar diferencias entre las posiciones mencionadas.

En el segundo nivel, se realizó el análisis en base a una comparación grupal, considerando la totalidad de datos de las tres posiciones médula a corteza; en este caso, los grupos fueron comparados entre sí. Así, la primera categoría constató las diferencias entre el grupo de híbridos clonales con el parental roble, posteriormente con el parental raulí, y además se compararon los parentales entre sí. En la segunda categoría de análisis se compararon los híbridos clonales cruzándolos de forma independiente.

El procedimiento descrito, se realizó por cada banda de absorbancia de interés para el análisis de la composición química; posteriormente se realizó para cada índice de cristalinidad relativa para el análisis de la estructura química.

4. RESULTADOS

4.1 Variación de la composición química de la madera de híbridos de Raulí x Roble y parentales.

Desde la propuesta metodológica se obtuvieron 138 observaciones (imágenes infrarrojas), de las cuales hay 46 de cada distancia (25 %, 50 % y 75 % de la médula), a la vez que 114 del total corresponden

a mediciones de híbridos clonales, mientras que 24 corresponden a individuos puros; 12 de raulí y 12 de roble. El desglose de resultados se encuentra en el anexo.

Desde estas imágenes se obtuvo un espectro promedio conformados por bandas de absorbancia expresados en términos de longitudes de onda (cm^{-1}), generándose una tendencia característica para cada material. Una representación de los resultados se puede apreciar en la figura 5 y 6.

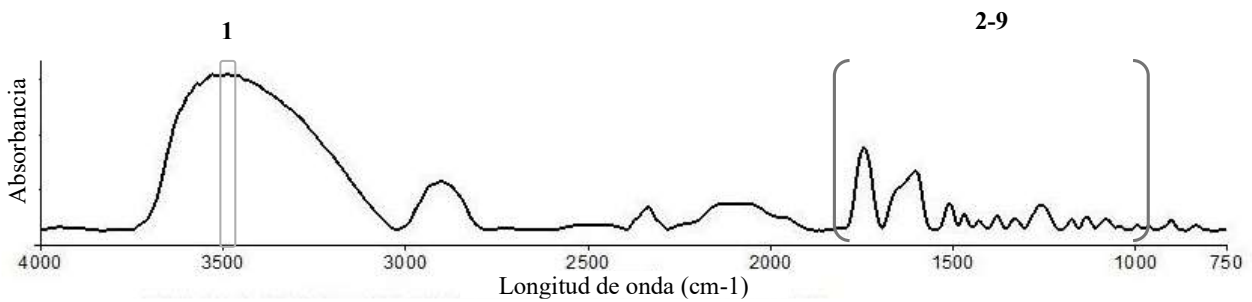


Figura 5. Ejemplo de espectros promedios en absorbancia de híbridos y las 9 bandas seleccionadas para describir la composición química de las muestras (3500 cm^{-1} y 8 restantes entre 1700 cm^{-1} y los 1000 cm^{-1}).

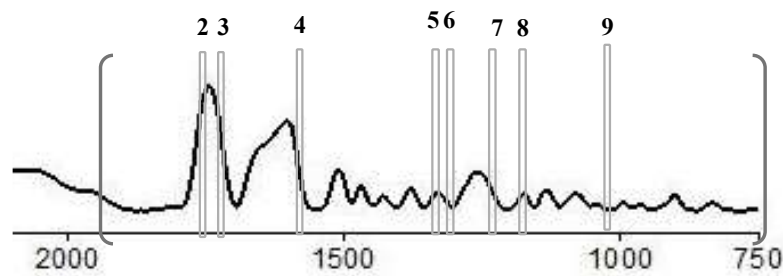


Figura 6. Amplificación de la región de huella dactilar del espectro de ejemplo a partir de bandas 1700 a 1000 cm^{-1} .

A partir de los valores de absorbancia, se identificaron las bandas de interés mediante referencias bibliográficas, generando una tabla de asignación (cuadro 2). El análisis de la composición química del material usado en este estudio se realizó determinando la distribución de los valores de absorbancia de las bandas de interés, en dos niveles, distancia médula a corteza y entre grupos. En todos los casos se aplicó el criterio de significancia de $P < 0,05^*$. Se destaca que, al realizar el análisis preliminar de los datos, se observó que en la banda 1158 cm^{-1} (numerada 8 en la figura) no presentó actividad en ninguna de las muestras analizadas, por lo que se excluyó del análisis.

Cuadro 2: Asignación de numerales y sus respectivas bandas de absorbancia para el análisis de composición y estructura química; y las referencias bibliográficas que sustentan la asignación.

N°	Banda (cm-1)	Asignación	Referencias
Bandas referentes a evaluación de la composición química			
1	3490	OH presente en celulosa y hemicelulosa	Olsson and Salmén (2004) – Wentzel <i>et al.</i> (2024)
2	1742	Cetonas en el aldehído libre para Hemicelulosa	Faix (1991), Pandey (1999), Esteves <i>et al.</i> (2013), Wentzel <i>et al.</i> (2024)
3	1736 – 1734	Hemicelulosa	Poletto <i>et al.</i> (2012)
4	1594	Lignina a partir de la vibración del esqueleto aromático y estiramiento de C =O	Faix (1991), Casas <i>et al.</i> (2012)
5	1336	Vibración de CH en celulosa	Colom y Carrillo (2005)
6	1316	Celulosa cristalina	Colom y Carrillo (2005)
7	1200 – 1206	Celulosa desde OH-	Popescu <i>et al.</i> (2009)
8	1158	Hemicelulosa desde la vibración asimétrica de enlaces C-o-C	Popescu <i>et al.</i> (2009)
9	1040	Lignina desde Guayacilo	Faix (1991), Wentzel <i>et al.</i> (2024)
Bandas referentes a la evaluación de la estructura química			
10	1317-1336	1317 cm ⁻¹ : Balanceo de CH ₂ de celulosa cristalina, y 1336 cm ⁻¹ vibración de CH en celulosa, correspondiendo a celulosa cristalina/celulosa amorfa	Colom y Carrillo (2005) - Roa (2020)- Wentzel <i>et al.</i> (2024)
11	1420-898	1420–1428 cm ⁻¹ , asignadas a la región cristalina, y en 896–898 cm ⁻¹ , asignadas a la región amorfa de la celulosa.	Colom y Carrillo (2005) - Vârban <i>et al.</i> (2021) – Wentzel <i>et al.</i> (2024)
12	1375-1512	1375 cm ⁻¹ como la deformación de celulosa y hemicelulosa, mientras que la banda 1512 cm ⁻¹ describe la vibración esquelética aromática de C=C en lignina.	Shi <i>et al.</i> (2012) – Méndez-Mejías (2016)

4.1.1. Análisis de varianza por grupo de cada categoría en función de la distancia médula a corteza (25 %, 50 % y 75 %)

Para cada banda de absorbancia seleccionada fue analizada su variación de médula a corteza en cada grupo que forma parte de una categoría. En la primera categoría se determinó un gran grupo con la totalidad de las muestras. El análisis determinó que, del total de bandas analizadas, 1594, 1336, 1318 y 1200 cm^{-1} presentaron datos con distribución normal; el resto de las bandas no presentó distribución normal. Las pruebas de varianzas correspondiente indicaron que no existen diferencias significativas de médula a corteza.

Posteriormente, se agruparon los híbridos clonales y en paralelo se agruparon por separado los parentales raulí y roble, originando una segunda categoría (grupo de híbridos clonales x parentales) con tres grupos. Este análisis determinó que tampoco existen diferencias significativas de médula corteza.

En la última categoría (híbridos clonales x parentales) de este nivel, se realizó el análisis por posición de cada híbrido clonal. En este análisis que comprende 10 grupos no se encontraron diferencias estadísticamente significativas.

4.1.2. Análisis de varianza entre grupos de cada categoría en función del total de datos médula a corteza

En este nivel se agrupan datos sin considerar posición, en el que se comparan los distintos grupos por categoría. Al comparar la primera categoría (híbridos clonales x parentales) se forman tres grupos, entre los que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para las bandas analizadas.

Para la última categoría (híbridos clonales x parentales) de este nivel, se realiza el análisis entre las medias de los 12 grupos. De este análisis se obtuvieron dos bandas con diferencias estadísticamente significativas, en el caso de la banda 1736 cm^{-1} (hemicelulosa) y 1594 cm^{-1} , (lignina a partir de la vibración del esqueleto aromático y estiramiento de $\text{C}=\text{O}$). Posterior a ello se continua con el análisis de comparaciones múltiples. El comportamiento de los datos asociados a las bandas mencionadas se muestra en las figuras 7 y 8.

