

Medición del tiempo de propagación de ondas para estimar rigidez de árboles en pie de Pino híbrido F₁ INTA-PINDO

Measure of the wave stress time to estimate the standing trees stiffness in hybrid pine F₁ INTA-PINDO

R. A. Winck^{1,2*}, C. Rotundo¹, D. R. Aquino¹, M. E. Gauchat^{1,2}, M. C. Area³, E. Belaber¹, H. Enrique Fassola¹

¹EEA Montecarlo, INTA, Av. El Libertador 2472. Montecarlo, Misiones, Argentina.*
winck.rosa@inta.gob.ar ²Facultad de Ciencias Forestales-UNaM. Bertoni N° 124. Eldorado, Misiones, Argentina. ³Programa de Celulosa y Papel - Instituto de Materiales de Misiones (CONICET-UNaM).
Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales (UNaM). Félix de Azara 1552 (3300). Posadas, Misiones, Argentina. Telef. 3764-422198.

Abstract

The TreeSonic microsecond timer was designed for prediction of tree stiffness. It measures the stress wave time between a start and a stop transducer, from a known distance. Then the speed is calculated and with the density of the material, it allows estimating standing trees elasticity modulus. The objective of the work was to estimate the dynamic elasticity modulus through the wave propagation speed, at 10 and 11 years of 2 of hybrid pine progenies test.

Keywords: non-destructive methods, stress wave velocity, sites.

Resumen extendido

El hecho de poder estimar la rigidez de la madera de los árboles en pie es un importante paso en el proceso moderno de producción. Para ello, existen herramientas acústicas que han sido ampliamente aceptadas por la industria de los productos forestales para estimar la rigidez de la madera (Llana, Iñiguez-Gonzalez, Arriaga & Wang, 2016). El objetivo de este trabajo consistió en utilizar el equipo TreeSonic Timer (Fakopp® Enterprise) para estimar la calidad de la madera juvenil en ensayos de progenies de pino híbrido F₁ INTA-PINDO (*Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*) y verificar la confiabilidad del mismo en dicha estimación. Los ensayos utilizados en este estudio fueron dos y contienen 66 familias híbridas F₁ que fueron implantadas en el año 2007 en las localidades de Montecarlo (sitio 1) y Colonia Delicia km 22 (sitio 2), Misiones, Argentina. El diseño experimental de ambos ensayos es de bloques completos con tratamientos al azar y parcelas lineales de 5 plantas.

A las edades de 10 y 11 años se evaluaron el crecimiento en diámetro a la altura de pecho (dap), la altura total (h), el coeficiente de esbeltez (relación entre la altura/diámetro, h/dap). Para chequear la confiabilidad de los datos obtenidos con el equipo y validar la metodología para una especie de la región se realizaron mediciones en 2 años consecutivos de la velocidad de propagación de onda (VS) (Fig. 1a y 1b) de todos los árboles en pie (1100). Paralelamente, se extrajo una muestra de 398 tarugos de madera de 5 mm de diámetro x 30 mm de longitud (Fig. 1c), 138 en el sitio 1 y 260 en el sitio 2, Dicha muestra estuvo constituida por el árbol de dap medio de cada familia en cada bloque. El procesamiento de los tarugos (Fig. 1d) permitió determinar los valores medios de densidad en estado verde (DV), la densidad básica (DB) y el contenido de humedad (CH) por familia al momento de medición de la VS en ambos años, con las ecuaciones (1), (2) y (3) respectivamente.

$$DV = \frac{P_h}{V_h} \quad (1)$$

$$DB = \frac{P_o}{V_h} \quad (2)$$

$$CH = \left(\frac{P_h - P_o}{P_h} \right) * 100 \quad (3)$$

Con el equipo TreeSonic Timer se midió el tiempo de propagación de onda entre un transductor de inicio y otro de finalización situados a una distancia de 1000 mm. El procedimiento consistió en introducir las puntas (clavos) de los transductores en el árbol, utilizando el martillo deslizante del equipo, asegurando una profundidad de penetración de 50 mm. Los clavos fueron colocados siguiendo un ángulo de 45 grados respecto al eje del árbol. Luego se efectuó un golpe en el sensor

del transductor de inicio con un martillo de acero de 200 g y se registró el tiempo (microsegundos), efectuando 8 repeticiones. Luego se estimó la VS con la ecuación (4)

$$VS \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{(1000 * distancia conocida (mm))}{(tiempo Fakopp (\mu m) + 2,8)} \quad (4)$$

Donde la distancia conocida es igual a 1000 mm, en tiempo Fakopp, es un valor medio del tiempo obtenido con el equipo en μm , y 2,8 es un factor corrección (relación entre tiempo y distancia), específico para cada equipo.



