



¿DONDE ESTÁ LA MADERA ESTRUCTURAL?: ESTUDIO DE CASO EN PINO PONDEROSA

WHERE IS THE STRUCTURAL GRADE TIMBER?: CASE STUDY IN PONDEROSA PINE

Gonzalo Caballé^{1*}, Oscar Santaclara², Juan P. Diez¹, Federico Letourneau¹, Esther Merlo³, Alejandro Martinez Meier¹.

⁽¹⁾ Dr. Ing. Ftal., Laboratorio de Ecología, Ecofisiología y Madera (LEEMA), INTA EEA Bariloche, ⁽²⁾ Ing. Ftal., MADERA PLUS Calidad Forestal SL, Ourense, España, ⁽³⁾ Dr. Ing. Ftal., MADERA PLUS Calidad Forestal SL, Ourense, España

*Contacto: Gonzalo Caballé: caballe.gonzalo@inta.gob.ar

CÓDIGO: XXXX (Escriba el código asignado a su resumen)

Resumen

La calidad de la madera para uso estructural se define por sus propiedades físicas y mecánicas, entre las cuales, el módulo de elasticidad (MOE) es una de las principales. La posibilidad de predecir el MOE, a partir de métodos no destructivos sobre árbol en pie o trozas, representa una herramienta de utilidad para los tomadores de decisión a diferentes niveles. El presente trabajo condensa información generada en varios proyectos de investigación que pretenden establecer, a nivel de rodal y de árbol individual, variables de sencilla medición con influencia directa sobre el MOE del pino ponderosa creciendo en forestaciones del NW de la Patagonia de Argentina. A nivel de rodal, la densidad de manejo (300 a 2300 pl/ha), la edad (15 a 83 años) y la calidad de sitio (IS20: 6 a 22m), mostraron correlación positiva con el MOE presentando las dos últimas variables un efecto superior. A nivel de árbol individual, la esbeltez (altura total/diámetro a 1,3m) y la posición sociológica del árbol son dos factores relevantes. Los árboles más esbeltos, en general en posición co-dominante, presentaron mayor MOE. Una vez apeado el árbol, la segunda troza (3 a 6m de altura respecto al suelo) tiene mayor MOE que el resto de las trozas. En base a los resultados expuestos, la producción de madera estructural de pino ponderosa exigiría extender el turno de corta actual (36 años), priorizar los sitios de mayor calidad (IS20 >15m) y dentro de estos, manejar altas densidades de plantación seleccionando los árboles de mayor esbeltez como árbol objetivo.

Palabras-clave: MOE, métodos no destructivos, Patagonia Argentina,

Abstract

The structural grade timber is defined by its physical and mechanical properties, among which, the modulus of elasticity (MOE) is one of the main ones. The possibility of MOE predicting, from non-destructive methods on standing trees or logs, represents a useful tool for decision makers at different levels. The present work link the information generated in several research projects that aim to establish the variables, at stand and individual tree level, which are directly related to the modulus of elasticity of the ponderosa pine grown in Patagonia Argentina. At stand level, management density (300 to 2300 pl / ha), age (15 to 83 years) and site quality (IS20: 6 to 22m), showed positive and significant correlation with MOE. At the individual tree level, the slenderness (total height/diameter at 1.3m) and the social status of the tree are two relevant factors. The most slender trees, generally in a co-dominant position, presented a higher MOE. Once the tree has been felled, the second log (3 to 6m high compared to the ground) has a higher MOE than the rest of the logs. Based on the above results, the production of structural grade timber of ponderosa pine would require extending the current cutting cycle (36 years), giving priority to the highest quality sites (IS20 > 15m) and within these, managing high planting densities and selecting the trees of greater slenderness as a target tree.

Keywords: MOE, Nondestructive methods, Patagonia Argentina.



1. INTRODUCCIÓN

La calidad de madera de grado estructural se define por sus propiedades mecánicas y físicas en las que la rigidez (módulo de elasticidad, MOE), la resistencia a la flexión (módulo de ruptura, MOR) y la densidad, determinan el uso final apropiado y permiten clasificar la madera en clases resistentes (ej. EN 338 CEN 2016). Dentro de una misma especie, los valores que alcanzan estas propiedades son el resultado de las interacciones entre las condiciones ambientales del sitio de crecimiento, la disponibilidad de recursos, el manejo silvícola, e incluso la edad cambial a lo largo del fuste de los árboles, como así también su acervo genético (Zobel et al. 1995; Smith et al. 1997).

