



Maderas. Ciencia y Tecnología

ISSN: 0717-3644

analias@ubiobio.cl

Universidad del Bío Bío

Chile

Barría, Cristián; Sandoval, Simón; Rojas, Gerson
USO DEL MÉTODO DE RESISTOGRAFÍA PARA LA PREDICCIÓN DE LA DENSIDAD
BÁSICA DE LA MADERA EN ÁRBOLES EN PIE DE *Pinus radiata*
Maderas. Ciencia y Tecnología, vol. 19, núm. 3, 2017, pp. 349-362

Universidad del Bío Bío
Concepción, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48552028010>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

 redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

USO DEL MÉTODO DE RESISTOGRAFÍA PARA LA PREDICCIÓN DE LA DENSIDAD BÁSICA DE LA MADERA EN ÁRBOLES EN PIE DE *Pinus radiata*

USING RESISTOGRAPHY METHOD FOR PREDICTION OF WOOD BASIC DENSITY IN STANDING TREES OF *Pinus radiata*

Cristián Barría^{1,*}, Simón Sandoval¹, Gerson Rojas²

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue desarrollar modelos de estimación de la densidad básica de la madera a nivel de árbol completo y a diferentes alturas de árboles de *Pinus radiata*, a partir de la resistencia de la madera medida con el resistógrafo, a la altura del pecho a 1,3 m sobre el nivel suelo (*DAP*). Se utilizó una muestra de 29 árboles de 15 años de edad, obtenidos al azar, en un ensayo clonal establecido en la Región del Bío-Bío, Chile. Para cada árbol, en seis diferentes alturas relativas del fuste, se determinó la resistencia de la madera y la densidad básica, a partir de 174 mediciones realizadas con el resistógrafo y en muestras de rodelas. Los resultados obtenidos indicaron que tanto la densidad básica como la resistencia de la madera disminuyeron significativamente en función de la altura del árbol, en la dirección base y altura comercial, en un 16,8% y 38,5%, respectivamente. Los valores de resistencia media determinados al *DAP*, presentaron una variación entre árboles de 11% y 19%. Se generó un modelo que estima la densidad básica a nivel de árbol completo utilizando como única variable predictora la resistencia media de la madera medida al *DAP*, con un error de estimación de 11,9 kg/m³, el cual no disminuye al incorporar variables de estado de árbol (*DAP* y *HT*). A partir de este modelo se generó un método para estimar la densidad básica en diferentes secciones del árbol.

Palabras claves: Evaluación no destructiva, modelo estadístico, métodos no destructivos, pino radiata, propiedades de la madera.

¹Bioforest S.A., Concepción, Chile.

²Departamento de Ingeniería en Maderas, Facultad de Ingeniería. Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

*Autor para correspondencia: cristianbarria@arauco.cl

Recibido: 25.10.2016 Aceptado: 03.04.2017

ABSTRACT

The objective of this research was to develop models for estimation of the basic density of wood at full tree level and at different heights of *Pinus radiata* standing trees, measured from the wood resistance using the resistography at DBH level. A sample of 29 trees of 15 years old was used for the experiment. The trees were selected in a clonal field test established in the Bío-Bío Region, Chile. For each tree, 174 measurements were made with the resistograph and wood disks were obtained to determine the wood resistance and the basic density at six different relative heights of the stem. As a result, a significant decrease of the basic density and resistance of the wood was observed, from the base to the apex of the trees, with values of 16,8% and 38,5% of decrease, respectively for each variable. The average for the resistance values determined at DBH varied between 11% and 19% among the measured trees. A prediction model was generated to estimate the basic density at the tree level using the average resistance of the wood measured to the DBH. The adjustment parameters of the model was a root mean square error value of 11,9 kg/m³, which did not decrease when other variables of tree (DBH or total height) were incorporated. As a main conclusion, a new method to estimate the wood basic density at different sections of the tree was generated using the adjusted model.

Keywords: Non-destructive evaluation, non-destructive methods, radiata pine, statistical model, wood properties.

