

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Efecto de la intensidad de raleo sobre la rigidez, dureza Janka y densidad de la madera de *Araucaria angustifolia* de plantaciones de Misiones, Argentina

Effect of thinning intensity on stiffness, Janka hardness, and density of Araucaria angustifolia wood from plantations in Misiones, Argentina

DOI: <https://doi.org/10.36995/j.vvyrareta.2026.005>

Recibido 24 de febrero 2026; aceptado 28 de agosto 2026

Sara Regina Barth^{1,2}, Rosa Ángela Winck^{1,2}, Aldo Esteban Keller¹,
Adelaida Bragaño², Julio Raúl Bueno, Alexis Feldman², Diego
Rolando Aquino¹, Ernesto Héctor Crechi¹

¹ INTA EEA Montecarlo, Montecarlo, Argentina. barth.sara@inta.gob.ar

² Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ciencias Forestales, Eldorado, Argentina.

Resumen

El conocimiento de las propiedades tecnológicas de la madera es esencial para su uso estructural e industrial. Este estudio evaluó el efecto de la intensidad del raleo sobre la densidad aparente normal (12 % de contenido de humedad), la dureza Janka, el módulo de elasticidad dinámico (MOE_d) y el módulo de rotura (MOR) a la flexión estática de la madera de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. El material de estudio se obtuvo de un ensayo de raleos de 34 años de edad, ubicado en Iguazú, Misiones, Argentina. Se evaluaron tres tratamientos con intensidades de raleo de 0 %, 33 % y 66 % del área basal, aplicados cada cuatro años, con la última intervención realizada a los 17 años. Se analizaron nueve árboles por tratamiento, utilizando las dos trozas basales de cada uno. El tratamiento de raleo influyó sobre la densidad aparente normal, el MOE_d y el MOR, mientras que la dureza Janka no presentó diferencias significativas entre tratamientos. La madera proveniente del raleo moderado (33 %) presentó mayores valores de densidad aparente normal, MOE_d y MOR que la del raleo intenso (66 %) y la del tratamiento sin raleo. Estos resultados aportan información relevante para optimizar el manejo silvícola de *A. angustifolia*, orientado a mejorar la calidad de la madera obtenida en plantaciones comerciales.

Palabras clave: manejo silvícola, propiedades mecánicas, calidad de la madera, pino Paraná.

Abstract

A sound understanding of the technological properties of wood is essential for its structural and industrial applications. This study evaluated the effect of thinning intensity on apparent normal density (12% moisture content), Janka hardness,

dynamic modulus of elasticity (MOE_d), and static bending modulus of rupture (MOR) of *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. Wood samples were obtained from a 34-year-old thinning trial located in Iguazú, Misiones, Argentina. Three thinning treatments were evaluated: 0%, 33%, and 66% of basal area, applied every four years, with the last intervention carried out at age 17. Nine trees per treatment were sampled, using the two basal logs from each tree. Thinning treatment affected apparent normal density, MOE_d , and MOR, whereas Janka hardness did not differ significantly among treatments. Wood from the moderate thinning treatment (33%) showed higher values of apparent normal density, MOE_d , and MOR than wood from the intensive thinning treatment (66%) and the unthinned control. These results provide relevant information for optimizing the silvicultural management of *A. angustifolia* plantations to improve the quality of commercially grown wood.

Keywords: silvicultural management, mechanical properties, wood quality, pino Paraná.

Introducción

Para maximizar la productividad y la rentabilidad, los productores forestales implementan un conjunto de prácticas silvícolas esenciales para sus plantaciones. Sin embargo, dichas intervenciones pueden alterar las propiedades físicas y mecánicas de la madera, afectando su calidad, aunque sus efectos no siempre sean perceptibles de forma inmediata. Comprender cómo la intensidad del raleo influye en las propiedades tecnológicas de la madera resulta fundamental para orientar decisiones de manejo basadas en la calidad del producto final.

Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze. es una especie emblemática tanto desde el punto de vista ecológico como socioeconómico. En estado natural, puede alcanzar hasta 40 metros de altura y diámetros de hasta 1,5 metros (Dimitri et al., 1998). En plantaciones comerciales argentinas, donde fue la primera especie nativa cultivada, se estima un turno de corta de aproximadamente 30 años, con diámetros cercanos a los 40 cm. Su establecimiento puede lograrse mediante siembra directa o trasplante de plantines producidos en vivero. Se trata de una especie heliófila, con alta exigencia nutricional y mayor demanda que otras coníferas (Blum, 1980; De Hoogh et al., 1980). Los suelos comúnmente denominados rojos profundos, pertenecientes a los órdenes Alfisoles y Ultisoles, son aptos para su cultivo, siempre que no presenten degradación física ni erosión severa (Fernández et al., 1999). En plantaciones comerciales en Misiones, se han reportado incrementos medios anuales de 15 a 18 m³ ha⁻¹ año⁻¹, alcanzando volúmenes en la corta final de hasta 230 m³ ha⁻¹ entre los 25 y 30 años de edad, con densidades finales de aproximadamente 250 árboles ha⁻¹ (Martiarena et al., 2007; Di Marco, 2012). Según Keller et al. (2022), a los 34 años, la plantación estudiada presentó un IMA₃₄ entre 9, 12 y 14 m³ ha⁻¹ año⁻¹, para los tratamientos sin raleo, raleo suave y raleo fuerte, respectivamente.