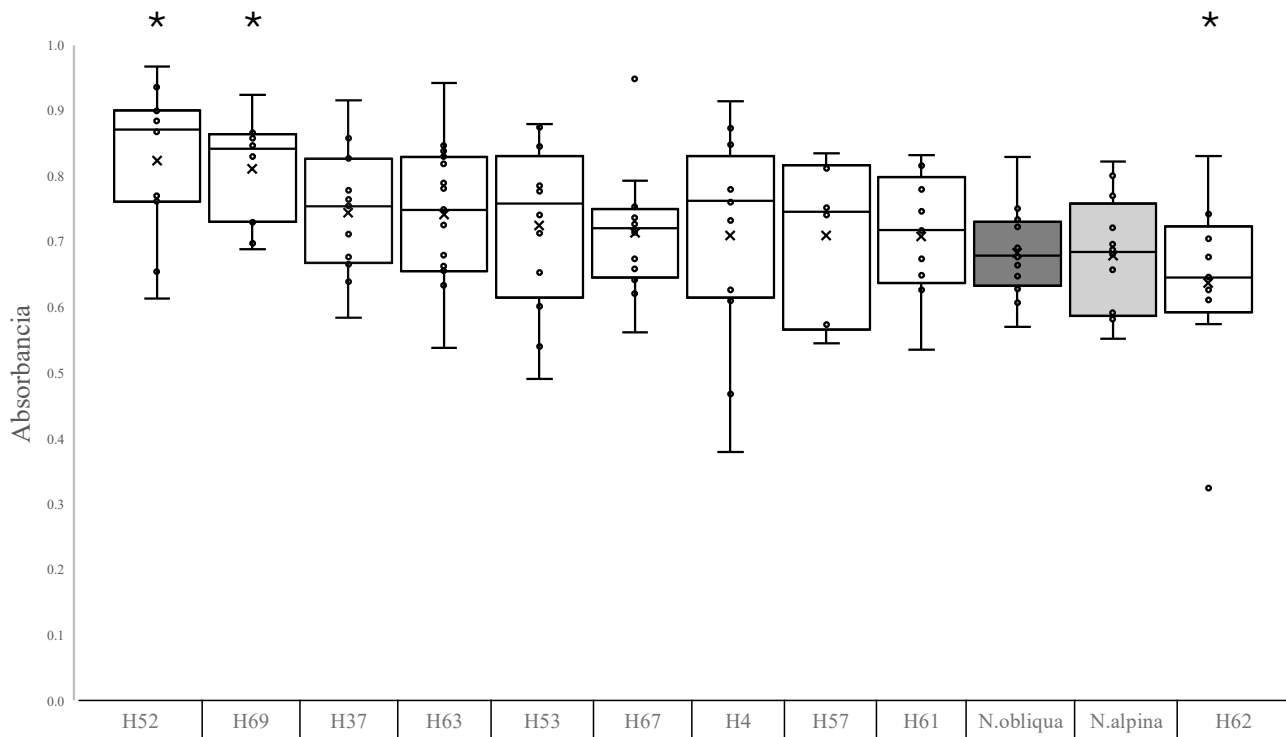


Figura 7. Gráfica de cajas y bigotes de rametos agrupados por híbrido clonal y parentales por especie para la banda de absorbancia 1594 cm^{-1} (Lignina a partir de la vibración del esqueleto aromático y estiramiento de $\text{C}=\text{O}$). Diferencias significativas se muestran con un asterisco sobre la gráfica; la media representada mediante la x, la mediana por la línea horizontal al interior de la caja, los bigotes muestran los límites de los cuartiles 1 y 4, mientras que los puntos fuera de las cajas y bigotes indican valores atípicos o datos aislados.

La figura 7 muestra el análisis estadístico de los rametos agrupados por clon, indicándose los grupos con valores significativos con un asterisco. Para la banda 1594 cm^{-1} , donde se produjo una diferencia estadísticamente significativa asociada a: $= P < 0.05^*$. Posteriormente, al realizarse una prueba paramétrica y la consiguiente prueba de Tukey para comprobar las diferencias uno a uno, destacan los híbridos clonales H52, H69 y H62 con diferencias estadísticamente significativas entre H52 con H62 y H69 con H62.

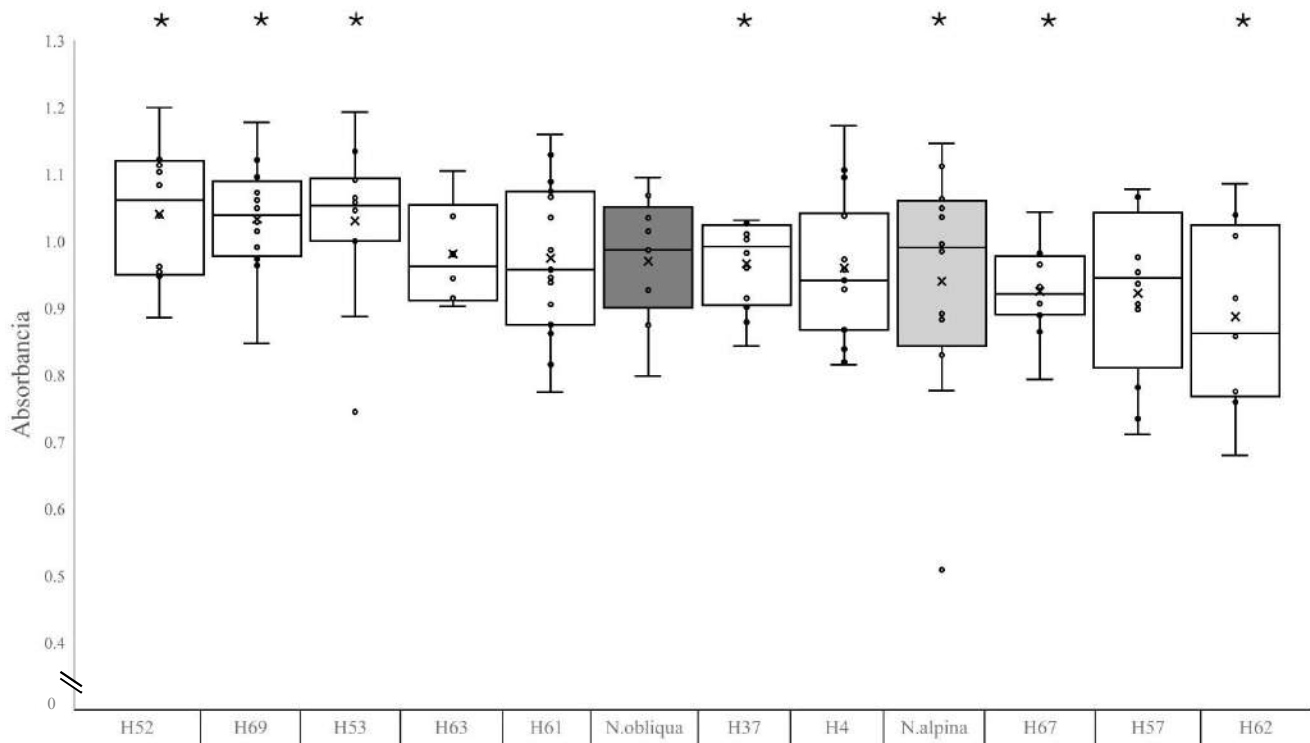


Figura 8. Gráfica de cajas y bigotes de rametos agrupados por híbrido clonal y parentales por especie para la banda de absorbancia 1736 cm^{-1} (hemicelulosa) indicándose los grupos con valores significativos. Diferencias significativas se muestran con un asterisco sobre la gráfica; la media representada mediante la x, la mediana por la línea horizontal al interior de la caja, los bigotes muestran los límites de los cuartiles 1 y 4, mientras que los puntos fuera de las cajas y bigotes indican valores atípicos o datos aislados

La figura 8 indica los grupos que se diferencian en su contenido de hemicelulosa, representado por la banda 1736 cm^{-1} se observan diferencias estadísticamente significativas en los rametos agrupados por híbridos clonales y parentales para H53, H67, H69, H62, H37, H52 y raulí.

Sin embargo, al aplicar la prueba de Tukey y de Dunn para distribuciones paramétricas y no paramétricas respectivamente, en las 7 bandas restantes, se encontraron parejas de grupos que si presentaron diferencias al analizarse. Los resultados de las comparaciones múltiples se observan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Diferencias significativas en grupos por bandas mediante análisis de varianza (Anova/Kruskal-Wallis) y comparaciones múltiples de los grupos mediante Tukey o Dunn en categoría (híbridos x parentales).

Banda	Anova/Kruskal-Wallis =p<0,05*	Relaciones múltiples con diferencias significativas de =p<0,05*
b3490	No	H53- H61; H53- H37
b1742	No	Sin diferencias
b1736	Sí	H53- H67; H53- H62; H53-raulí; H67- H69; H67- H52; H69 - H62; H69 - raulí; H62 - H52; H37- H52; H52 - raulí.
b1734	No	H53- H62; H67- H69; H67- H52; H69- H62; H67- raulí; H67-roble; H62- H52; H52-raulí.
b1594	Sí	H69- H62; H62- H52.
b1336	No	H53- H62; H61- H62; H63- H62; H67- H62; H62- H37; H62- H52; H62-raulí; H62-roble.
b1318	No	Sin diferencias
b1316	No	Sin diferencias
b1206	No	H57- H61; H61- H63; H61-raulí.
b1204	No	H57- H61; H61- H63.
b1200	No	Sin diferencias
b1040	No	H69- H37; H69-roble; H37- H52; H37-raulí.

4.2 Variación de la estructura química de la madera de híbridos *Nothofagus alpina* x *Nothofagus obliqua* y parentales de médula a corteza.

La figura 9 muestra a modo de ejemplo un espectro deconvolucionado¹ y la posición de las bandas usadas para describir la estructura química de híbridos y parentales mediante los índices de cristalinidad relativa ($1317/1336\text{ cm}^{-1}$; $1420/828\text{ cm}^{-1}$ y $1375/1512\text{ cm}^{-1}$) descritas en el cuadro 2.

El proceso de obtención de un índice de cristalinidad relativa se muestra en la figura 10. En esta se puede observar la medición de altura en cada una de las bandas usadas por un índice en particular.

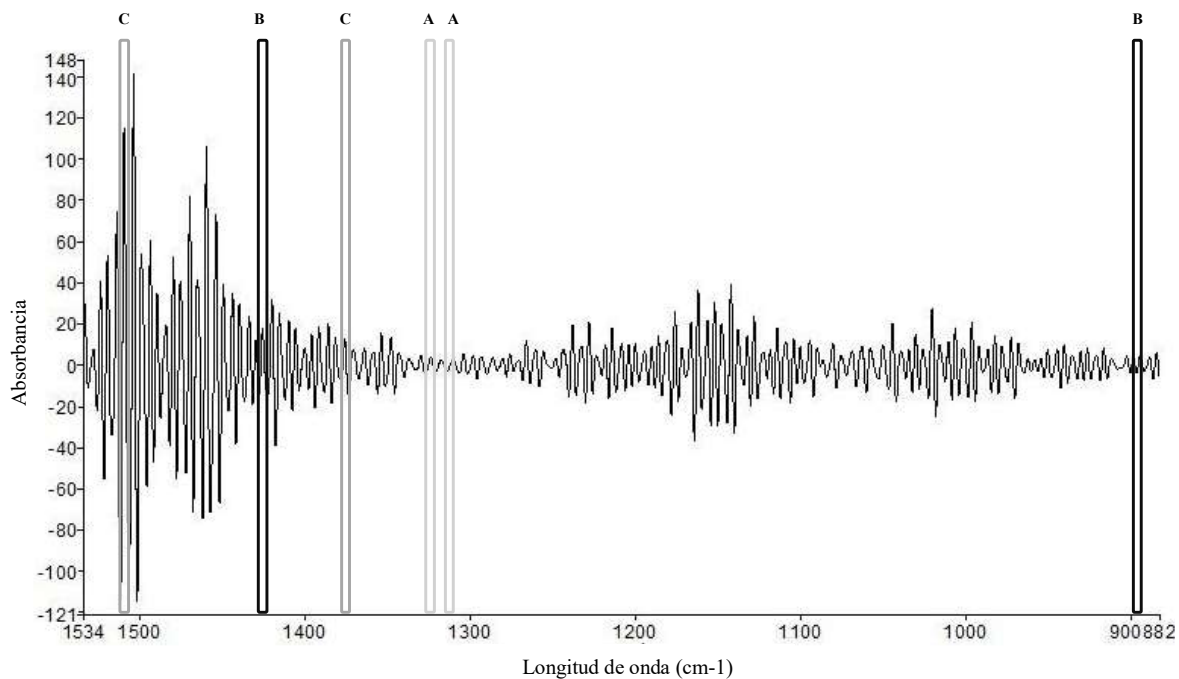


Figura 9. Espectro deconvolucionado de la posición al 25 % de médula a corteza del rameto 1 del clon H63 y las bandas asociadas a los índices de cristalinidad relativa [A]. $1317/1336\text{ cm}^{-1}$; [B]. $1420/898\text{ cm}^{-1}$ y [C]. $1375/1512\text{ cm}^{-1}$.