La relación entre la calidad estructural de la madera y la edad, el manejo silvícola o la calidad del sitio como fuente de variación ha sido estudiada de manera individual o conjunta para distintas especies en diferentes partes del mundo (Roper et al. 2004; Watt et al. 2009; Merlo et al. 2014; Watt & Trincado 2017). Un elemento clave de estos estudios ha sido el uso de herramientas acústicas portátiles que permiten realizar mediciones en árboles en pie o trozas sin afectar la calidad del árbol o las piezas de madera. La aplicabilidad del método reside en la relación existente entre las propiedades físico-mecánicas de la madera, en particular el MOE, y la velocidad de propagación de las ondas sónicas o ultrasónicas a través de la madera (Bucur 1985). La velocidad será mayor cuanto menor sea la presencia de defectos generales (fendas, rajaduras o desviaciones de fibras) o puntuales (nudos o grupos de nudos) en la madera, provocando la interrupción de la continuidad de transmisión de la onda, y por lo tanto, retardando su llegada al receptor (Bucur & Archer 1984).

En coníferas como el pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) o el pino marítimo (*Pinus pinaster*), se comprobaron correlaciones positivas entre el MOE y la edad cambial y entre el MOE y la calidad de sitio (Merlo et al. 2014; Watt & Trincado 2017). Esta última relación, atribuible en gran medida a los aumentos concurrentes en la esbeltez del fuste (S , altura total/diámetro a la altura del pecho) con la calidad del sitio (Watt et al. 2009). Asimismo, aumentos en la densidad de manejo del rodal (entre 200 y 1100 plantas ha⁻¹) dieron como resultado un mayor MOE para pino radiata en un amplio rango de calidades del sitio (Lasserre et al. 2005; Waghorn et al. 2007; Zoric 2009). Además, la densidad de manejo afecta la densidad de la madera (Persson et al. 1995), las propiedades de la fibra (Watson et al. 2003) y la proporción de madera juvenil (Yang 1994; Watt & Trincado 2017).

El pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl. Ex Laws) es una especie de amplia distribución en sectores montañosos del oeste de América del Norte. En el NW de la Patagonia Argentina (provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut) se han forestado 96.000 ha con esta especie; algunas de ellas (solo una pequeña proporción) establecidas hace 90 años. Actualmente, no hay información disponible para el pino ponderosa creciendo en estas forestaciones que permita identificar cuáles son las principales fuentes de variación a nivel de rodal o de árbol individual para la producción de madera de grado estructural.

El presente trabajo condensa información generada en varios proyectos de investigación que pretenden establecer, a nivel de rodal y de árbol individual, variables de sencilla medición con influencia directa sobre el MOE del pino ponderosa y en consecuencia, sobre la calidad estructural de la madera creciendo en forestaciones del NW de la



Patagonia Argentina. Esta información representa una herramienta de utilidad para tomadores de decisión a diferentes niveles.

2. METODOLOGÍA

2.1. Relaciones entre variables a nivel de rodal y de árbol individual con el MOE

Se seleccionaron 22 parcelas de una red de parcelas permanentes del programa forestal del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estas parcelas cubren el total de la distribución geográfica de las forestaciones de pino ponderosas en el NW de la Patagonia Argentina (35,75° a 42,5° S), contienen una amplia gama de índices de sitios, edad y manejo silvícola. De cada parcela seleccionada existía información previa, como la edad a la altura del pecho (EAP). En el verano de 2017 (enero-febrero) se estableció dentro de cada una de las 22 parcelas seleccionadas una parcela de muestreo de 160 a 500 m² conteniendo como mínimo 20 árboles (n total = 437). En cada árbol se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP, 1,3m) con forcípula y la altura total (H) y de inicio de la copa (Hic) mediante un hipsómetro Vertex IV (Haglöf, Suecia). Se determinó la esbeltez (S) a partir de la relación H / DAP y se calculó un proxy de su posición social utilizando la relación entre su altura total (H) y la altura dominante de la parcela (H100), que se denominó altura relativa (HR = H / H100). La posición social del árbol refleja la forma y el tamaño de su copa en relación con las características de las copas de los árboles vecinos. A nivel de rodal, la altura dominante (H100) se calculó según Asmann (1970), el índice del sitio a una edad base de 20 años (IS₂₀) según Andenmatten y Letourneau (1997) y el área basal (G), diámetro cuadrático medio (Dg) y el índice de densidad relativa (IDR=G.Dg^{-0,5}) según Curtis (1982), (Tabla 1).