La madera de *A. angustifolia* presenta un color claro, entre amarillo y blanco cremoso, con vetas visibles y diseño floreado. Su densidad aparente normal (a 12 % de contenido de humedad) es de $0,47 \text{ g cm}^{-3}$ (Gonzales y Suárez, 1994). Se caracteriza por su buena trabajabilidad, tanto en procesos manuales como mecanizados, facilidad para el debobinado, buena capacidad de adhesión, y excelente comportamiento frente a tintes, barnices y otros acabados superficiales. Sus aplicaciones industriales incluyen la fabricación de muebles, molduras, tirantearías, carpintería en general, producción de laminados y obtención de pulpa para papel. En relación con sus propiedades mecánicas evaluando probetas estandarizadas, Gonzales y Suárez (1994) reportaron un módulo de elasticidad promedio de $113103 \text{ kg cm}^{-2}$ y un módulo de rotura de 872 kg cm^{-2} a la flexión estática. Los valores de dureza Janka fueron de 490, 325 y 337 kg cm^{-2} para las direcciones transversal, tangencial y radial, respectivamente. Estos valores corresponden a madera proveniente de árboles de edad desconocida y sin referencias sobre el manejo silvícola aplicado. De acuerdo con la clasificación propuesta por Coronel (1994), la madera de esta especie se considera blanda, aunque algunos valores se aproximan al rango de semidura.

Estudios previos confirman que las prácticas silvícolas, y en particular el raleo, influyen significativamente en las propiedades mecánicas de la madera de coníferas. Para *Pinus taeda* bajo diferentes intensidades de raleo, Winck (2013) encontró que los tratamientos severos reducen la resistencia a la flexión estática, mientras que raleos moderados tienden a conservar o incluso mejorar los valores de MOE y MOR a la flexión estática y a la compresión paralela a las fibras. En *Grevillea robusta*, Barth (2016) observó que mayores densidades de plantación, que intensifican la competencia entre árboles, se relacionan con valores superiores de dureza Janka y otras propiedades mecánicas. De manera similar, MacDonald y Hubert (2002), señalaron que espaciamientos amplios producen árboles de menor calidad estructural. Esto se debe a nudos de mayor diámetro y una menor densidad media de la madera, lo que compromete la rigidez, la resistencia mecánica y la estabilidad dimensional del material (Winck et al., 2026a; 2026b; Bragañolo et al., 2026). Además, estos autores señalan que la conicidad del fuste es menor en plantaciones más densas, lo que mejora la calidad estructural de la madera y el rendimiento en el aserrado.

El presente trabajo evaluó el efecto de la intensidad de raleo sobre la densidad aparente normal, el módulo de elasticidad dinámico con una técnica acústica de vibración transversal (MOE_d), el módulo de rotura (MOR) a la flexión estática y la dureza Janka de la madera de *A. angustifolia* cultivada en el norte de la provincia de Misiones, Argentina.

Materiales y métodos

El material utilizado en este estudio provino de un ensayo de intensidad de raleo ubicado en una propiedad de la empresa Arauco Argentina S. A., en el Departamento Iguazú, provincia de Misiones, Argentina (25°45' latitud S, 54°34' longitud O). La plantación se encontraba establecida sobre un suelo tipo kandudult, según la clasificación del Soil Survey Staff (1975). Este suelo presenta más de 2 m de desarrollo, con una secuencia de horizontes A-Bt-C, color rojo, libre de pedregosidad y fragmentos gruesos, de permeabilidad moderada, bien drenado y relativamente insaturado. Según Mancini *et al.* (1964), corresponde a la unidad cartográfica 9. El clima de la región se caracteriza por una temperatura media anual de 21 °C y precipitaciones del orden de 2000 mm anuales, con un régimen isohígro (SMN, 2022).

El ensayo se instaló en una plantación comercial de *A. angustifolia* establecida en 1987, con una densidad inicial de 2524 plantas ha⁻¹. Las parcelas experimentales se instalaron en el año 1992 sobre una superficie total de 5 ha. Cada parcela ocupaba 819 m², con diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, tres niveles de intensidad y tres niveles de oportunidad de raleo. La intensidad fue definida según el área basal en tres niveles: testigo sin raleo (T0), raleo del 33 % (T1) y del 66 % (T2), ambos en relación con el área basal del testigo. Las oportunidades de raleo fueron aplicadas cada 2, 4 y 6 años, designadas como f1, f2 y f3, respectivamente. Dado el enfoque práctico del estudio y los recursos disponibles, las propiedades físico-mecánicas se evaluaron únicamente en los tratamientos correspondientes a la frecuencia de raleo cada cuatro años (f2), por representar el esquema de manejo más próximo al utilizado en plantaciones comerciales.

Tabla 1. Tratamientos utilizados en el presente estudio provenientes del ensayo de intensidad de raleo.

Table 1. Treatments evaluated in the present study, selected from a thinning intensity and timing trial.