¹ La deconvolución en espectroscopia infrarroja (IR) es una técnica de procesamiento de datos utilizada para mejorar la resolución espectral mediante la separación de picos superpuestos, lo que permite identificar y analizar con mayor precisión los componentes individuales de un espectro complejo (O'Haver 2023).

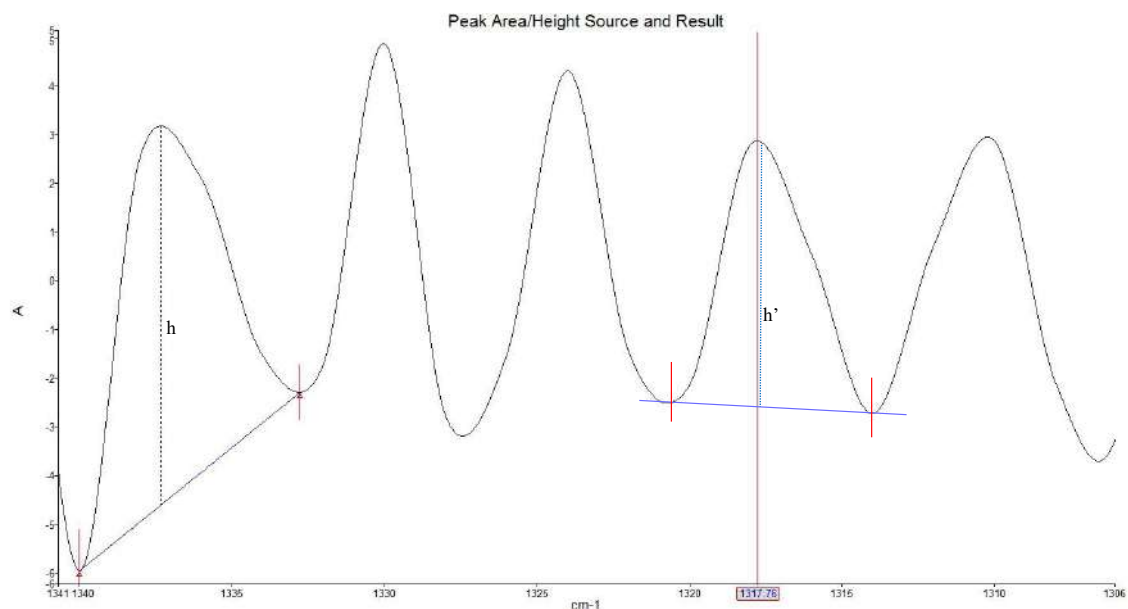


Figura 10. Espectro deconvolucionado de la posición al 25 % de médula a corteza del rameto 1 del clon H63 y medición de alturas de bandas consideradas para la determinación de uno de los índices de cristalinidad relativa

4.2.1 Análisis de varianza por grupo de cada categoría en función de la distancia médula a corteza (25 %, 50 % y 75 %)

Para el análisis de estructura química se aplicó el mismo esquema de análisis de varianza realizado en la sección anterior, con la diferencia del análisis de índices de cristalinidad relativa en lugar de bandas de absorbancia. La figura 11 ejemplifica el comportamiento médula a corteza de los tres índices de cristalinidad relativa considerados en este estudio. En este caso, al agruparse los datos en su totalidad, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las tres posiciones de médula a corteza para los tres índices de cristalinidad relativa.

Posteriormente, se agruparon las muestras según su origen, quedando en un primer grupo los híbridos clonales, en un segundo grupo los parentales de raulí y en un tercer grupo los parentales de roble. Cada grupo de esta categoría tampoco arrojó diferencias en la estructura química de médula a corteza, en ninguno de los tres índices de cristalinidad relativa.

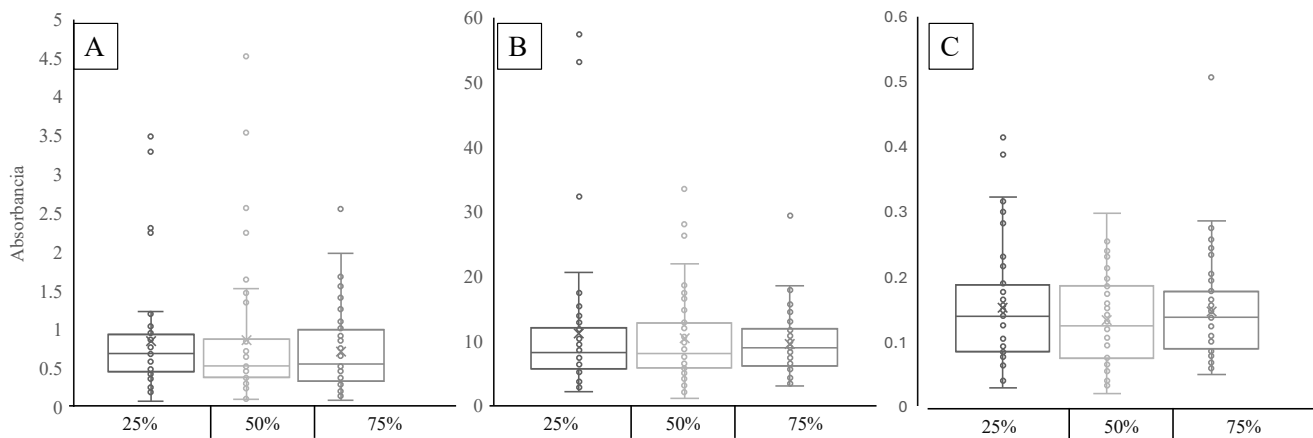


Figura 11. Variación médula a corteza de los índices de cristalinidad relativa al agrupar el total de tarugos; multi escala del eje Y representando niveles de absorbancia distintas entre bandas. (A) CriRa (1317/1336); (B) CriRb (1420/898); (C) CriRc (1375/1512).

Finalmente, los rametos se agruparon por híbridos clonales, además de agruparse los parentales por especie. De esta forma, se obtuvo que, en los índices de cristalinidad relativa revisados, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas de médula a corteza.

4.2.2. Análisis de varianza entre grupos de cada categoría en función del total de datos médula a corteza.

Se agruparon todos los rametos de los híbridos clonales considerados en el estudio y se compararon con las muestras agrupadas por especie de raulí y roble (figura 12). En este caso, en el índice CriRc (1375/1512) se encontraron diferencias estadísticamente significativas los grupos de híbridos clonales y raulí, con índices de cristalinidad relativa mayor en raulí por sobre los híbridos, sin apreciarse diferencias estadísticamente significativas con el roble.

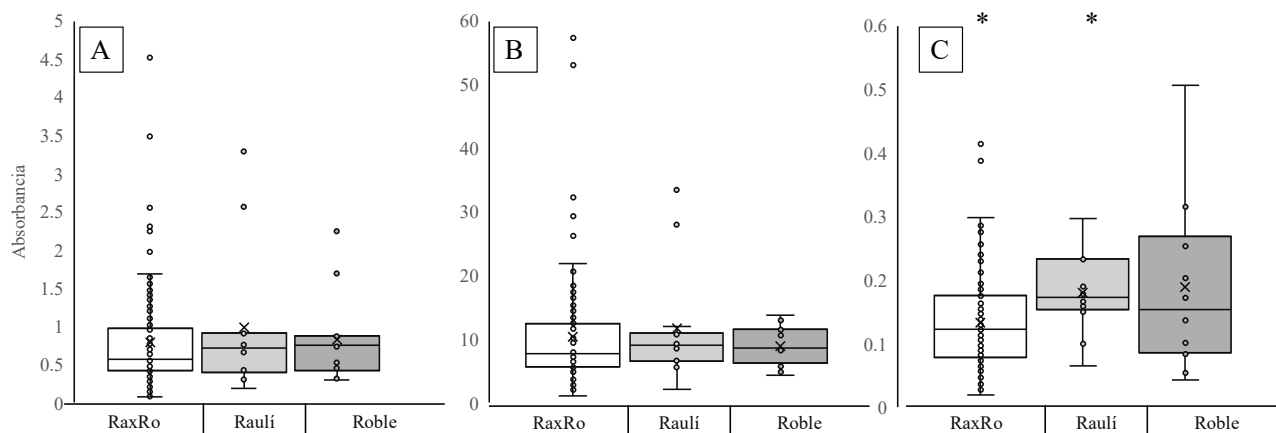


Figura 12. Variación de índices de cristalinidad relativa (A) CriRa ($1317/1336\text{ cm}^{-1}$); (B) CriRb ($1420/898\text{ cm}^{-1}$) y (C) CriRc ($1375/1512\text{ cm}^{-1}$) según su origen (híbridos, parentales de raulí y parentales de roble), con variación multi escala del eje Y. Asterisco sobre el gráfico representa grupos de $=P<0,05^*$.

Finalmente, se realizó la comparación entre todos los grupos genéticos, de forma que se estudió la posibilidad de obtener diferencias estadísticamente significativas entre clones individuales, así como entre cada clon y los parentales. A nivel de análisis grupal, ninguno de los índices de cristalinidad relativa revisados indicaron diferencias estadísticamente significativas, sin embargo, al realizar la prueba de comparaciones múltiples correspondiente en cada caso (paramétrica o no paramétrica), se encontraron pares en que se destacaban diferencias. En ese caso se repitieron las pruebas de forma individual a fin de corroborar la información, encontrándose 10 comparaciones individuales de rametos y parentales que arrojaron diferencias individuales en CriRb y CriRc; mientras que en CriRa no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para ninguna comparación individual. La información, así como la distribución representativa de los datos, se pueden observar en la figura 13.