Tabla 1. Valores máximos, mínimos y promedios (Desv.Stnd.) de las variables de árbol individual y de rodal de las 22 parcelas seleccionadas de pino ponderosa en el NW de la Patagonia Argentina.

| Variable | Min-Max | Media (DS) |
|--------------------------------------|------------|-------------|
| <i>Variables de árbol individual</i> | | |
| EAP [años] | 15-83 | 28 (15) |
| H [m] | 3.8- 46.5 | 17.9 (8.3) |
| DAP [cm] | 8.2-73.0 | 32.3 (11.6) |
| S (m m ⁻¹) | 30-101 | 55 (12.4) |
| HR | 0.54-1.31 | 0.91 (0.10) |
| <i>Variables de rodal</i> | | |
| IS ₂₀ [m] | 6.2-22.7 | 15.4 (3.7) |
| H100 [m] | 6.4-43.3 | 19.5 (8.7) |
| G [m ² ha ⁻¹] | 12.7-132.7 | 53.3 (30.3) |
| IDR | 2.9-17.6 | 8.9 (4.0) |



DAP: Diámetro a la altura del pecho, EAP: Edad a la altura del pecho, H: Altura total, Hic: Altura inicio de copa, S: Esbeltez, relación H/DAP, H100: Altura dominante, IS20: Índice de sitio, G: Área basal, IDR: Índice de densidad relativa, HR: Altura relativa como indicador de posición sociológica.

En todos los árboles de la parcela de muestreo se determinó el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) empleando el método de tiempo de vuelo de onda acústica. Se midió la velocidad de propagación de onda acústica (V) utilizando el equipo ST300 (FiberGen, New Zeland). La velocidad de propagación se determinó como el promedio de tres mediciones en cada árbol. Cuando la parcela estaba ubicada en pendiente, se realizaron las mediciones en sentido perpendicular a la pendiente, evitando la madera de reacción. En el mismo sector del fuste donde se midió V, se extrajo un tarugo de madera de 7 cm de largo y 5 mm de diámetro a 1,3 m del nivel del suelo utilizando barrenos de incremento tipo Pressler. Los tarugos se envolvieron en papel aluminio para conservar su humedad y se colocaron en una conservadora en bolsas de plástico. Se pesaron en húmedo en balanza digital con precisión de 0,001 gr y el diámetro y la longitud se midieron con calibre y se calculó la densidad en verde de la madera (ρ_{verde} , $gr\ cm^{-3}$).

A partir de la velocidad de propagación y de la densidad en verde se calculó el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) como:

$$MOEd = \rho_{verde} * V^2$$

donde:

- ρ_{verde} es la densidad de la madera en verde ($gr\ cm^{-3}$),
- V es el promedio de las mediciones de velocidad de onda en cada árbol ($m\ s^{-1}$),
- MOEd es el módulo de elasticidad dinámico (MPa)

2.2 Relaciones entre la densidad de manejo del rodal y el MOE

Se trabajó sobre un ensayo de raleo instalado en 1999 por el Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP) en un rodal de pino ponderosa que tenía en ese momento 20 años de edad ubicado en la Ea. Santa Lucía, Valle Meliquina, provincia de Neuquén. El ensayo incluye dos repeticiones (parcelas de 2500 m²) de cuatro rangos de densidad definidos en términos del índice de densidad de Reineke (IDR, Bravo et al. 1997) que se han mantenido hasta la actualidad:

1. Testigo. Densidad máxima del pino ponderosa en la región, se observa mortandad de individuos por competencia. IDR = 2300.
2. Densidad alta: IDR = 900-1100. A partir de un 35% del IDR máximo, el sitio comienza a estar completamente poblado, en este caso IDR = 900.
3. Densidad media: IDR = 600-800. El sitio no está completamente poblado, pero los árboles no crecen en forma libre debido a que existe competencia.
4. Densidad baja: IDR = 300-500. Los árboles crecen prácticamente como árboles aislados, ya que la competencia comenzaría a producirse a partir de un 25% del IDR máximo.

Para la evaluación de calidad de estructural de la madera, en el año 2015, se seleccionó una parcela de cada tratamiento de densidad de manejo y dentro de la misma, se estableció una parcela circular de superficie variable con al menos 20 árboles. En todos los árboles



se midió el DAP con forcípula, H y Hic con Vertex IV (Haglöf, Suecia) y a partir de estos datos se calculó la esbeltez (S). Asimismo, se midió la velocidad de propagación de onda acústica sobre árbol en pie utilizando el equipo ST300 (Fibre-Gen, Nueva Zelanda). La medición se realizó en sentido perpendicular a la pendiente de la parcela, efectuando tres mediciones en cada árbol que luego se promediaron. En total se midieron 83 árboles.

Finalizada la medición de los árboles, se seleccionaron 6 por parcela para la caracterización acústica de trozas y tablas. En la selección se abarcó toda la variabilidad de velocidad acústica de cada parcela, 2 árboles de velocidad alta, 2 de velocidad intermedia y 2 de velocidad baja.