Tratamientos	Intensidad de raleo
T0	sin raleo (área basal máxima)
T1	raleo suave cada 4 años (33 % del AB)
T2	raleo fuerte cada 4 años (66 % del AB)

Se seleccionaron 9 árboles por tratamiento, con 34 años de edad. De cada árbol se extrajeron las dos primeras trozas. Para la selección se consideró la ausencia de efecto de borde, el buen estado sanitario, un fuste recto y posición sociológica (dominante, codominante y dominado), conforme a Köhl *et al.* (2006). Cada individuo

fue identificado para mantener la trazabilidad durante todo el proceso experimental. Las trozas fueron aserradas y secadas en cámara. Se obtuvieron, por un lado, piezas de 3,15 m de longitud, de ancho variable y espesores de 30 mm de la madera lateral y de 62 mm del pan central que incluyó la médula. Sobre estas piezas se determinó la densidad y el módulo de elasticidad dinámico (MOE_d) por vibración transversal con un equipo no destructivo denominado Metriguard®. Paralelamente, se obtuvieron listones de 5 × 5 × 150 cm, con los cuales se prepararon las probetas (3 repeticiones por ensayo para cada troza) para los ensayos de resistencia a la flexión estática y dureza Janka. Luego con máquina universal de ensayos marca DIDACTA y utilizando estas probetas estandarizadas se determinaron el MOR y la dureza Janka.

Determinación de la densidad y del módulo de elasticidad dinámico

En la madera aserrada y seca, en sus escuadrías comerciales, se determinó la densidad de la pieza completa y el MOE_d mediante un método acústico no destructivo (por vibración transversal), utilizando el equipo Metriguard® Computer E 340 (Figura 1).



Figura 1. Equipo Metriguard Computer E 340, para la determinación de MOE_d .
Figure 1. Metriguard Computer E 340 equipment for determining MOE_d .

Este dispositivo cuenta con una balanza incorporada, con la que se obtuvo el peso de cada pieza, además, cargando previamente sus dimensiones al software del ordenador del equipo, este calcula su volumen y estima la densidad de la pieza, mediante la ecuación (1).

$$D_n (12\%) = P_e/V_e \quad (1)$$

Siendo: D_n (12%) = Densidad aparente normal (a 12 % de contenido de humedad), en g cm^{-3} ; P_e = Peso de la muestra estacionada, en g; V_e = Volumen de la muestra estacionada, en cm^3 .

Este método acústico consiste en generar vibraciones transversales por un impacto aplicado a la mitad de la pieza, registrar la frecuencia natural de vibración y posteriormente determinar la rigidez de la madera. Para la realización del ensayo, el impacto es aplicado a la pieza aserrada de manera transversal, donde el modo de vibración más marcado es el de flexión. Además, con los valores de frecuencia natural de vibración determinados por el equipo, la longitud entre apoyos y una constante de calibración, entrega en pantalla los valores MOE_d , calculados a partir de la ecuación (2) incorporada al sistema (Metriguard, 2002).

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

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

Determinación del módulo de rotura a la flexión estática (MOR)

Las pruebas de flexión estática se efectuaron siguiendo la Norma IRAM 9542 (1977), utilizando probetas de $2 \times 2 \times 34$ cm (Figura 2). La carga se aplicó tangencialmente a los anillos de crecimiento, a una velocidad de 5 mm min^{-1} .



Figura 2. Probeta en ensayo de resistencia a la rotura por flexión estática en máquina universal.

Figure 2. Specimen under static bending strength testing in a universal testing machine.

El valor de MOR se calculó mediante la ecuación (3):

$$MOR = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (3)$$

Siendo: MOR = módulo de rotura, en kg cm⁻²; P = Carga de rotura, en kg; b = Base, en cm; L = Longitud entre apoyos, en cm, h = Altura, en cm.

Determinación de la dureza Janka

Para el ensayo de dureza Janka se utilizaron probetas cúbicas de 5 × 5 × 5 cm, adaptadas de la norma ASTM D143-52 (1966) (Figura 3). Cada probeta presentó dos caras por dirección (tangencial, radial y transversal). Se aplicó una carga a través de una semiesfera de acero de 1,128 cm de diámetro hasta lograr una impronta de 1 cm². La dureza se expresó en kg cm⁻², aplicando la carga a 6 mm min⁻¹.

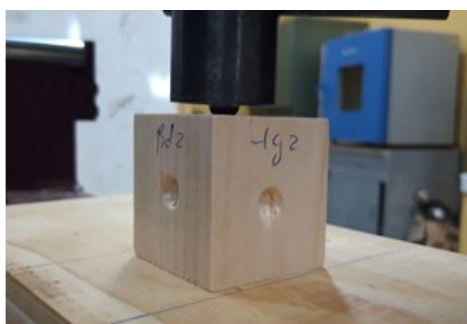


Figura 3. Probeta sometida a ensayo de dureza Janka.
Figure 3. Janka hardness test specimen under testing.

Finalmente, los datos obtenidos fueron analizados a través de modelos mixtos considerando al tratamiento, la troza y la posición sociológica del árbol como efectos fijos y al árbol como efecto aleatorio, la comparación de medias ajustadas se realizó mediante la prueba DGC. Se trabajó con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. El procesamiento estadístico se realizó con el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2015).