Fig. 1a y 1b: Procedimiento de medición del tiempo de propagación de la onda acústica. 1c y 1d: Extracción, identificación y acondicionamiento de tarugos.

Luego conociendo la DV y la VS, con la ecuación (5) se estimó el MOE_d .

$$MOE_d (Gpa) = \frac{DV \left(\frac{kg}{m^3} \right) * VS^2 \left(\frac{m}{s} \right)}{1000000000} \quad (5)$$

Los datos fueron analizados con el software InfoStat y se calcularon los estadísticos descriptivos tales como media, desvío estándar, coeficiente de variación, máximo, mínimo, rango, para las variables dap, h, h/dap, DB, DV, CH, VS y MOE_d . Se ajustó una regresión múltiple para estimar el módulo de elasticidad dinámico (MOE_d) a partir de variables regresoras dap, h, h/dap, DB, DV, CH y VS. Las variables que resultaron significativas para un nivel de confianza del 95% fueron la VS (p-valor=0.00) y la DV (p-valor=0.00). Por otro lado, para comparar los valores de MOE_d obtenido para el sitio 1 y 2, se ajustó una regresión simple entre el MOE_d y la VS, empleando la herramienta “Comparación de Rectas de Regresión”. Los resultados de las mediciones de ambos ensayos indicaron que el crecimiento anual medio, entre los 10 y 11 años, por familia en diámetro y altura fue de 1,17 cm y 1,67 m, respectivamente. También se observó un aumento de 0,75 a 0,79 en el valor de la esbeltez; de 418 a 426 kg/m^3 en la densidad básica, de 957 a 1015 kg/m^3 en la densidad verde y de 3371 a 3689 m/s en la velocidad de propagación de ondas, un incremento de 318 m/s/año, que es un indicador de la rigidez de la madera, representada por el MOE_d ; el aumento MOE_d medio fue de casi 3 Gpa/año. Los valores mínimos, medios y máximos de MOE_d fueron 7,78; 10,95; 15,32 y 9,00; 13,92; 18,51 Gpa a los 10 y 11 años de edad, respectivamente. Estos valores son orientativos, dado que el material debe ser sometido al ensayo destructivo, sin embargo, según O Niell (2004) la correlación del MOE_d Fakopp de árboles en pie y MOE de Máquina Universal en tablas secas es de 0,855. El valor medio del CH fue de 56,13% y 58,17% a los 10 y 11 años, respectivamente.

Las ecuaciones ajustadas para 10 y 11 años de edad se presentan a continuación:

Ajustes Regresión Múltiple - MOE_d

$MOE_d_{10} = -22,13 + 0,012 * DV_{10} + 0,006 * VS_{10}$ (R-Cuadrada Ajustada=99,57%, Fig. 2a)

$MOE_d_{11} = -26,94 + 0,013 * DV_{11} + 0,007 * VS_{11}$ (R-Cuadrada Ajustada=99,70%, Fig. 2b)

Comparación de Líneas de Regresión – MOE versus VS por Sitio a los 10 años de edad

Para el Sitio 1: $MOE_{10} = -11,26 + 0,006 * VS_{10}$

Para el Sitio 2: $MOE_{10} = -11,17 + 0,007 * VS_{10}$

(R-Cuadrada Ajustada = 93,48%, Fig. 3a)

Comparación de Líneas de Regresión – MOE versus VS por Sitio a los 11 años de edad

Para el Sitio 1: $MOE_{11} = -15,39 + 0,008 * VS_{11}$

Para el Sitio 2: $MOE_{11} = -14,39 + 0,008 * VS_{11}$

(R-Cuadrada Ajustada = 92,92 %, Fig. 3b)