Los 24 árboles seleccionados fueron apeados y tronizados de la siguiente forma: una primera troza de 3,15 o 2,65 m, dependiendo del diámetro del árbol para que la punta fina sea superior a 25 cm, una segunda troza de 3,15 m, y el resto del tronco en trozas de 3,15 o 2,65 hasta un diámetro en punta fina de 15 cm. En todas las trozas obtenidas de cada árbol se midieron los diámetros de las caras y la longitud con cinta métrica y la velocidad de propagación de onda acústica con el equipo Hitman HM200 (Fibre-Gen, Nueva Zelanda) basado en el método de resonancia. Se efectuaron tres mediciones sobre la cara de mayor diámetro de cada troza. Por ser un método de medición distinto al utilizado en los árboles en pie, los valores hallados son en general más bajos y no es posible compararlos. En total se midieron 104 trozas, repartidas por tratamiento y posición en altura del tronco.

Las segundas trozas de todos los árboles apeados fueron aserradas para obtener tablas. El aserrado se hizo con un esquema de corte paralelo para obtener piezas de 2" (5 cm) de espesor por el ancho de la troza. Se seleccionaron dos piezas, una interior cercana a la médula y otra de la parte externa, que se escuadraron en tablas de 2x5" (13,5 x 5 cm) para la posterior realización de ensayos mecánicos destructivos en laboratorio. El servicio de aserrado lo realizó la empresa Lof Mapuche Vera que acercó un aserradero portátil Wood Mizer LT 40. Se midió la velocidad acústica en todas las tablas con el equipo Hitman HM200 (Fibre-Gen, Nueva Zelanda).

Diferencias significativas para las variables dendrométricas y la velocidad acústica entre tratamientos fueron establecidas mediante el test de comparación de medias de Students. Regresiones lineales simples y coeficientes de correlación de Pearson fueron estimados entre las variables dendrométricas y de rodal y los valores de módulo de elasticidad dinámico. Todos los análisis se realizaron con el software estadístico Infostat (Di Rienzo et al. 2011).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Relaciones entre variables a nivel de rodal y de árbol individual con el MOE

En función del extenso rango de edades, índices de sitio y variables dendrométricas (Tabla 1) se encontró una amplia variación del MOEd, desde 2.13 GPa a 22.1 GPa, con un valor medio de 11.2 Gpa (DE: 3.8). Asimismo, el coeficiente medio de variación del MOEd, dentro de cada parcela, fue del 21% (DE: 7%) con un rango de 8.2% a 39%.

El análisis de correlaciones realizado entre MOEd y las variables de árbol individual y de rodal indicó que todas las variables están significativamente relacionadas con el MOEd ($p \leq 0,05$). Las principales correlaciones positivas y significativas se encontraron para H ($r = 0.78$, $p < 0.001$), H100 ($r = 0.78$, $p < 0.001$) y G ($r = 0.68$, $p < 0.001$) (Tabla 2).



Tabla 2. Correlación de los coeficientes de Pearson entre las variables del árbol y los rodales y el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) para el pino ponderosa en forestaciones del NW de la Patagonia Argentina.

| | EAP | IS ₂₀ | G | IDR | H100 | DAP | H | S |
|------|------|------------------|------|------|------|------|------|------|
| MOEd | 0.66 | 0.49 | 0.68 | 0.63 | 0.78 | 0.58 | 0.78 | 0.66 |

EAP: Edad a la altura del pecho, IS₂₀: Índice del sitio, G: Área basal, IDR: índice de densidad relativa, H100: Altura dominante, DAP: Diámetro a la altura del pecho, H: Altura total del árbol, S: Eesbeltez del fuste.

La edad (EAP), mostró una correlación positiva ($r = 0,66$) y significativa ($p < 0,001$) con MOEd. Al seleccionar índices de sitios intermedios ($IS_{20} = 15-17m$), el valor medio de MOEd se duplica, de 7,53 (DE: 2,46) GPa a 15,32 (DE: 2,16) GPa entre 15 y 45 años, alcanzando un máximo valor medio de 18,33 a los 83 años (Fig. 1). La variación del MOEd dentro de cada parcela fue de 8.3 GPa con valores mínimos y máximos de 6.3 y 10.6 GPa respectivamente.