Resultados y discusión

Densidad de la madera

Los ensayos realizados en la madera de *A. angustifolia* arrojaron como resultado valores de densidad aparente normal (Dn) entre 0,49 a 0,56 g cm⁻³ (Figura 4). No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de raleo fuerte y sin raleo, pero sí entre éstos y el raleo suave, tratamiento que presentó una Dn un 10 % mayor en comparación a los otros esquemas de raleo ensayados.

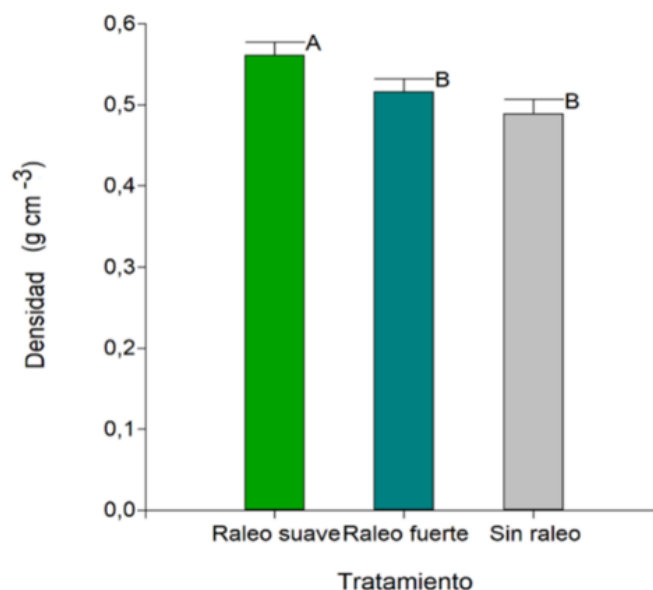


Figura 4. Densidad aparente normal (12 %) de la madera de *A. angustifolia* en función al tratamiento silvícola aplicado. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0.05$).

Figure 4. Normal apparent density (12 %) of *A. angustifolia* wood under different silvicultural treatments. Means with the same letter do not differ significantly ($P > 0.05$).

Evaluando la densidad normal de la madera estacionada según posición sociológica de los árboles (dominantes, codominantes o dominados), el valor medio para los árboles categorizados como dominantes y codominantes fue de $0,53 \text{ g cm}^{-3}$, mientras que para los dominados fue de $0,51 \text{ g cm}^{-3}$; representando estos valores una diferencia entre sí de 4 % (Figura 5a).

Analizando la densidad normal de la madera de *A. angustifolia* según la posición de la troza aserrable, existieron diferencias estadísticamente significativas entre ellas. La madera de la primera troza presentó una densidad un 4 % mayor a la obtenida para la segunda troza (Figura 5b).

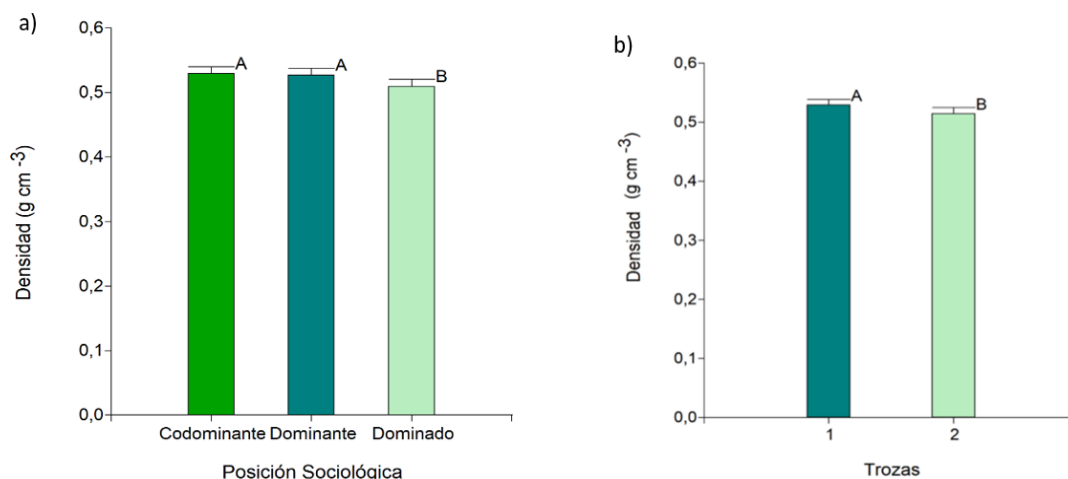


Figura 5. (a) Densidad normal aparente de la madera según la posición sociológica del individuo considerado (a) y según la posición de la troza (b). Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$).

Figure 5. Normal apparent wood density based on: sociological class of the tree (a) and log position (b). Means sharing letters are not significantly different ($P > 0.05$).

El modelo mixto mostró un efecto significativo del tratamiento ($P = 0,018$) y de la posición de la troza ($P = 0,008$), resultados consistentes con las diferencias observadas en las Figuras 4 y 5. La comparación de medias ajustadas mediante la prueba DGC mostró una menor densidad normal en los árboles dominados (Figura 5 a).