INTRODUCCIÓN

La densidad básica de la madera, también conocida como peso específico, es una de las propiedades físicas más importantes de la madera. Diaz-vaz (1981) la define como la relación existente entre el peso y el volumen de la madera medido en estado anhídrico y saturado, respectivamente. Normalmente, esta propiedad es utilizada como indicador de calidad de las plantaciones forestales y de los procesos de transformación industrial, debido a que es relativamente fácil de determinar, se relaciona adecuadamente con otras propiedades de la madera y con calidad del producto final (Zobel y Van Buijtenen 1989, Gantz 2002, Isik y Li 2003, López *et al.* 2010, Fundová 2012, Couto *et al.* 2013 y Ramírez y Peredo 2015).

Tradicionalmente, la densidad de la madera es determinada en laboratorio utilizando el método exacto de desplazamiento volumétrico (López *et al.* 2010, Fundová 2012, Couto *et al.* 2013). Otra técnica capaz de proporcionar una medida exacta y precisa de la variación de la densidad de la madera es la densitometría de rayos X (Moya y Tomazello 2009, Gao *et al.* 2012). Sin embargo, a pesar que ambos métodos son exactos, precisos y confiables, poseen un elevado costo, ya que requieren de la utilización de equipos de laboratorio sofisticados y del uso de intensivo de tiempo y mano de obra (Bouffier *et al.* 2008, López *et al.* 2010, Gao *et al.* 2012).

Producto de lo anterior, en los últimos años se han intensificado los esfuerzos de investigadores, asociados a la ciencia y tecnología de la madera, por evaluar e implementar nuevas técnicas no destructivas (*TND*), que permitan caracterizar y estimar la densidad básica en árboles en pie, en forma rápida y confiable, minimizando los costos y alteración o daño sobre los árboles evaluados (López *et al.* 2010 y Gao *et al.* 2012).

Otro foco de interés de los programas de caracterización y segregación operacional de plantaciones en pie, ha sido generar información de densidad básica de la madera a diferentes alturas en el árbol. Es común que en un bosque se obtenga más de un producto por árbol (rollizos debobinable, aserrables y pulpables), y por lo tanto se hace necesario conocer el valor de densidad básica a diferentes alturas relativas (*hi*) del árbol, en especial, el valor de densidad básica de la sección pulpable, definida frecuentemente entre los diámetros límite de utilización de 16 cm (*DLU16*) y 8 cm (*DLU8*). En este

contexto, técnicas de tipo acústicas (Eckard *et al.* 2010, Soto *et al.* 2012, Wang 2013, Carson *et al.* 2014) y electromagnéticas (Schimleck *et al.* 2003, Ramírez y Peredo, 2015), han sido evaluadas como métodos alternativos para predecir la densidad básica, en un gran número de árboles en pie, en el menor tiempo y sin alterar la forma, crecimiento y sanidad. Algunas de estas técnicas, actualmente están siendo utilizadas operacionalmente por las empresas forestales (Schimleck *et al.* 2003, Ramírez y Peredo 2015).

En esta dirección, la resistografía es una técnica que permite estimar la densidad de la madera, a partir de la resistencia que opone ésta a la penetración de una broca que ingresa en la madera a una velocidad de rotación y avance constante. La resistencia de la madera es medida electrónicamente con el resistógrafo. Esto y el principio de funcionamiento de esta técnica han sido descrito por autores tales como Rinn (1994), Rinn *et al.* (1996), Gantz (2002), Isik y Li (2003), López *et al.* (2010), Eckard *et al.* (2010), Acuña *et al.* (2011), Abellán (2011), Blanco (2012), Rinn (2012) y Fundová (2012).

Los valores de coeficientes de correlación, entre la resistencia de la madera y densidad de la madera, reportados en la literatura varían entre un 54% y 85%, ambos determinadas en muestras de tarugos y rodelas obtenidas al *DAP* en diferentes especies tales como *Pinus taeda* (Gantz 2002, Isik y Li 2003, Eckard *et al.* 2010), *Picea abies* (Kahl *et al.* 2009), *Pinus pinaster* (Bouffier *et al.* 2008), *Pinus caribaea* y *Pinus radiata* (Gantz 2002), *Eucalyptus grandis* (López *et al.* 2010, Couto *et al.* 2013), *Eucalyptus globulos* (Gantz 2002) y *Eucalyptus urophylla* (Gantz 2002, Couto *et al.* 2013), clones e híbridos de *Eucalyptus* sp. (Lima *et al.* 2007, Gomes *et al.* 2011, Oliveira *et al.* 2015).