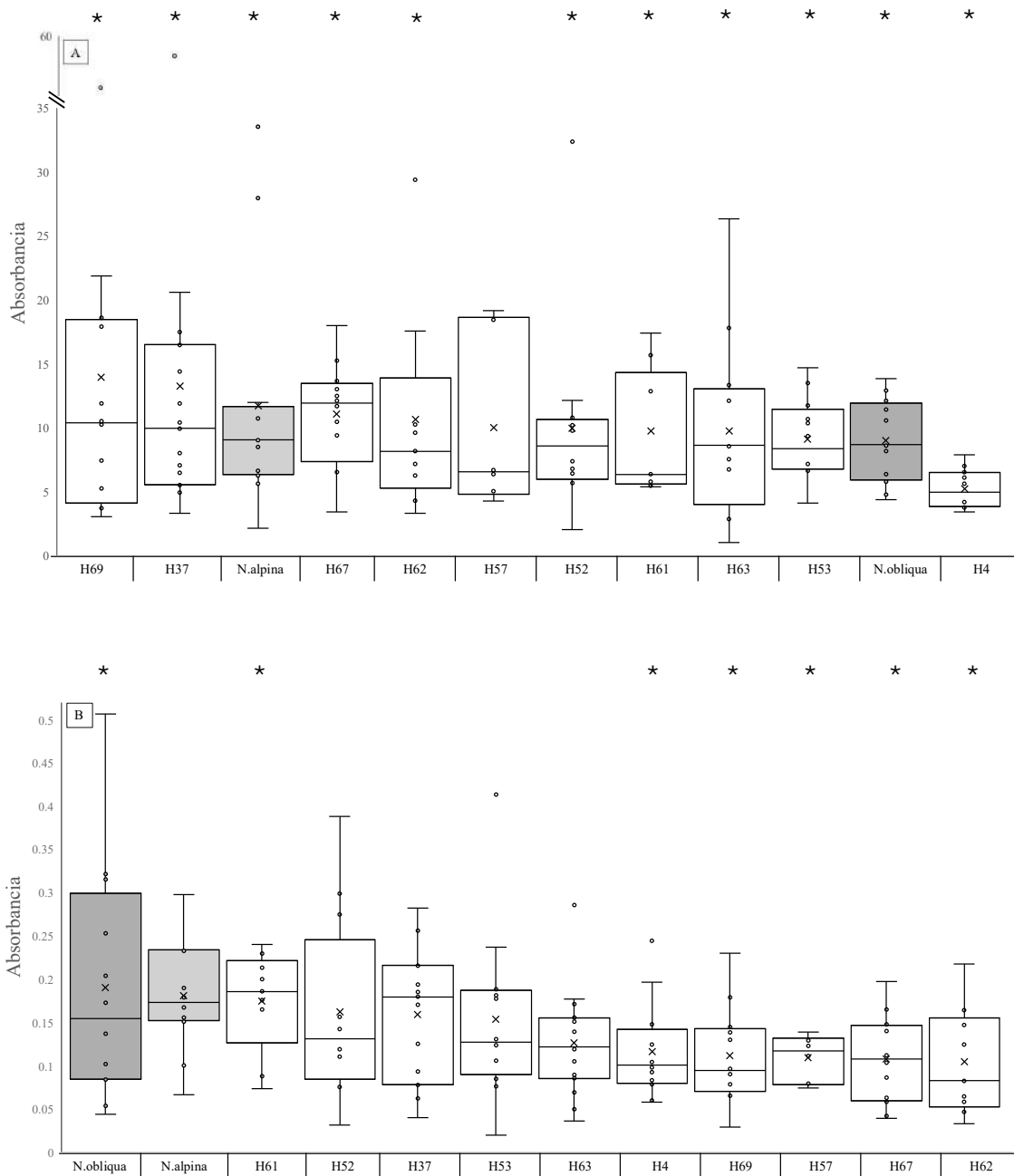


Figura 13. Cajas y bigotes para 2 índices de cristalinidad relativa, (A) CriRb y (B) CriRc; se indican con un asterisco (*) aquellos que, en cada situación, presentaron diferencias estadísticamente significativas ($\Rightarrow p < 0,05^*$) al realizar las comparaciones múltiples de Dunn, multi escala del eje Y representando niveles de absorbancia distintas entre bandas.

Se identifica que con el índice CriRb, el híbrido clonal H4 por su bajo valor en cristalinidad relativa en comparación con los demás grupos, se diferenció de todos los otros clones al realizar

comparaciones múltiples, excepto con H57. Por otro lado, H69 y H37 destacan como clones con mayores valores de cristalinidad relativa.

El índice CriRc, el híbrido clonal H61 se diferencia con H4, teniendo este último menores índices de cristalinidad relativa; los individuos agrupados de Raulí fueron los grupos que más destacaron en diferenciarse de otros, diferenciándose de H4, H57, G63, H67, H69 y H62; siendo raulí el grupo que presentó los índices de cristalinidad relativa más elevados. Además se encontraron diferencias significativas al comparar H61 con H67, H69 y H62, presentando H61 mayores índices que sus contrapartes.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1 Composición Química

En relación al primer nivel de análisis por grupo de cada categoría, al analizar cada grupo de datos desde la perspectiva de la posición en función de la distancia médula a corteza (25 %, 50 % y 75 %), éste indica que no existen diferencias estadísticamente significativas en ninguna de las categorías revisadas, es decir, en la totalidad de los datos, ni al agrupar los híbridos clonales y los parentales, ni al agrupar los rametos por híbrido clonal. Los resultados contrastan con la información encontrada por Wentzel *et al.* (2024) que indica una variación radial de la composición química para las bandas asociadas a celulosa: 3490, 1317, 898, y 1158 cm^{-1} . Sin embargo, hay que considerar que este estudio difiere de Wentzel *et al.* (2024) en las edades de los individuos.

En la última categoría de este nivel (híbridos clonales x parentales), se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los grupos para las bandas 1594 cm^{-1} (lignina a partir de la vibración del esqueleto aromático y estiramiento de C = O) permitiendo diferenciar los híbridos clonales H62, H69 y H52 entre sí. Hay varios trabajos que permiten visualizar la sensibilidad de la lignina en este tipo de estudio. Colom y Carrillo (2005) distinguen maderas latifoliadas de coníferas, en cambio, Traoré *et al.* (2017) y Wentzel *et al.* (2024) diferencian una misma especie en diferentes sitios, corroborando la sensibilidad de la banda 1594 cm^{-1} . La banda 1736 cm^{-1} (hemicelulosa) presentó

diferencias para 7 de los 12 grupos analizados, destacándose los híbridos clonales H53, H52 y los clones parentales de raulí como aquellos con diferencias de los otros grupos. Pandey (1999) y Poletto *et al.* (2012) utilizan las bandas 1734 – 1736 cm^{-1} para diferenciar el material en su estudio.

El resto de las bandas analizadas no presentaron diferencias estadísticamente significativas en sus medias, sin embargo, algunas bandas se destacan de otras, por ejemplo, las bandas: 3490, 1336, 1206-1204 y 1040 cm^{-1} logran visualizar diferencias significativas en comparaciones múltiples de los grupos mediante Tukey o Dunn al comparar los híbridos clonales con parentales.

La capacidad de discriminación por composición química se destacó en el nivel entre grupos de cada categoría en función del total de datos médula a corteza, específicamente en la categoría de híbridos clonales x parentales. Apareciendo las bandas 1594 cm^{-1} (lignina a partir de la vibración del esqueleto aromático y estiramiento de C=O) y 1734-1736 cm^{-1} (hemicelulosa) con las mayores diferencias significativas entre todas las categorías analizadas.

5.2 Estructura química

En el análisis por grupo para cada categoría en función de la distancia médula a corteza (25 %, 50 % y 75 %), los 3 índices de cristalinidad relativa considerados en este estudio, no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre posiciones. El resultado es concordante con los obtenidos por Roa (2020), que no encontró diferencias estadísticamente significativas entre los anillos 5 y 12 de *Pinus radiata*. A diferencia de Wentzel *et al.* (2024), quienes encontraron variación radial del índice de cristalinidad relativa 1317/1336. La diferencia principal entre estos estudios es la edad; en el caso de este estudio, corresponde a individuos de 4,5 años, y el estudio de Roa (2020) hasta 12 años, mientras que Wentzel *et al.* (2024) consideró edades de 14, 21 y 25 años. Esto indica que la edad es un factor a considerar al momento de evaluar la estructura química.

En el siguiente nivel de análisis: Entre grupos de cada categoría en función del total de datos médula a corteza, en la categoría de grupos de híbridos clonales x parentales, el índice de cristalinidad relativa CriRc (1375/1512 cm^{-1}), que involucra la relación entre las holocelulosas y lignina, presentó diferencias estadísticamente significativas entre el grupo de híbridos clonales y el parental raulí, presentando este último una mayor cristalinidad relativa. Sin embargo, este índice debe ser interpretado tomando en consideración que no está referido a la cristalinidad de la celulosa propiamente tal, sino más bien, a la

relación entre porciones poliméricas (holocelulosas y lignina). Esta relación a medida que incrementa, indica una menor presencia de lignina, esto podría explicar las diferencias entre los híbridos clonales y el parental raulí, si es que este último se hubiese ubicado en los bordes de los bloques del ensayo de Trafún. Díaz-vaz (2003) indica que una de las singularidades típicas de la madera de tracción es el reducido contenido de lignina; sin embargo, por la disposición de los bloques del ensayo, esto no es consistente. En cualquier caso, vale la pena considerar estas diferencias en revisiones futuras.

En relación a la última categoría, (híbridos clonales x parentales) los rametos agrupados por clon no mostraron diferencias significativas en su conjunto, pero al realizar el análisis de comparaciones múltiples, tanto CriRb como CriRc presentan parejas con diferencias estadísticamente significativas. Ambos índices destacan al híbrido clonal H4 con una cristalinidad relativa significativamente menor a los demás híbridos y parentales. A pesar de que ambos índices tienen interpretaciones distintas, el resultado es el mismo. H4 para CriRb es el híbrido clonal más amorfo en relación al resto de los híbridos y parentales. Para CriRc, H4 es el híbrido clonal que presenta una naturaleza juvenil más marcada, dado que los bajos valores de este índice, reflejan una mayor proporción de lignina; esto último como una de las características propias de la madera juvenil. Por otro lado, el índice CriRc presenta sus mayores valores en el híbrido clonal H61 y el parental raulí, diferenciándolos significativamente del resto. Como se mencionó anteriormente, esta relación a medida que incrementa, indica una menor presencia de lignina, se podría interpretar que a los 4,5 años, es el menos juvenil de los híbridos.