Módulo de elasticidad dinámico

Al analizar el MOE_d por vibración transversal de la madera de *A. angustifolia* bajo diferentes tratamientos silviculturales (Figura 6), se observó que el tratamiento de raleo suave presentó un valor (15,6 GPa) un 12,5 % mayor respecto a la media conjunta del raleo fuerte (13,4 GPa) y el tratamiento sin raleo (13,9 GPa), los cuales no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí.

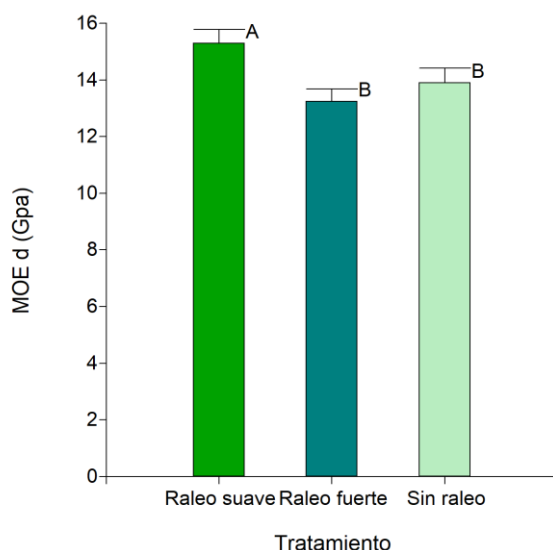


Figura 6. Módulo de elasticidad dinámico (MOE_d) de la madera de *A. angustifolia* según tratamiento silvicultural implementado. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$).

Figure 6. Dynamic modulus of elasticity (MOE_d) of *A. angustifolia* wood under different silvicultural treatments. Means sharing the same letter are not significantly different ($P > 0.05$).

Los resultados de los modelos mixtos indicaron que no existieron diferencias estadísticamente significativas en el MOE_d según la posición sociológica ($p > 0,05$). Los árboles categorizados como dominantes presentaron un MOE_d medio de 14,7 GPa, mientras que los árboles codominantes y dominados presentaron un MOE_d medio de 14,1 GPa y 13,7 GPa, respectivamente.

En relación con la posición de las trozas en el árbol, el modelo mixto mostró un efecto significativo de la posición de la troza sobre el MOE_d ($P < 0,0001$). La troza 1 presentó un valor de MOE_d de 15 GPa, significativamente mayor en comparación con la troza 2 (13,5 GPa), mientras que la rigidez de la troza basal fue un 10 % mayor, lo que indica que la posición de la troza constituye un factor a considerar en la clasificación de la madera según su rigidez.

El MOE_d de las tablas laterales resultó un 8 % mayor que el del pan central, siendo dicha diferencia estadísticamente significativa. Esta variación radial, si bien fue significativa, resultó menor que la reportada para especies del género *Pinus* (Winck, 2013; Winck 2023).

Módulo de rotura

El modelo mixto mostró un efecto significativo del tratamiento sobre el MOR ($P = 0,010$). El tratamiento de raleo suave mostró un valor de MOR a la flexión estática de 1009 kg cm⁻², un 19 % mayor que los otros dos tratamientos, los cuales

presentaron valores cercanos entre sí (876 kg cm^{-2} para raleo fuerte y 820 kg cm^{-2} para sin raleo) y sin diferencias estadísticamente significativas (Figura 7).

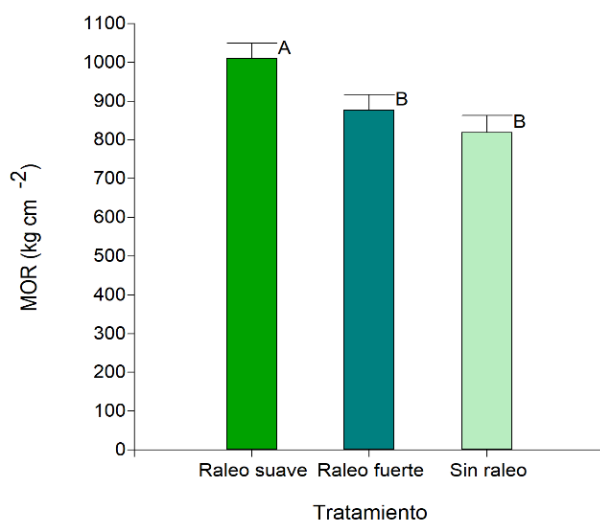


Figura 7. MOR a la flexión estática de la madera según tratamiento de raleo efectuado.

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$).

Figure 7. MOR in static bending of wood according to the applied thinning treatment. Means sharing the same letter are not significantly different ($P > 0.05$).

Los resultados indicaron que la resistencia a la rotura de la madera de *A. angustifolia* varía significativamente según la posición sociológica. El MOR medio en árboles dominantes y codominantes fue de 924 kg cm^{-2} , mientras que en los árboles dominados fue de 857 kg cm^{-2} , resultando un 8 % menor en los dominados y con diferencia estadística significativa ($P = 0,027$).

En relación con la posición de la troza en el árbol, los resultados muestran que la troza basal presentó un MOR de 947 kg cm^{-2} , mientras que la troza 2 arrojó un valor de 856 kg cm^{-2} . La diferencia en el valor medio de MOR entre las trozas basales y superiores fue del 10 %, siendo estadísticamente significativa ($P < 0,001$). Estos valores indicaron que la ubicación de la troza en el árbol influyó en la resistencia a la rotura de la madera de *A. angustifolia*.