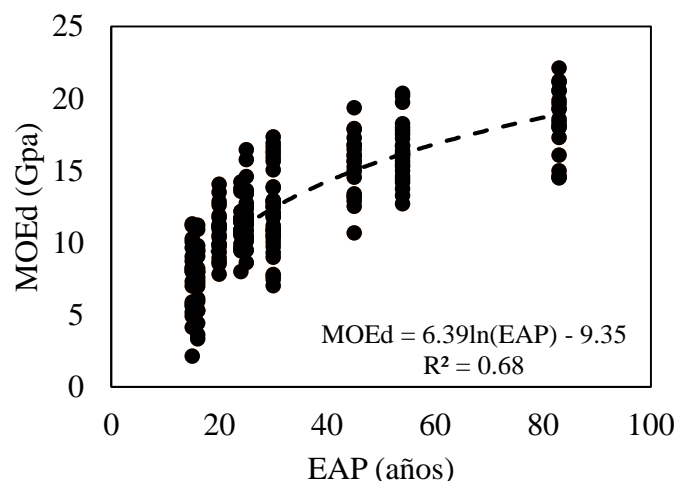


Figura 1. Módulo de elasticidad dinámico (MOEd, GPa) en función de la edad a la altura del pecho (EAP, años) para pino ponderosa en forestaciones del NW de la Patagonia Argentina. Las parcelas incluidas en esta relación se encuentran en un rango de IS₂₀ entre 15 y 17m.

El índice de sitio mostró una correlación más baja pero significativa con el MOEd ($r = 0.49$, $p < 0.001$, Fig. 2). Además, analizando los datos para edades a la altura del pecho (EAP) comprendidas entre 20 y 25 años ($n = 12$), cuando el IS₂₀ aumenta de 6 a 22 m, el valor medio del MOEd aumenta más de dos veces, de 5,13 a 12,94 GPa (Fig.2). La esbeltez, mostró una correlación positiva ($r = 0,66$) y significativa ($p < 0,001$) con el MOEd, con una media de 55 (DE: 12,4) m m⁻¹. El indicador de posición social, HR, mostró una correlación escasa ($r = 0,15$) pero también significativa ($p = 0,004$) con el MOEd. Los valores más altos de MOEd se encontraron para valores de HR entre 0,85 y 0,95.

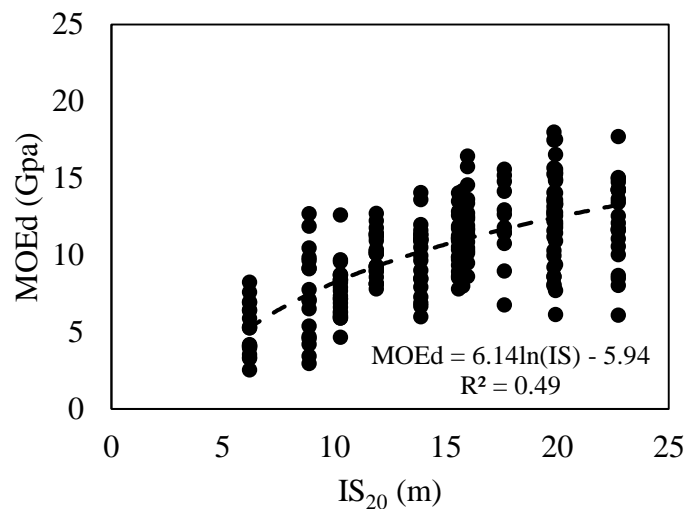


Figura 2. Módulo de elasticidad dinámico (MOEd, GPa) en función del índice de sitio (IS₂₀, m) para pino ponderosa en forestaciones del NW de la Patagonia Argentina. Las parcelas incluidas en esta relación se encuentran en un rango de edades entre 20 y 25 años.

Los resultados alcanzados coinciden con investigaciones previas y resaltan la importancia de la edad, la esbeltez y el índice de sitios como determinantes clave del MOE y sugieren además, considerar el estatus social como otro factor importante para la predicción del MOE (Lasserre et al. 2005, Watt et al. 2006, Liu et al. 2007, Watt & Zoric 2010, Merlo et al. 2014, Watt & Trincado 2017). El determinante más fuerte del MOE fue la edad del rodal que está relacionada con la proporción de madera juvenil con baja resistencia, baja rigidez y poca estabilidad dimensional que puede presentar el fuste (Macdonald y Hubert 2002). La transición entre la madera juvenil y la madera madura de pino ponderosa en la región patagónica ocurre a los 20 años (Zingoni et al. 2007, Letourneau et al. 2014). Los valores de MOEd obtenidos para madera juvenil y madera madura se encuentran en el rango de los valores citados para pino radiata (Watt et al. 2006, Raymond et al. 2007, Waghorn et al. 2007, Watt & Trincado 2017).

La correlación observada entre el índice de sitio y el MOEd fue reportada para otras especies como pino marítimo (Merlo et al. 2014) y pino radiata (Watt et al. 2006). El índice del sitio representa la suma total de los efectos ambientales sobre la cantidad de madera producida en un área por una especie forestal (Spurr 1952). Watt y co-autores (2009) sugieren que la relación positiva entre el índice de sitio y el MOE está mediada por la esbeltez del fuste. Sin embargo, los resultados para el pino ponderosa en la Patagonia Argentina, muestran una correlación débil ($r = 0,31$) entre el IS y la esbeltez. Por lo tanto, la relación positiva encontrada puede estar fundada por un aumento en la proporción de leño tardío en los sitios de mejor calidad que influye en la densidad de la madera y en su característica resistente.