En conclusión, en este estudio, la capacidad de encontrar diferencias estadísticamente significativas en composición y estructura química varía en función del nivel y categoría de análisis. A partir de ello, se concluye que la hipótesis original se cumple parcialmente, ya que la estructura química permitiría una mejor diferenciación entre híbridos en la medida que se mejoren aspectos metodológicos.

Los índices usados en este estudio muestran diferentes capacidades para discriminar frente a los diferentes niveles y categorías consideradas, por lo cual es muy importante, para trabajos futuros, contrastar estos índices de cristalinidad relativa con la metodología de referencia, es decir, difracción de Rayos X (Wentzel *et al.* 2019).

En base a lo estudiado, la espectroscopía FT-IR es una herramienta efectiva para caracterizar la composición químico-estructural de la madera en raulí, roble y sus híbridos, sin embargo, es necesario realizar ajustes metodológicos en la obtención de las muestras. Se recomienda usar esta técnica infrarroja con una metodología que permita que la variación radial pueda ser evaluada anualmente en madera

temprana y madera tardía, que componen el anillo de crecimiento. Además, en función de ello, podría ser necesario necesario evaluar el tamaño muestral.

6. REFERENCIAS

- Atkinson MD, AP Jervis, RS Sangha. 1997. Discrimination between *Betula pendula*, *B. pubescens* and their hybrids using near infrared reflectance spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Research* 27(11): 1896-1900.
- Bruker. 2022. Guide to Applications of IR Spectroscopy. Consultado 21 jul 2025. Disponible en <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/infrared-and-raman/guide-to-applications-of-ir-spectroscopy.html>
- Casas A, MV Alonso, M Oliet, E Rojo, F Rodríguez. 2012. FTIR analysis of lignin regenerated from *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* woods dissolved in imidazolium-based ionic liquids. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 87(4): 472-480.
- Chen H, C Ferrari, M Angiuli, J Yao, C Raspi, E Bramanti. 2010. Qualitative and quantitative analysis of wood samples by Fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Carbohydrate Polymers* 82(3), 772–778. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.05.052>
- Colom X, F Carrillo. 2005. Comparative study of wood samples of the northern area of Catalonia by FTIR. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 25(1-2): 1-11.
- Díaz-Vaz O., J. 2003. Anatomía de maderas. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 151 p.
- Donoso, C., Morales, J., & Romero, M. 1990. Hibridación natural entre roble (*Nothofagus obliqua*) (Mirb) Oerst. y raulí (*N. alpina*) (Poepp. & Endl.) Oerst, en bosques del sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 63: 49-60.
- Esteves B, A Velez Marques, I Domingos, H Pereira. 2013. Chemical changes of heat treated pine and eucalypt wood monitored by FTIR. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 15(2): 245-258.
- Faix BO. 1991. Classification of Lignins from Different Botanical Origins by FT-IR Spectroscopy. *Holzforschung* 45(1): 21-27

- FUCOA. 2020. Forestación con híbridos de roble-raulí [Podcast episodio]. Consultado 25 jul. 2025. Innovate. Disponible en <http://fucoa.cl/podcast/innovate-episodio-26-forestacion-con-hibridos-de-roble-raulí/>
- Javier-Astete, R. E. 2021. Validación de la metodología para la determinación de lignina, celulosa y hemicelulosa por espectroscopía infrarroja en árboles. Tesis Biología, Lima, Perú. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Agraria La Molina. 128 p. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/358741405>
- Lacerda M, T Franca, C Calvani, B Marangoni, P Teodoro, CN Campos, FH Baio, GB Azevedo, C Cena. 2024. A simple method for *Eucalyptus* species discrimination: FTIR spectroscopy and machine learning. *Results in Chemistry* 7:101233.
- Lebedev VG, TN Lebedeva, AI Chernodubov, KA Shestibratov. 2020. Genomic selection for forest tree improvement: Methods, achievements and perspectives. *Forests* 11(11): 1190.
- Lionetto F, R Del Sole, D Cannoletta, G Vasapollo, A Maffezzoli. 2012. Monitoring wood degradation during weathering by cellulose crystallinity. *Materials* 5(10): 1910-1922
- Méndez-Mejías L. 2016. Efectos del termotratamiento sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la madera de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* proveniente de plantaciones forestales. Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. Cartago, Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 58 p.
- O'Haver T. 2023. Handbook of Scientific Signal Processing. College Park, Maryland, Estados Unidos. University of Maryland. 555 p.
- Olsson AM, L Salmén. 2004. The association of water to cellulose and hemicellulose in paper examined by FTIR spectroscopy. *Carbohydrate Research* 339(4): 813-818.
- Orgogozo V., B Morizot, A Martin. 2015. The differential view of genotype-phenotype relationships. *Frontiers in genetics* 6: 179.
- Pandey KK. 1999. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science* 71(12): 1969-1975.
- Poletto, M., Zattera, A. J., Forte, M. M. C., & Santana, R. M. C. 2012. *Structural differences between wood species: Evidence from chemical composition, FTIR spectroscopy, and thermogravimetric analysis.* Journal of Applied Polymer Science, 126(1), E336–E343. <https://doi.org/10.1002/app.36991>
- Popescu CM, G Singurel, MC Popescu, C Vasile, DS Argyropoulos, S Willför. 2009. Vibrational spectroscopy and X-ray diffraction methods to establish the differences between hardwood and softwood. *Carbohydrate Polymers* 77(4): 851-857.

- Roa C. 2020. Caracterización cristaloquímica de la madera de pinus radiata D. Don mediante microscopía infrarroja FTIR Tesina Ingeniera Forestal. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile. 39 p.
- Shi J, D Xing, J Lia. 2012. FTIR Studies of the Changes in Wood Chemistry from Wood Forming Tissue under Inclined Treatment. *Energy Procedia* 16: 758-762.
- Thermo Fisher Scientific (TFS). 2016. *Aplicaciones de FTIR*. Consultado 1 nov. 2025. Disponible en <https://www.thermofisher.com/cl/es/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/molecular-spectroscopy/fourier-transform-infrared-spectroscopy/applications.html>
- Thygesen A, J Oddershede, H Lilholt, AB Thomsen, K Ståhl. 2005. On the determination of crystallinity and cellulose content in plant fibres. *Cellulose* 12(6): 563–576.
- Traoré M, J Kaal, A Martínez Cortizas. 2018. Differentiation between pine woods according to species and growing location using FTIR-ATR. *Wood science and technology* 52(2): 487-504.
- Universidad Austral de Chile (UACH). 2019. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Noticias. Proyectos logran exitoso desarrollo de híbridos de roble–raulí. Consultado 1 nov. 2025. Disponible en <https://www.forestal.uach.cl/noticias/post.php?s=2019-12-19-proyectos-logran-exitoso-desarrollo-de-hibridos-de-roble-rauli>
- Vârban R, I Crişan, D Vârban, A Ona, L Olar, A Stoie, R Ştefan. 2021. Comparative FT-IR Prospecting for Cellulose in Stems of Some Fiber Plants: Flax, Velvet Leaf, Hemp and Jute. *Applied Sciences* 11(18): 8570.
- Wang, Y., Wang, P., Xu, C., Sun, S., Zhou, Q., Shi, Z., Li, J., Chen, T., Li, Z., & Cui, W. (2015). Discrimination and chemical characterization of different *Paeonia lactifloras* (*Radix Paeoniae Alba* and *Radix Paeoniae Rubra*) by infrared macro-fingerprint analysis-through-separation. *Journal Of Molecular Structure*, 1099, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2015.06.035>
- Wentzel M., A Rolleri, H Pesenti, H Militz. 2019. Chemical analysis and cellulose crystallinity of thermally modified *Eucalyptus nitens* wood from open and closed reactor systems using FTIR and X-ray crystallography. *European Journal of Wood and Wood Products* 77 (4): 517–525.
- Wentzel M., H Pesenti, F. Droppelmann, A Rolleri. 2024. Thinning wood properties of *Nothofagus alpina* under three different silvicultural conditions. *Maderas. Ciencia y tecnología* 26(7): 1-16.
- Zobel, B. J., & Talbert, J. 1984. Applied Forest Tree Improvement. New York: John Wiley & Sons. 505 p.

7. ANEXOS



Figura 14. Tarugo de incremento y soporte, montados para su medición.

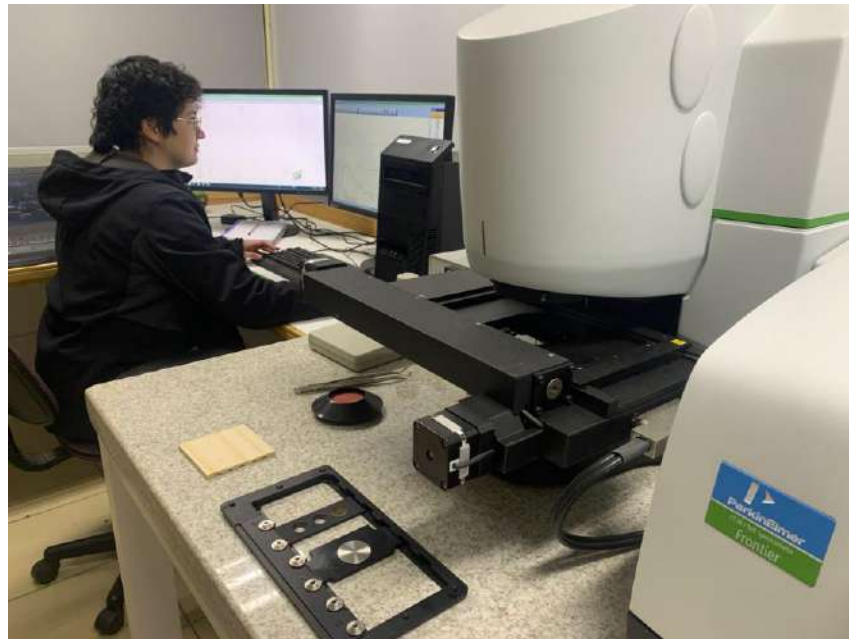


Figura 15. Uso y montaje del equipo de espectroscopía infrarroja.