Dureza Janka

Los resultados de dureza Janka indicaron que no existieron diferencias significativas entre tratamientos ($P > 0,050$) (Figura 8).

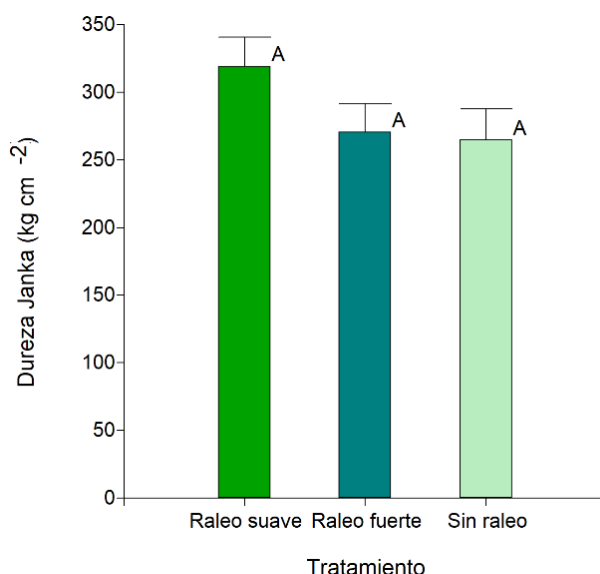


Figura 8. Dureza Janka (kg cm⁻²) de la madera según tratamiento de raleo aplicado. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$).

Figure 8. Janka hardness (kg cm⁻²) of wood under different thinning treatments. Means sharing the same letter are not significantly different ($P > 0.05$).

En la Figura 9a se pueden observar los valores de dureza Janka de la madera de *A. angustifolia* en función de la posición sociológica de los árboles y de la ubicación de la troza en el árbol. De acuerdo con los resultados, no se encontraron diferencias significativas ($P > 0,050$) entre las medias de los tres estratos o posiciones sociológicas, mientras que las posiciones a lo largo del fuste (troza 1 y troza 2), mostraron diferencias significativas ($P < 0,001$), con valores medios de 298 kg cm⁻² para la troza 1 y 272 kg cm⁻² para la troza 2, respectivamente (Figura 9b), demostrando la troza 1 un mejor comportamiento mecánico respecto a la troza 2.

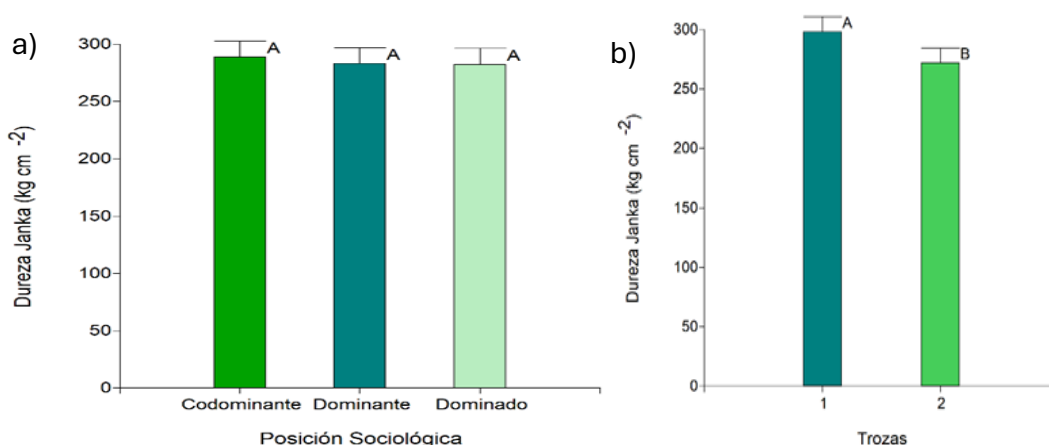


Figura 9. Dureza Janka de la madera según: posición sociológica de los árboles (a) y según la posición de la troza (b). Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$).

Figure 9. Janka hardness of wood according to the sociological position of the individual tree (a) and stem height position (b). Means sharing the same letter are not significantly different ($P > 0.05$).

La dureza Janka también fue evaluada en los sentidos transversal, radial y tangencial y se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,0001$) entre los planos de corte considerados (Figura 10), el valor medio más alto fue para la orientación transversal (322 kg cm^{-2}), seguida de la orientación radial (279 kg cm^{-2}) y tangencial (256 kg cm^{-2}). El mayor valor en la orientación transversal se debe a que la carga se aplica en una dirección más próxima al eje longitudinal de las fibras, lo que ofrece mayor resistencia en ese plano. En los planos radial y tangencial, la resistencia está condicionada por la disposición anatómica de los radios medulares y de los anillos de crecimiento, respectivamente (Coronel, 1994).