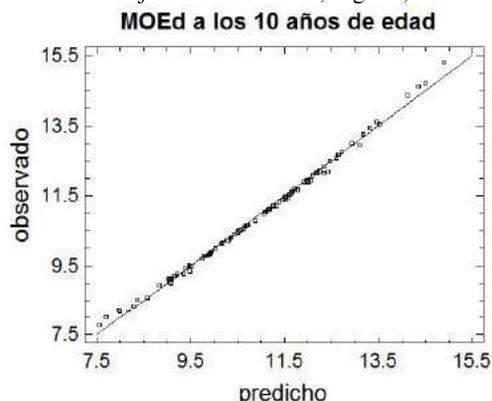


Fig. 2a: MOE_d Observado Vs Predicho-10 años

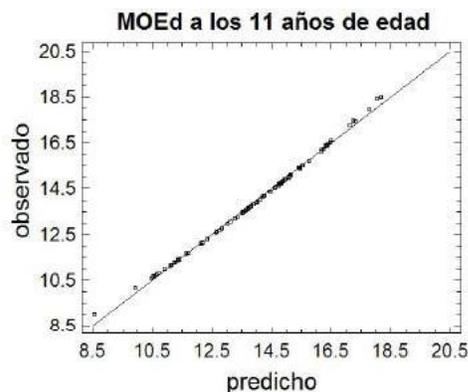


Fig. 2b: MOE_d Observado Vs Predicho-11 años

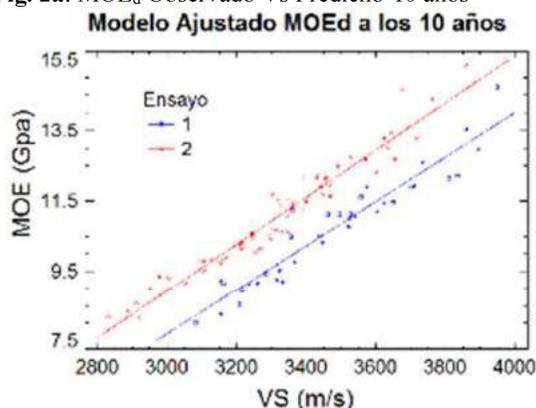


Fig. 3a: MOE_d Estimado para Ensayo 1 y 2-10 años

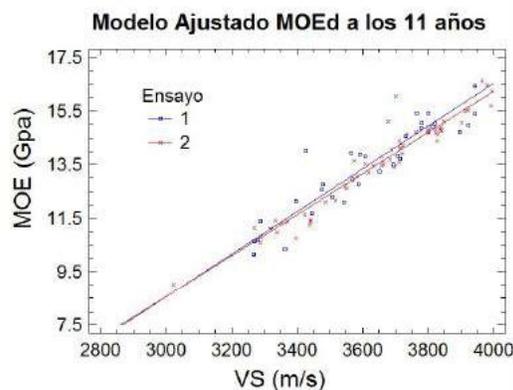


Fig. 3b: MOE_d Estimado para Ensayo 1 y 2-11 años

Para un nivel de confianza del 95%, no existieron diferencias estadísticamente significativas entre las pendientes de los Sitios 1 y 2 (p -valor= 0,30) a los 10 años, ni entre interceptos y pendientes del sitio 1 y 2 (con P -valores de 0,07 y 0,46 respectivamente) a los 11 años. Por el contrario, existieron diferencias estadísticamente significativas entre los interceptos de los Sitios 1 y 2 (p -valor=0.00), a los 10 años. Se observó que a los 11 años de edad no existen diferencias en el MOE_d para ambos sitios, por lo que se puede optar por ajustar una única regresión múltiple, incorporando también la DV para mejorar la estimación.

El equipo TreeSonic resultó eficiente para inferir la rigidez de la madera. Los datos obtenidos en las de mediciones de los 2 años consecutivos fueron consistentes, lo cual indica que este método tiene un alto potencial de uso para el taxón estudiado en esta región. Si bien se recomienda validarlo con el método destructivo, es un método recomendable para ser utilizado en procesos de selección (Screening) involucrados en el mejoramiento genético.

Bibliografía

- Fakopp Enterprise. 2019. [en línea]: [Fecha de consulta mayo de 2019]. Disponible en: www.fakopp.com
- O'Neill, Hugo. 2004. Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos.
- Llana, D.F.; Iñiguez-Gonzalez, G.; Arriaga, F.; Wang, X. 2016. Acoustic test of timber, *BioResources* 11 (2), 3303-3317.