3.2 Relaciones entre la densidad de manejo del rodal y el MOE

La velocidad de propagación de la onda acústica en los árboles en pie mostró diferencias ($p < 0,05$) entre el testigo (IDR 2300) y el resto de los tratamientos (Tabla 3). Los tratamientos intermedios no mostraron diferencias entre sí. Los árboles de mayor velocidad de propagación de onda y por ende, mayor calidad resistente, fueron los más



esbeltos mostrando una correlación positiva entre velocidad de propagación y esbeltez de $r^2=0,25$).

La velocidad de propagación de la onda acústica en las trozas aumentó la diferencia entre los tratamientos. La velocidad en las trozas del testigo fue superior ($p<0,001$) al resto de los tratamientos y la velocidad de ambos tratamientos intermedios fue mayor que en el tratamiento más ralo ($p<0,01$; Fig. 3). En todos los tratamientos, la segunda troza presentó velocidades superiores al resto de las trozas pero estas diferencias tienen significancia estadística solo con la cuarta troza, la cual en general, estaba incluida en la copa de los árboles.

La velocidad de propagación de onda en las tablas obtenidas de la segunda troza de los árboles de cada tratamiento, mantuvieron el mismo patrón encontrado en las trozas. El valor promedio de velocidad de las tablas del tratamiento más ralo fue inferior al resto de los tratamientos y las tablas obtenidas del tratamiento testigo mostraron mayor velocidad que los tratamientos intermedios. Partiendo el rango total de velocidades encontrado en la medición sobre las tablas, en tres clases de igual amplitud; velocidad alta (2,26 a 2,68 kms-1), media (1,84 a 2,26 kms-1) y baja (1,41 a 1,84 kms-1) se puede observar que el total de tablas obtenidas en el testigo (IDR 2300) pertenecen a la clase media y alta. Por el contrario, el 97% las tablas obtenidas en el tratamiento más ralo (IDR 300-500) pertenecen mayoritariamente a la clase media y baja. Estas diferencias en la proporción de tablas por clase acrecienta el efecto de la densidad de manejo sobre la calidad estructural de la madera.

Tabla 3. Variables dendrométricas promedio (error estándar) y velocidad de propagación de onda acústica en árboles en pie de pino ponderosa de 35 años de edad en función de la densidad de manejo establecida como rangos de IDR, Índice de densidad de rodal de Reineke. Ea. Sta. Lucía, Meliquina, Neuquén, Argentina.

| IDR | DAP (cm) | H total (m) | Esbeltez (cm m⁻¹) | Velocidad de onda (km s⁻¹) |
|------------|---------------------|------------------------|---|--|
| 300-500 | 52,7 (0,9) d | 20,4 (0,4) a | 0,4 (0,01) a | 3,12 (0,1) a |
| 600-800 | 41,1 (1,2) c | 19,5 (0,4) a | 0,47 (0,01) b | 3,36 (0,1) a |
| 900-1100 | 37,3 (1,1) b | 20,1 (0,4) a | 0,56 (0,02) c | 3,37 (0,1) a |
| Testigo | 30,6 (1,3) a | 19,9 (0,4) a | 0,67 (0,02) d | 3,79 (0,1) b |

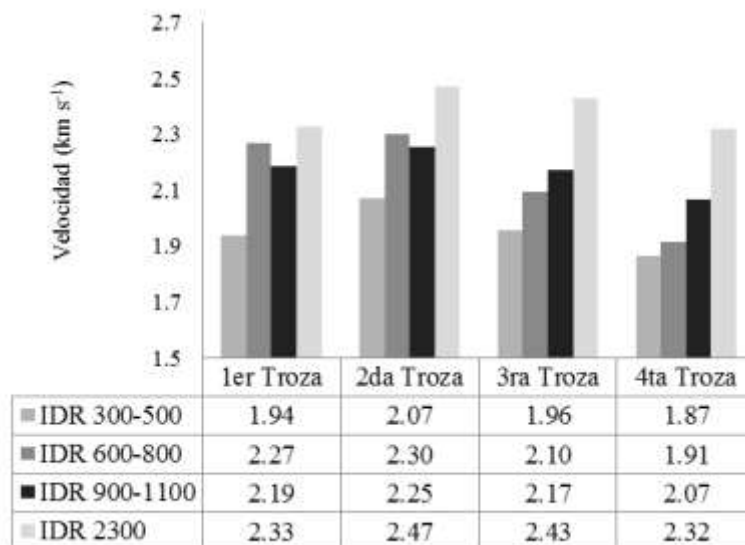


Figura 1. Velocidad de propagación de onda acústica (km s^{-1}) en trozas de pino ponderosa según la densidad de manejo establecida en rango de Índice de Densidad de Rodal de Reineke (IDR). La primera troza corresponde a la base del árbol. IDR: 300-500; 600-800; 900-1100 y 2300 (Testigo). Ea. Sta. Lucía, Meliquina, Neuquén.