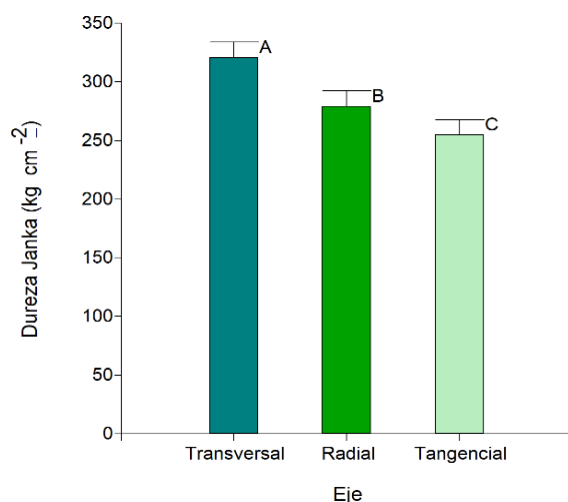


Figura 10. Dureza Janka de la madera según el plano de corte evaluado. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$).

Figure 10. Janka hardness of wood according to the cutting plane evaluated. Means sharing the same letter are not significantly different ($P > 0.05$).

Una comparación de estos resultados con los publicados por González y Suírezs (1994), muestra diferencias en los valores medios de densidad normal, así como en el MOR a la flexión estática y el MOE_d . Estas variaciones entre valores obtenidos y las referencias para la especie podrían deberse a una posible influencia del manejo silvícola sobre estas propiedades, ya que González y Suírezs (1994) trabajaron con muestras provenientes de árboles de edad y manejo silvícola desconocidos.

La madera proveniente de raleos suaves (33 %) mostró valores superiores a los obtenidos de madera de raleos fuertes (66 %) y de parcelas sin raleo. Estos resultados indican que el raleo suave tiene un efecto positivo en la densidad normal, el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de rotura de la madera de *A. angustifolia*. Este comportamiento es consistente con el que expone un estudio de Winck (2013), sobre *P. taeda*, donde se encontró que un tratamiento con un 87 % de raleo afectó

negativamente la resistencia a la flexión estática y sobre pino híbrido F₂ *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* donde los autores Bragaño et al. 2026, Winck et al 2026a y 2026b determinaron que los valores de densidad aparente normal (12 % de humedad), módulo de elasticidad estático y dinámico disminuyeron para un tratamiento con menor densidad inicial de plantación (mayor distanciamiento entre individuos y por lo tanto menor competencia entre los mismos).

Un módulo de elasticidad elevado indica que la madera es más rígida y resistente a deformaciones, lo que resulta de importancia para la estabilidad estructural en construcciones, vigas, tirantes, fabricación de algunos tipos de muebles y otros usos de la madera. Por otro lado, un MOR elevado indica una mayor resistencia a la rotura, importante para soportar cargas pesadas sin romperse, especialmente en tirantes, vigas y tableros estructurales. Considerando en conjunto, mayores valores de módulo de elasticidad y módulo de rotura indican la presencia de mejor calidad estructural de la madera y refuerzan su desempeño para satisfacer exigencias técnicas en un rango más amplio de usos.

Conclusiones

Las intensidades de raleo estudiadas afectaron algunas de las propiedades físicas y mecánicas evaluadas de la madera de *A. angustifolia*.

La densidad aparente normal de la madera fue influenciada por el tratamiento de raleo y la ubicación de la troza en el fuste, siendo mayor en el tratamiento de raleo suave y en la primera troza. Los árboles dominados presentaron menores valores de densidad que los dominantes y codominantes.

El módulo de rotura a la flexión estática y el módulo de elasticidad dinámico de la madera fueron mayores en el tratamiento de raleo suave.

La dureza Janka de la madera no fue significativamente afectada por la intensidad del raleo ni por la posición sociológica de los árboles.

Los valores de las propiedades físicas y mecánicas evaluadas fueron superiores en la troza basal respecto de la segunda troza, destacándose especialmente los mayores valores de MOE_d y MOR, independientemente del tratamiento de raleo aplicado.

Los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento científico y técnico sobre el manejo de plantaciones de *A. angustifolia* y aportan información útil para orientar las prácticas de raleos a realizar a las plantaciones según el destino de uso de la madera.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de INTA EEA Montecarlo, en particular al PL419 - PIT031 "Transferencia y extensión para el manejo silvícola y biodiversidad y los servicios ambientales en sistemas productivos", por el financiamiento parcial de las tareas de campo y gabinete. Se reconoce el invalorable aporte de la empresa Arauco S. A, propietaria de las plantaciones de donde proviene el material de estudio y co-financiadora de los gastos del presente ensayo. Se agradece la colaboración de los compañeros de trabajo de la EEA Montecarlo, en especial a: Ing. Ftal. (M. Cs.) Ernesto Crechi, Técnico Superior Diego Aquino y Sr. Otto Knebel, por el acompañamiento en esta etapa final y las tareas realizadas a campo durante la vigencia del ensayo. Se reconoce además el acompañamiento del personal de Arauco S. A. en la persona de: Mariano Di Stasi, Cristian Carazzo y Diego Cristaldo.