Cuadro 4. Medición de absorbancia de las bandas seleccionadas

clon	rameto	posición	b3490	b1742	b1736	b1734	b1594	b1336	b1318	b1316	b1206	b1204	b1200	b1040
H4	1	1	1.9903	1.0933	1.0491	1.0390	0.7665	0.1263	0.0746	0.0671	0.0014	0.0047	0.0063	0.0502
H4	1	2	1.9720	1.1965	1.1458	1.0923	0.9146	0.1354	0.1245	0.1100	0.0082	0.0054	0.0035	0.0277
H4	1	3	1.9922	1.1415	1.1115	1.0706	0.8733	0.1060	0.0811	0.0737	0.0086	0.0111	0.0101	0.0249
H4	2	1	1.9087	1.0277	0.9954	0.9486	0.7321	0.1128	0.0958	0.0917	0.0025	0.0055	0.0008	0.0541
H4	2	2	1.9595	1.0454	0.9845	0.9331	0.7804	0.1369	0.1092	0.0854	0.0175	0.0156	0.0196	0.0467
H4	2	3	1.9343	0.8884	0.8296	0.7857	0.4677	0.0619	0.0136	0.0009	0.0023	0.0012	0.0072	0.0549
H4	3	1	1.9857	1.1503	1.0630	0.998	0.8483	0.1167	0.0801	0.0725	0.0019	0.0067	0.0100	0.0187
H4	3	2	1.8867	1.1149	1.0358	0.9711	0.7610	0.0845	0.0527	0.0439	0.0048	0.0073	0.0178	0.0199
H4	3	3	1.9814	0.9105	0.8914	0.8555	0.7632	0.0749	0.0525	0.0376	0.0028	0.0003	0.0013	0.0234
H4	4	1	1.9808	0.9485	0.8822	0.8399	0.6264	0.0829	0.0603	0.0466	0.0111	0.0208	0.0008	0.0370
H4	4	2	1.9887	0.8137	0.7762	0.7473	0.6103	0.1102	0.0982	0.0859	0.0123	0.0064	0.0037	0.0954
H4	4	3	1.9716	0.5278	0.5082	0.4912	0.3791	0.0827	0.0626	0.0430	0.0010	0.0091	0.0188	0.2449
H53	1	1	1.9790	1.1055	1.0476	1.0018	0.8449	0.1328	0.1123	0.1035	0.0015	0.0039	0.0042	0.0561
H53	1	2	1.9538	1.2286	1.1920	1.1377	0.8802	0.1650	0.1351	0.1130	0.0040	0.0086	0.0074	0.0350
H53	1	3	1.9556	1.1851	1.1338	1.0688	0.8745	0.1157	0.0953	0.0789	0.0024	0.0052	0.0140	0.0317
H53	2	1	1.9727	0.9304	0.8865	0.8514	0.6526	0.1254	0.0767	0.0626	0.0067	0.0059	0.0061	0.0376
H53	2	2	1.9673	1.1525	1.0909	1.0519	0.7407	0.1135	0.0909	0.0756	0.0097	0.0108	0.0017	0.0264
H53	2	3	1.9413	1.0969	1.0575	1.0275	0.7135	0.1110	0.1070	0.0923	0.0005	0.0027	0.0008	0.0392
H53	3	1	1.9516	1.1269	1.0639	0.9997	0.7908	0.1047	0.0986	0.0978	0.0149	0.0130	0.0101	0.0504
H53	3	2	1.9528	1.1532	1.0000	1.0344	0.7770	0.1148	0.1026	0.0908	0.0156	0.0253	0.0158	0.0335
H53	3	3	1.9017	0.78	1.0000	0.7483	0.4904	0.0138	0.0193	0.0141	0.0096	0.0005	0.0018	0.0396
H53	4	1	1.9852	0.9292	1.0949	0.8356	0.5396	0.0979	0.0508	0.0389	0.0129	0.0134	0.0155	0.0434
H53	4	2	1.9435	0.7656	0.7444	0.7230	0.6015	0.1469	0.1733	0.1543	0.0310	0.0320	0.0103	0.1042
H53	4	3	1.9696	1.0857	1.0461	1.0105	0.7852	0.1453	0.1282	0.1117	0.0053	0.0028	0.0004	0.0372
H57	1	1	1.9861	1.0827	1.0370	0.9992	0.8117	0.1311	0.1160	0.0991	0.0149	0.0051	0.0037	0.0475
H57	1	2	1.9798	1.0197	0.9801	0.9384	0.7517	0.1440	0.1178	0.1011	0.0055	0.0074	0.0052	0.0477
H57	1	3	1.9497	0.9433	0.9146	0.8779	0.7412	0.0812	0.0486	0.0409	0.0009	0.0081	0.0185	0.0292
H57	2	1	1.9493	1.0004	0.9441	0.8991	0.5732	0.0843	0.0457	0.0327	0.0105	0.0056	0.0032	0.0288
H57	2	2	1.9994	0.9593	0.9019	0.8536	0.5456	0.0743	0.0583	0.0494	0.0005	0.0023	0.0010	0.0536
H57	2	3	1.9684	1.1389	1.1044	1.0573	0.8350	0.1309	0.1011	0.0908	0.0131	0.0048	0.0006	0.0228
H61	1	1	1.9990	1.0745	1.0947	1.0059	0.8324	0.1365	0.1182	0.1032	0.0015	0.0032	0.0001	0.0135
H61	1	2	1.9947	1.0383	1.0145	0.9841	0.7464	0.1604	0.1489	0.1296	0.0058	0.0099	0.0097	0.0361
H61	1	3	1.9982	0.9166	0.8739	0.8378	0.7176	0.1412	0.1350	0.1167	0.0074	0.0016	0.0044	0.0837
H61	2	1	1.9897	1.0828	1.0346	0.9897	0.7805	0.1322	0.1050	0.0902	0.0074	0.0035	0.0098	0.0229

H61	2	2	1.9490	0.9984	0.9265	0.8887	0.5348	0.0806	0.0399	0.0269	-	0.0017	0.0028	0.0008	0.0636
H61	2	3	1.9968	1.0999	1.0677	1.0309	0.8160	0.1273	0.1037	0.0925	0.0058	0.0057	0.0053	0.0334	
H61	3	1	1.9450	1.0504	0.9861	0.9331	0.6485	0.0463	0.0561	0.0366	0.0239	0.0311	0.0103	0.0017	
H61	3	2	1.9756	0.8374	0.7982	0.7703	0.6270	0.1242	0.1145	0.1016	0.0241	0.0276	0.0141	0.1247	
H61	3	3	1.9770	0.9844	0.9307	0.8989	0.6736	0.1193	0.0872	0.0728	0.0027	0.0033	0.0009	0.0300	
H63	1	1	1.9493	1.0804	1.0351	0.9533	0.8187	0.1091	0.0965	0.0805	0.0045	0.0057	0.0016	0.0320	
H63	1	2	1.9846	0.9915	0.9450	0.8962	0.7261	0.0916	0.0829	0.0665	0.0025	0.0086	0.0027	0.0264	
H63	1	3	1.9676	1.1909	1.1288	1.0643	0.8295	0.1641	0.1254	0.1066	0.0243	0.0207	0.0040	0.0376	
H63	2	1	1.9475	1.028	0.9860	0.9252	0.7488	0.1067	0.0906	0.0793	0.0038	0.0009	0.0149	0.0071	
H63	2	2	1.9201	0.8472	0.8154	0.7633	0.6331	0.1290	0.1019	0.0783	0.0055	0.0069	0.0010	0.0536	
H63	2	3	1.9571	0.9356	0.8745	0.8190	0.6628	0.0866	0.0510	0.0401	0.0192	0.0170	0.0007	0.0507	
H63	3	1	2.0000	0.8287	0.7733	0.7353	0.5385	0.0828	0.0185	0.0100	0.0137	0.0128	0.0101	0.0285	
H63	3	2	1.9890	1.1453	1.0888	1.0330	0.7892	0.0997	0.0801	0.0624	0.0131	0.0059	0.0067	0.0721	
H63	3	3	1.9577	0.9428	0.9047	0.8733	0.6801	0.1535	0.1352	0.1153	0.0094	0.0070	0.0006	0.0374	
H63	4	1	1.9815	1.1064	1.0743	1.0186	0.8474	0.1272	0.1326	0.1213	0.0101	0.0047	0.0103	0.0561	
H63	4	2	1.9035	1.2759	1.1595	1.0726	0.9424	0.0759	0.0821	0.0846	0.0001	0.0076	0.0034	0.0297	
H63	4	3	1.9770	0.9915	0.9570	0.9154	0.7808	0.1277	0.1207	0.1119	0.0145	0.0196	0.0165	0.0546	
H63	5	1	1.9887	0.8967	0.8618	0.8269	0.6348	0.1376	0.0967	0.0851	0.0097	0.0086	0.0028	0.0379	
H63	5	2	1.9717	0.9809	0.9378	0.8939	0.6554	0.1344	0.1028	0.0872	0.0053	0.0085	0.0076	0.0331	
H63	5	3	1.9908	1.0882	1.0656	1.0209	0.8381	0.1271	0.1087	0.0968	0.0044	0.0058	0.0064	0.0576	
H67	1	1	1.9949	0.947	0.9054	0.8740	0.6739	0.1317	0.0945	0.0788	0.0032	0.0020	0.0046	0.0233	
H67	1	2	1.9753	1.1302	1.0771	1.0327	0.7145	0.1302	0.1180	0.1044	0.0052	0.0079	0.0159	0.0346	
H67	1	3	1.9654	1.0259	0.9751	0.9323	0.7370	0.1252	0.1039	0.0843	0.0046	0.0076	0.0048	0.0346	
H67	2	1	1.9453	1.0987	1.0655	1.0252	0.9483	0.1506	0.1648	0.1489	0.0064	0.0098	0.0137	0.0410	
H67	2	2	1.9987	1.1304	1.0679	1.0214	0.7925	0.1421	0.1115	0.0948	0.0017	0.0042	0.0093	0.0571	
H67	2	3	1.9583	0.9909	0.9532	0.9184	0.7530	0.1434	0.1406	0.1215	0.0044	0.0006	0.0000	0.0336	
H67	3	1	1.9820	0.7677	0.7340	0.7044	0.6587	0.1085	0.0909	0.0765	0.0150	0.0162	0.0092	0.1034	
H67	3	2	1.9844	0.7488	0.7108	0.6772	0.5612	0.0875	0.0820	0.0670	0.0041	0.0072	0.0050	0.1400	
H67	3	3	1.9945	0.9502	0.9356	0.8847	0.6210	0.1231	0.0675	0.0517	0.0078	0.0038	0.0139	0.0157	
H67	4	1	1.9698	0.8454	0.7813	0.7449	0.6414	0.1139	0.0720	0.0597	0.0092	0.0084	0.0035	0.0577	
H67	4	2	1.9973	0.9337	0.8975	0.8484	0.7411	0.1047	0.1102	0.1026	0.0152	0.0155	0.0165	0.0463	
H67	4	3	1.9694	0.9871	0.9567	0.9062	0.7272	0.1000	0.0572	0.0481	0.0094	0.0041	0.0024	0.0397	
H69	1	1	1.9532	1.0352	1.0144	0.9739	0.8697	0.1058	0.1055	0.0910	0.0066	0.0111	0.0118	0.0215	
H69	1	2	1.9702	1.0084	0.9731	0.9246	0.7297	0.0782	0.0628	0.0525	0.0024	0.0065	0.0003	0.0220	
H69	1	3	1.9816	1.0066	0.9637	0.9222	0.6974	0.0853	0.0603	0.0503	0.0015	0.0022	0.0011	0.0353	