En base a mediciones acústicas sobre árboles en pie, las mejoras en la calidad resistente de la madera del pino ponderosa se darían a niveles de competencia extremos (IDR 2300 máximo para la especie, Gonda 1998), incompatibles con un correcto manejo forestal. No obstante, la medición por el método de resonancia, utilizado en las trozas y las tablas, parece ser más preciso en detectar diferencias por efecto de competencia e indicaría que manejos orientados a la producción de biomasa (IDR 900-1100) o para la producción de madera de calidad (IDR 600-800) producirían cambios positivos en las características resistentes de la madera del pino ponderosa respecto a situaciones de manejo más abiertas, tal el caso de los sistemas silvopastoriles (IDR 300-500).

4. CONCLUSIONES

Para la producción de madera de pino ponderosa con destino estructural deberían promoverse turnos de corta mayores a 50 años, priorizar sitios de calidad media a alta ($IS_{20} > 15$) y manejar los rodales a densidades medias a altas (IDR= 600-900). Dentro de cada rodal, los árboles objetivo deberían ser los más esbeltos, en general, asociados a una posición sociológica co-dominante. Estos resultados sugieren ampliar los turnos de corta propuestos actualmente (36 años) y evaluar la posibilidad de promover raleo por lo alto entre los tratamientos intermedios.

En términos de gestión, a escala regional, la información generada indica la necesidad de conformar cuencas forestales para producción de madera estructural priorizando los sitios de mayor calidad, a escala de predio, priorizar también los sitios de mejor calidad y manejar densidades altas y a nivel industrial, promover la clasificación de trozas por métodos no destructivos e instalar la clasificación visual de tablas por grados de resistencia.

La variabilidad encontrada en los valores del MOEd sugieren la necesidad de considerar entre otras variables, la edad, el índice de sitio, la densidad de manejo y la esbeltez de los



árboles a muestrear durante el proceso de la caracterización resistente de la madera. Dado que, el material evaluado se corresponde a plantaciones realizadas con semilla introducida, en algunos casos de EEUU o provenientes de rodales semilleros de la región, sin ningún grado de mejora genética, sería menester explorar el grado de variabilidad genética que pudiera estar presente en el programa de mejora, permitiendo por ende evaluar su factibilidad de mejora conjunta con caracteres de forma y crecimiento.

AGRADECIMIENTOS

El apoyo financiero para esta investigaciones se proporcionó a través del proyecto TOPWOOD "Herramientas de fenotipado de madera: propiedades, funciones y calidad", Marie Skłodowska-Curie, (RISE), H2020 (2014), Comisión Europea. Los autores agradecen a CORDONE SA, YPF SA, Bosque Andino SA, Municipio de Huinganco y propietarios privados por facilitar sus instalaciones y también por el apoyo en el trabajo de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andenmatten, E., Letourneau, F.J. (1997). Curvas de Índice de Sitio para *Pinus ponderosa* (Dougl.) Law de aplicación en la región Andino Patagónica de Chubut y Río Negro, Argentina. *Bosque* 18(2): 13-18.

Assmann, F. (1970). *The Principles of Forest Yield Study: Studies in the organic production, structure, increment, and yield of forest stands.* Pergmon Press, Oxford.

Bravo, F., Montero, G. and Del Rio, M. (1997). Índices de densidad de las masas forestales. *Eciología*, n°11, pp. 177-187.

Bucur, V. (1985). *Acoustics of Wood.* CRC Press. New York. U.S.A. 284 p.

Bucur, V. and Archer, R.R. (1984). Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Sci Technol*, 18:255–265.

CEN (2016). EN 338:2016 - Structural timber - Strength classes.

Curtis, R.O. (1982). A Simple Index of Stand Density for Douglas – Fir. *Forest Sci.*, Vol 28 (1): 92-94.

Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo C.W. (2011). *Infostat versión 11.* Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.

Gonda HE. 1998. Height-Diameter and Volume Equations, Growth Intercept and Needle Length Site Quality Indicators, and Yield Equations for Young Ponderosa Pine Plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina. Tesis de grado PhD. Oregon State University. 198 p.

Lasserre, J.P., Mason, E., Watt, M. (2005). The effects of genotype and spacing on *Pinus radiata* (D. Don) corewood stiffness in a 11 year old experiment. *For Ecol Manage* 205: 375-383.