Referencias bibliográficas

- ASTM D 143/52. 1966. Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia. E.U. A. 810 pp.
- Barth, S. R. 2016. Efectos de la densidad de plantación sobre la biomasa aérea y las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Grevillea robusta* A. Cunningham. Tesis para optar al Grado Académico de Doctora en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad nacional de Córdoba. 151 pp.
- Blum, W. 1980. Site-Nutrition-Growth interrelationship of *Araucarias*. Forestry problems of the genus *Araucaria*. IUFRO Meeting held in Curitiba. Paraná. Brasil. Pp.119-130.
- Bragaño A.; Colcombet L.; Winck R. A.; Aguilera M. A.; Wegert F.; Acevedo P.; Grance L.; Feldmann A. 2026. Efecto de dos densidades de plantación sobre el módulo de rotura y de elasticidad en madera de pino híbrido F2 de 26 años. Revista Yvyrareta. Núm. 34 (2026). Suplemento de resúmenes XX JOTEFA (En Edición). Pg 517-518.
- Coronel, E. O. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de la Madera. Aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. 2 Parte: Fundamentos de las propiedades mecánicas de la madera. Publicación ITM – UNSE. Ed. El Liberal. Santiago del Estero, Argentina. P. 275.
- De Hoogh, R.; Van Goor, C.; Blum, W. 1980. Response of planted *Araucaria angustifolia* to N, P, K, Ca and B Fertilization, 3 and 7 year after application. Actas Problemas Florestais Do Género *Araucaria*. Encontro IUFRO. Curitiba, Brasil. Pp. 136-144.

- Di Marco, E. 2012. Ficha Técnica *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. (Familia Araucariaceae). Producción forestal 2(4): 48-49.
- Dimitri, M. J.; Leonardis, R.; Biloni, J. 1998. El nuevo libro del árbol: especies forestales de la Argentina oriental. Tomo II. 2.º ed. Buenos Aires. 124 p.
- Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M.; Robledo, C. W. 2015, abril. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Fernández, R.; Lupi, A.; Pahr, N. 1999. Aptitud de las tierras para la implantación de bosques. Provincia de Misiones. Argentina. Yvyrareta 9:41-49.
- Gonzales, R.; Suárez, T. 1994. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de Pino Paraná (*Araucaria Angustifolia*) reforestado en la Provincia de Misiones. Revista Yvyrareta 5:4-8. Misiones. Argentina.
- IRAM 9542. 1977. Método de ensayo de flexión estática de maderas con densidad aparente mayor de 0.5 g/cm³. Instituto Argentino de Racionalización de materiales. 10 pp. Buenos Aires. Argentina.
- Keller, A; Crechi, E.; Aquino, D.; Barth, S.; Di Stasi, M.; Carazzo, C.; Cristaldo, D. y Schapovaloff, J. 2022. Efectos del raleo sobre el crecimiento y la producción de *Araucaria angustifolia* hasta los 34 años en el noroeste de Misiones, Argentina. XXXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. 6 páginas. Disponible en cd de actas.
- Köhl, M.; Magnussen, S.; Marchetti, M. 2006. Sampling Methods, Remote Sensing and GIS. Multiresource Forest Inventory. Ed. Springer. Berlin. Heidelberg. Serie Tropical Forestry. p. 17-69.
- Macdonald, E.; Hubert, J. 2002. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. Forestry 75 (2):107-138.
- Mancini, F.; Sanesi, G.; Lasserre, S. 1964. Provincia de Misiones. Informe edafológico. Compañía Argentina de Relevamientos Topográficos y Aerofotogramétricos (CARTA), Buenos Aires, 191 p.
- Martiarena, R.; Von Wallis, A.; Fernández, R.; Lupi, A.; Pahr, N. 2007. Efecto de la fertilización inicial sobre el crecimiento de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. 4^{to} Congreso Forestal de Cuba. La Habana, Cuba.
- MODEL 340 E-Computer Operation Manual Maintenance Manual. 2002. Metriguard Inc. SE, 1120. SE Latah Street.
- SMN. 2022. Estadísticas de largo plazo. Período 1991-2020. Ciudad de Iguazú. Servicio Meteorológico Nacional. Extraído el 21 octubre 2022 de: <https://www.smn.gob.ar/estadisticas>.
- SOIL SURVEY STAFF. 1975. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA-SCS, Agriculture Handbook Number 436, 754 p.

- Winck, R.A. 2013: Influencia del raleo sobre las características anatómicas y las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus taeda* L. de la región NE de la Argentina. Tesis de Maestría. FCEQyN-UNAM.102 p. <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/6927>
- Winck R. A.; Bragañolo A.; Colcombet L.; Aquino D. R.; Primo A. I.; Schamne D. R.; Weber, M. E.; Fassola H. E. 2026a. Densidad, módulo de rotura y de elasticidad para madera de pino híbrido F2 de 26 años para dos distanciamientos iniciales entre plantas. Revista Yvyraretá. Núm. 34 (2026). Suplemento de resúmenes XX JOTEFA (En Edición). Pg 542-543.
- Winck R. A.; Colcombet L.; Aquino D. R.; Bulman C.; Primo A. I.; Fassola H. E. 2026b. Efecto del distanciamiento inicial de plantación sobre la densidad y el módulo de elasticidad dinámico de la madera de pino híbrido F2 de 26 años de edad. Revista Yvyraretá. Núm. 34 (2026). Suplemento de resúmenes XX JOTEFA (En Edición). Pg 548-549.
- Winck R. A. 2023. Calidad estructural de la madera de pino híbrido F₁ *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* basada en métodos no destructivos. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones. Pp. 222. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/14834> .