H69	2	1	1.9731	1.1296	1.0724	1.0049	0.8531	0.1218	0.1061	0.0949	0.0099	-	-	0.0006	0.0642
H69	2	2	1.9507	1.2339	1.1775	1.1217	0.9240	0.1199	0.1020	0.0896	0.0209	-	-	0.0184	0.0442
H69	2	3	1.9955	1.0926	1.0489	1.0074	0.8307	0.1185	0.1005	0.0914	0.0012	-	-	0.0116	0.0156
H69	3	1	1.9838	1.037	0.9906	0.9491	0.7319	0.1088	0.0843	0.0729	0.0013	-	-	0.0021	0.0302
H69	3	2	1.9492	1.0503	1.0284	0.9960	0.8464	0.1328	0.1341	0.1198	0.0054	-	-	0.0009	0.0314
H69	3	3	1.9844	0.8976	0.8465	0.8109	0.6882	0.1110	0.0835	0.0718	0.0060	-	-	0.0032	0.0484
H69	4	1	1.9475	1.1393	1.0952	1.0335	0.8659	0.1559	0.1042	0.0912	0.0086	-	-	0.0052	0.0207
H69	4	2	1.9831	1.1683	1.1211	1.0730	0.8364	0.1509	0.1277	0.1143	0.0018	-	-	0.0180	0.0411
H69	4	3	1.9732	1.1292	1.0610	1.0017	0.8576	0.0867	0.0751	0.0624	0.0094	-	-	0.0198	0.0209
H62	1	1	1.9704	1.1299	1.0852	1.0403	0.7418	0.0749	0.0678	0.0604	0.0025	-	-	0.0038	0.0545
H62	1	2	1.8969	0.7544	0.6791	0.6368	0.3247	0.0988	0.0677	0.0497	0.0116	-	-	0.0095	0.1501
H62	1	3	1.9865	0.8098	0.7594	0.7136	0.7048	0.0927	0.1046	0.0869	0.0055	-	-	0.0071	0.0792
H62	2	1	1.9522	0.8359	0.7748	0.7315	0.6109	0.0896	0.0605	0.0394	0.0076	-	-	0.0009	0.0510
H62	2	2	1.9485	0.9448	0.9142	0.8637	0.6264	0.1050	0.0829	0.0733	0.0017	-	-	0.0029	0.0352
H62	2	3	1.9449	0.9265	0.8574	0.8091	0.6460	0.0843	0.0789	0.0590	0.0385	-	-	0.0128	0.0238
H62	3	1	1.9693	0.9289	0.8618	0.8176	0.5739	0.0999	0.0081	0.0014	0.0169	-	-	0.0147	0.0488
H62	3	2	1.9908	1.0591	1.0073	0.9641	0.6771	0.1113	0.0730	0.0619	0.0118	-	-	0.0054	0.0236
H62	3	3	1.9931	1.082	1.0389	0.9965	0.8306	0.1191	0.0924	0.0826	0.0002	-	-	0.0021	0.0158
H37	1	1	1.9763	0.9811	0.9332	0.8924	0.6682	0.1254	0.0783	0.0663	0.0054	-	-	0.0043	0.0406
H37	1	2	1.9748	0.8691	0.8187	0.7808	0.5845	0.1225	0.0685	0.0521	0.0106	-	-	0.0088	0.0419
H37	1	3	1.9992	0.9312	0.8715	0.8309	0.6654	0.1278	0.0525	0.0368	0.0007	-	-	0.0085	0.0487
H37	2	1	1.9739	1.0919	0.9574	0.9112	0.7544	0.0913	0.0738	0.0569	0.0031	-	-	0.0030	0.0455
H37	2	2	1.9674	1.1638	1.1055	1.0551	0.8271	0.1015	0.0893	0.0671	0.0149	-	-	0.0102	0.0561
H37	2	3	1.9432	1.0274	0.9725	0.9351	0.7791	0.1302	0.1157	0.1079	0.0079	-	-	0.0029	0.0615
H37	3	1	2.0000	1.0801	1.0376	1.0009	0.8582	0.1327	0.1212	0.1058	0.0011	-	-	0.0096	0.0333
H37	3	2	1.9995	1.1465	1.0947	1.0484	0.8298	0.1203	0.1171	0.1014	0.0045	-	-	0.0005	0.0143
H37	3	3	1.9992	0.9763	0.9406	0.9046	0.7707	0.1458	0.1405	0.1194	0.0040	-	-	0.0052	0.0647
H37	4	1	1.9850	0.9681	0.9275	0.8901	0.7168	0.1407	0.0785	0.0600	0.0040	-	-	0.0041	0.0447
H37	4	2	1.9995	1.0753	1.0413	1.0095	0.7652	0.1114	0.1041	0.0921	0.0011	-	-	0.0054	0.0345
H37	4	3	1.9917	0.884	0.8675	0.8348	0.6765	0.1024	0.0879	0.0755	0.0225	-	-	0.0232	0.0684
H37	5	1	1.9538	0.8715	0.8385	0.7944	0.7115	0.1087	0.0992	0.0802	0.0060	-	-	0.0011	0.0671
H37	5	2	1.9686	0.8516	0.8145	0.7802	0.6386	0.1262	0.1115	0.0939	0.0179	-	-	0.0045	0.1117
H37	5	3	1.9839	1.2673	1.1724	1.0946	0.9152	0.1192	0.1113	0.0961	0.0323	-	-	0.0089	0.0265
H52	1	1	1.9437	1.0307	0.9541	0.8927	0.7618	0.1167	0.0798	0.0599	0.0122	-	-	0.0025	0.0258
H52	1	2	1.9129	1.1757	1.1131	1.0494	0.8849	0.1421	0.1222	0.1075	0.0099	-	-	0.0097	0.0164
H52	1	3	1.9342	1.1795	1.1221	1.0488	0.9359	0.1096	0.0879	0.0734	0.0196	-	-	0.0128	0.0438

H52	2	1	1.9892	0.9459	0.8855	0.8471	0.6132	0.1136	0.0680	0.0518	-	-	-	0.0507
H52	2	2	1.9936	1.004	0.9474	0.9082	0.7614	0.1299	0.0839	0.0707	0.0108	0.0121	0.0068	0.0344
H52	2	3	1.9989	1.1436	1.1032	1.0661	0.9006	0.1366	0.1317	0.1188	0.0036	0.0054	0.0049	0.0262
H52	3	1	1.9911	1.0673	1.0382	1.0024	0.8673	0.1521	0.1479	0.1285	0.0081	0.0059	0.0179	0.0257
H52	3	2	1.9661	1.0041	0.9618	0.9192	0.6549	0.1042	0.0779	0.0572	0.0020	0.0068	0.0028	0.0828
H52	3	3	1.9818	0.999	0.9482	0.9115	0.7708	0.1437	0.1031	0.0886	0.0107	0.0142	0.0116	0.0469
H52	4	1	1.9594	1.1646	1.0838	1.0144	0.8741	0.0843	0.0738	0.0665	0.0076	0.0035	0.0004	0.0129
H52	4	2	1.9146	1.2821	1.1990	1.1297	0.9673	0.0943	0.0916	0.0760	0.0125	0.0090	0.0289	0.0200
H52	4	3	1.9858	1.1704	1.1256	1.0759	0.8999	0.1305	0.1232	0.1017	0.0072	0.0041	0.0053	0.0410
R1	1	1	1.9820	0.9599	0.9064	0.8719	0.6963	0.1239	0.0903	0.0713	0.0089	0.0089	0.0075	0.0362
R1	1	2	1.9810	0.9763	0.9325	0.8929	0.6574	0.1128	0.0550	0.0440	0.0027	0.0043	0.0030	0.0273
R1	1	3	1.9612	1.0879	1.0434	0.9967	0.8227	0.1227	0.1125	0.1025	0.0010	0.0046	0.0093	0.0384
R2	1	1	1.9674	0.8427	0.7929	0.7566	0.5518	0.1184	0.0629	0.0475	0.0132	0.0111	0.0066	0.0402
R2	1	2	1.9940	0.9829	0.9317	0.8915	0.5923	0.1279	0.0798	0.0675	0.0160	0.0144	0.0084	0.0284
R2	1	3	1.9834	1.0213	0.9828	0.9432	0.6808	0.1180	0.0944	0.0819	0.0020	0.0003	0.0022	0.0204
R3	1	1	1.9946	0.9244	0.8644	0.8270	0.5846	0.0823	0.0216	0.0098	0.0111	0.0113	0.0121	0.0355
R3	1	2	1.9739	0.9496	0.9103	0.8779	0.7216	0.1150	0.0798	0.0642	0.0061	0.0054	0.0011	0.0388
R3	1	3	1.9419	1.0156	0.9813	0.9508	0.8012	0.1312	0.1173	0.1000	0.0008	0.0052	0.0064	0.0511
R4	1	1	1.9121	0.9518	0.8924	0.8476	0.6882	0.0673	0.0371	0.0260	0.0039	0.0061	0.0086	0.0022
R4	1	2	1.9803	1.0014	0.9646	0.9219	0.7698	0.1231	0.0991	0.0898	0.0124	0.0152	0.0159	0.0367
R4	1	3	1.9290	0.9409	0.8889	0.8510	0.5816	0.1251	0.0917	0.0781	0.0043	0.0025	0.0075	0.0447
RO1	1	1	1.9951	1.0594	1.0153	0.9714	0.7500	0.1263	0.1083	0.0970	0.0053	0.0085	0.0056	0.0771
RO1	1	2	1.9505	1.0381	0.9817	0.9400	0.6637	0.1042	0.0951	0.0930	0.0065	0.0018	0.0119	0.0560
RO1	1	3	1.9437	0.9401	0.9003	0.8669	0.7224	0.1168	0.0897	0.0715	0.0120	0.0187	0.0157	0.0364
RO2	1	1	1.9216	1.058	1.0024	0.9674	0.5697	0.0916	0.0610	0.0546	0.0074	0.0144	0.0221	0.0541
RO2	1	2	1.9989	1.0696	1.0098	0.9566	0.6764	0.1145	0.0954	0.0810	0.0171	0.0055	0.0031	0.0292
RO2	1	3	1.9823	0.9992	0.9594	0.9189	0.6907	0.1362	0.1269	0.1094	0.0049	0.0032	0.0109	0.0644
RO3	1	1	1.9978	0.8951	0.8430	0.8073	0.6065	0.1299	0.0679	0.0518	0.0107	0.0086	0.0056	0.0390
RO3	1	2	1.9777	1.0656	1.0292	0.9974	0.8293	0.1339	0.1367	0.1246	0.0071	0.0120	0.0068	0.0247
RO3	1	3	1.9563	0.9277	0.9146	0.8859	0.6801	0.1338	0.1248	0.1087	0.0021	0.0070	0.0065	0.0426
RO4	1	1	1.9646	1.0668	10,309	0.955	0.6284	0.1010	0.0806	0.0591	0.0104	0.0026	0.0049	0.0445
RO4	1	2	1.9785	1.1123	1.0254	0.9807	0.7335	0.1083	0.0635	0.0502	0.0045	0.0063	0.0174	0.0270
RO4	1	3	1.9613	0.9112	0.8783	0.8407	0.6472	0.1289	0.1182	0.1073	0.0036	0.0061	0.0057	0.0709