Letourneau, F.J., Medina, A.A., Andia, I.R., Andenmatten, E., De Agostini, N., Mantilaro, N. (2014). Caracterización xilo-tecnológica de la madera de una plantación adulta de *Pinus ponderosa* de la patagonia argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, vol. 40, núm. 2, pp. 196-201. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina.

Liu, C., Zhang, S.Y., Cloutier, A., Rycabel, T. (2007). Modeling lumber bending stiffness in natural black spruce stands using stand and tree characteristics. *For Ecol Manage* 242: 648-655.

Macdonald, E. and Hubert, J. (2002). A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry*, 75(2): 107-138.



- Merlo, E., Alvarez-Gonzalez, J.G., Santaclara, O. and Riesco, G., 2014. Modelling modulus of elasticity of *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain with standing tree acoustic measurements, tree, stand and site variables. *Forest Systems*, 23(1): pp. 153-166.
- Persson, B., Persson, A., Stahl, E.G., Karlmatz, U. (1995). Wood quality of *Pinus sylevstris* progenies at various spacing, *For Ecol. Manage* 76: 127-138.
- Raymond, C.A., Joe, B., Evans, R., Dickson, R.L. (2007). Relationship between timber grade, static and dynamic modulus of elasticity, and silviscan properties for *Pinus radiata* in New South Wales New Zealand. *Journal of Forestry Science* 37(2): 186-196.
- Roper, J., Ball, R., Davy, B., Downes, G., Fife, D., Gaunt, D., Gritton, D., Ilic, J., Koehler, A., McKinley, R., Morrow, A., Northway, R., Penellum, B., Rombouts, J. and Pongracic, S. (2004). Resource evaluation for Future Profit: Part B- Linking grade outturn to wood properties. Report for Forest & Wood Products Research & Development Corporation. Project PN03.3906, 77pp. (http://www.fwprdc.org.au/content/pdfs/PN_03.3906_part_b.pdf).
- Smith, DM., Larson, BC., Kelty, MJ., Ashton, P. (1997). *The practice of silviculture: Applied Forest Ecology*. 9th ed. Wiley, New York, NY. 537 p.
- Spurr, S.H. (1952). *Forest inventory*. 476 pp., illus, New York: Ronald Press Co.
- Waghorn, M.J., Mason, E.G., Watt, M.S. (2007). Influence of initial stand density and genotype on longitudinal variation in modulus of elasticity for 17-year-old *Pinus radiata*. *Forest Ecol Manage* 252: 67-72.
- Watson, P., Garner, C., Robertson, R., Reath, S., Gee, W., Hunt, K. (2003). The effects of initial tree spacing on the fiber properties of plantation grown coastal western hemlock. *Can. J. For. Res.* 33: 2460-2468.
- Watt, M.S. and Trincado, G. (2017). Modelling the influence of environment on juvenile modulus of elasticity in *Pinus radiata* grown in Chile. *For Ecol Manage* 400: 238-245.
- Watt, M.S. and Zoric, B. (2010). Development of a model describing modulus of elasticity across environmental and stand density gradients in plantation-grown *Pinus radiata* within New Zealand. *Can. J. For. Res.* 40: 1558-1566.
- Watt, M.S., Clinton, P.W., Parfitt, R.L., Ross, C., Coker, G. (2009). Modelling the influence of site and weed competition on juvenile modulus of elasticity in *Pinus radiata* across broad environmental gradients. *For Ecol Manage* 258: 1479-1488.
- Watt, M.S., Moore, J.R., Facon, J.P., Downes, G.M., Clinton, P.W., Coker, G., Davis, M.R., Simcock, R., Parfitt, R.L., Dando, J., Mason, E.G., and Bown, H.E. (2006). Modelling the influence of stand structural, edaphic and climatic influences on juvenile *Pinus radiata* dynamic modulus of elasticity. *For Ecol Manag* 229 (1-3):136-144.
- Yang, K.C. (1994). Impact of spacing on width and basal area of juvenile and mature wood in *Picea mariana* and *Picea glauca*. *Wood Fiber Sci.* 26: 479-488.
- Zingoni, M.I., Andia, I.; Mele, U. (2007). Longitud de traqueidas y madera juvenil en el fuste de un árbol de pino ponderosa de 50 años. III Congreso Iberoamericano de Productos Forestales IBEROMADERA 2007. 3 al 5 de julio, Buenos Aires, Argentina.
- Zobel, B., Jett, BJ. (1995). *Genetics of wood production*. Berlin-Heidelberg, Germany. Springer-Verlag. 337 p.
- Zoric, B. (2009). Modelling the influence of stocking on longitudinal and radial variation in wood properties of *Pinus radiata* on a warm Northland site. Masters thesis (M. For. Sci.) undertaken at the School of Forestry, University of Canterbury, Christchurch, N.Z.