Cuadro 5. Datos de cristalinidad relativa de cada ratio analizado.

clon	Rameto/árbol	posición	1317 /1336	1420 / 898	1375 / 1512
H4	1	1	0.254	7.8502	0.1036
H4	2	1	0.3621	3.7745	0.0974
H4	3	1	0.6824	3.7348	0.0779
H4	4	1	1.0406	4.2637	0.0924
H4	1	2	0.5682	6.317	0.1244
H4	2	2	0.8908	4.1571	0.0576
H4	3	2	0.6531	6.9759	0.1069
H4	4	2	0.7259	6.5144	0.1962
H4	1	3	1.6819	6.0892	0.1473
H4	2	3	1.9821	3.8477	0.0593
H4	3	3	0.2899	5.5938	0.0828
H4	4	3	0.6899	3.4156	0.244
H53	1	1	0.7993	4.0819	0.1884
H53	2	1	0.8854	7.2719	0.1808
H53	3	1	0.9971	6.6191	0.0756
H53	4	1	0.4205	11.6926	0.4135
H53	1	2	0.4212	6.5985	0.019
H53	2	2	0.2404	13.49	0.1305
H53	3	2	0.8474	10.6413	0.2364
H53	4	2	0.6977	14.647	0.1235
H53	1	3	1.0978	7.2857	0.1053
H53	2	3	0.1766	7.1488	0.084
H53	3	3	0.5595	9.3395	0.1086
H53	4	3	1.0184	10.3088	0.1769
H57	1	1	0.7815	6.6661	0.1386
H57	2	1	0.0772	6.3424	0.1287
H57	1	2	0.5187	4.9867	0.074
H57	2	2	0.4751	19.1344	0.0788
H57	1	3	0.5067	4.2252	0.1105
H57	2	3	0.375	18.4394	0.1222
H61	1	1	0.7877	17.3889	0.0873
H61	2	1	0.4299	6.3186	0.1759
H61	3	1	2.3105	5.4403	0.2295
H61	1	2	0.5284	12.8161	0.2127
H61	2	2	0.4099	5.3703	0.2396
H61	3	2	0.4872	5.7459	0.1856
H61	1	3	0.2702	15.6584	0.0732
H61	2	3	1.0235	5.7645	0.1643
H61	3	3	1.1135	12.9723	0.2001
H63	1	1	0.8646	12.7415	0.1508
H63	2	1	1.001	2.8152	0.1707
H63	3	1	0.6797	8.6587	0.1386
H63	4	1	0.5249	8.5134	0.1396

H63	5	1	0.6333	13.3158	0.1552
H63	1	2	0.6971	5.1704	0.1217
H63	2	2	0.3431	26.289	0.1047
H63	3	2	0.4368	7.5304	0.036
H63	4	2	1.5218	3.0345	0.0689
H63	5	2	0.7107	1.0005	0.1188
H63	1	3	1.4116	7.0443	0.085
H63	2	3	0.2102	17.7562	0.1766
H63	3	3	0.1519	12.0813	0.089
H63	4	3	0.6864	6.7155	0.2855
H63	5	3	2.5519	8.6923	0.0493
H67	1	1	0.8688	12.9721	0.0858
H67	2	1	0.5874	15.2436	0.0418
H67	3	1	0.3965	6.4875	0.1473
H67	4	1	0.6842	9.3828	0.0624
H67	1	2	0.52	12.1096	0.1399
H67	2	2	0.5336	10.4333	0.1972
H67	3	2	4.5279	17.948	0.1113
H67	4	2	0.2768	12.4659	0.039
H67	1	3	0.5619	6.6363	0.0576
H67	2	3	0.2689	13.61	0.1421
H67	3	3	0.1479	11.6466	0.103
H67	4	3	1.2669	3.3868	0.1645
H69	1	1	1.2308	10.2166	0.0283
H69	2	1	0.9494	3.7011	0.0917
H69	3	1	0.1886	53.016	0.1295
H69	4	1	3.4878	5.2073	0.0652
H69	1	2	0.2588	3.7391	0.2294
H69	2	2	0.3103	11.864	0.1783
H69	3	2	1.4024	21.8385	0.1442
H69	4	2	0.3762	18.5875	0.0959
H69	1	3	1.1389	7.4262	0.0785
H69	2	3	0.1665	3.0031	0.0897
H69	3	3	1.0324	17.8939	0.0667
H69	4	3	0.3315	10.4997	0.1382
H62	1	1	0.991	9.6008	0.0823
H62	2	1	0.4872	6.2321	0.1635
H62	3	1	0.4806	17.5348	0.2176
H62	1	2	1.6475	8.1279	0.0463
H62	2	2	1.4776	7.1301	0.0325
H62	3	2	0.5582	10.2282	0.1245
H62	1	3	0.0833	4.2624	0.0638
H62	2	3	0.8547	3.2957	0.1468
H62	3	3	0.4192	29.3937	0.0581
H37	1	1	0.6789	20.571	0.282

H37	2	1	1.2011	5.5059	0.062
H37	3	1	0.4345	57.3637	0.2155
H37	4	1	0.9845	5.0708	0.125
H37	5	1	0.8961	11.8498	0.0392
H37	1	2	0.4632	17.437	0.256
H37	2	2	0.264	7.9901	0.1871
H37	3	2	0.0987	4.8816	0.0929
H37	4	2	1.3478	3.2848	0.1852
H37	5	2	2.2477	16.466	0.0636
H37	1	3	0.4617	10.394	0.1791
H37	2	3	0.4778	14.3705	0.2566
H37	3	3	0.2028	9.9084	0.1938
H37	4	3	0.4141	7.0444	0.1698
H37	5	3	0.4217	6.4419	0.0776
H52	1	1	0.5315	6.76	0.3879
H52	2	1	0.7662	5.6264	0.2984
H52	3	1	0.4943	32.3276	0.0756
H52	4	1	0.6895	7.3304	0.1574
H52	1	2	0.3547	6.3935	0.0312
H52	2	2	0.4237	5.7915	0.1185
H52	3	2	0.1033	9.7231	0.0752
H52	4	2	3.5327	2.0204	0.1557
H52	1	3	0.7725	12.135	0.2749
H52	2	3	1.5545	10.1683	0.1134
H52	3	3	0.5235	10.7373	0.1424
H52	4	3	0.5447	10.2988	0.1098
raulí	1	1	0.3061	10.6816	0.0658
raulí	2	1	0.4243	9.0371	0.1892
raulí	3	1	3.2921	8.4478	0.1668
raulí	4	1	0.1918	2.094	0.2351
raulí	1	2	0.6802	9.1869	0.1503
raulí	2	2	0.326	33.5195	0.1585
raulí	3	2	0.7595	27.9322	0.2975
raulí	4	2	2.564	6.5923	0.2337
raulí	1	3	0.7849	9.0005	0.1553
raulí	2	3	0.9123	11.948	0.0996
raulí	3	3	0.9175	6.2299	0.2326
raulí	4	3	0.6625	5.6103	0.17855
roble	1	1	0.4544	12.0875	0.0863
roble	2	1	2.2418	13.8135	0.3147
roble	3	1	0.7372	5.757	0.3212
roble	4	1	0.8683	10.5352	0.0835
roble	1	2	1.6884	8.7055	0.0437
roble	2	2	0.8788	6.3535	0.253
roble	3	2	0.5286	8.5917	0.1723

roble	4	2	0.3026	4.3723	0.0535
roble	1	3	0.3349	12.8954	0.2035
roble	2	3	0.7605	4.7645	0.1362
roble	3	3	0.7876	8.1592	0.5062
roble	4	3	0.3127	11.4196	0.1019

Cuadro 6. Resumen de los resultados de la estadística aplicada a las bandas descriptoras de la composición química de las muestras. Considerando según la distribución la prueba paramétrica de Anova para distribuciones normales, y de Kruskal-Wallis no paramétrica para distribuciones no normales.

Banda	Distribución normal	Diferencias entre posiciones	Diferencias entre clones y parentales	Diferencias entre clones individuales y parentales
b3490	No	No	No	No
b1742	No	No	No	No
b1736	No	No	No	Sí *
b1734	No	No	No	No
b1594	Sí *	No	No	Sí*
b1336	Sí *	No	No	No
b1318	Sí *	No	No	No
b1316	No	No	No	No
b1206	No	No	No	No
b1204	No	No	No	No
b1200	Sí *	No	No	No
b1040	No	No	No	No