Dada la escasa información reportada del uso de la resistografía en la evaluación, selección y segregación de árboles y plantaciones de *Pinus radiata* en Chile, se plantea el interés de explorar el desempeño de esta técnica para la estimación de la densidad básica de esta especie creciendo en Chile. En este contexto, el objetivo principal de este estudio fue desarrollar modelos de estimación de la densidad básica de la madera a nivel de árbol completo y a diferentes alturas del árbol de *Pinus radiata*, a partir de la resistencia de la madera medida con el resistógrafo a la altura *DAP*.

MATERIALES Y METODOS

Muestra de árboles

Se utilizaron 29 árboles asociados a 18 clones y 3 familias de cruzamientos contralados de *Pinus radiata* D. Don de 15 años de edad, obtenidos de un ensayo de evaluación clonal establecido en la Región Bío-Bío, Chile. El área de estudio se encuentra ubicada en el predio San José Colico comuna de Curanilahue (Longitud 73°21'00" O; latitud 37°28'00" S). La plantación sin raleo, fue establecida a una densidad de 1111 árboles por hectárea, en un sitio de topografía plana y en un suelo del tipo sedimentos marinos, con una temperatura media anual que oscila entre los 15 a 18 °C y con una precipitación anual acumulada año normal de 1000 a 1200 mm. Al momento del muestreo, el ensayo tenía una densidad de plantación de 996 árboles por hectárea. En tanto, la muestra de árboles procesados presentaron un *DAP* promedio medido con huincha diamétrica de 30,4 cm con coeficiente variación de 8,6% y una altura total (*HT*) promedio medida post volteo con huincha de distancia de 25,7 m y un coeficiente de variación de 4,8%.

Mediciones de la resistencia y densidad básica de la madera

Las mediciones de resistencia de la madera fueron realizadas utilizando un resistógrafo marca IML-RESI PD400®, con diámetro de broca de 3 mm. La configuración de la velocidad de rotación y avance utilizada fue de 3500 rpm y 99 cm/minuto, respectivamente. Se realizó una medición en el árbol en pie a la altura del *DAP*, en dirección corteza-corteza, en una sección libre de defectos en orientación norte-sur (Figura 1a). Otras cinco mediciones, fueron realizadas post voldeo a diferentes alturas comerciales del fuste, definidas en 15%, 50%, 75% y 100% con respecto a la altura comercial definida hasta el *DLU8*, más una medición en la base (Figura 1b).



Figura 1. Medición de resistencia de la madera con el resistógrafo en árbol en pie (a) y a diferentes alturas relativas de fuste, dirección base a ápice del árbol (b).

En cada uno de los 174 puntos de medición, se obtuvo un resistograma que describe el perfil de variación de la resistencia de la madera en dirección radial corteza-corteza. Posteriormente, en cada resistograma se obtuvo el valor de resistencia media (*RM*). La *RM* representa el valor medio de resistencia de la madera registrado cada 0,1 mm de avance en el perfil radial del fuste, expresado en porcentaje (Figura 2).

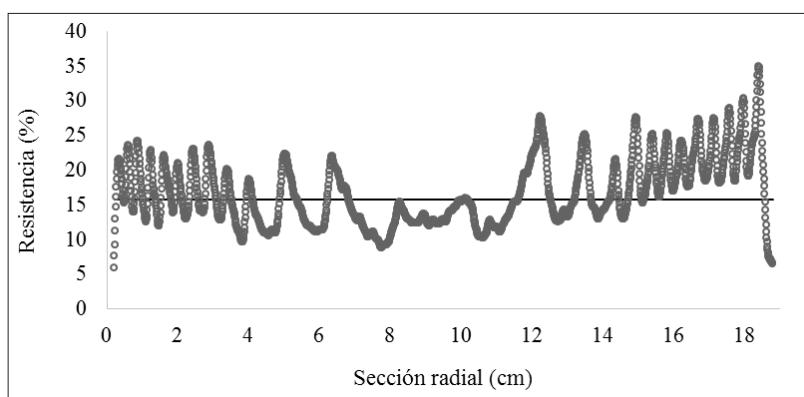


Figura 2. Perfil de resistencia de la madera de un árbol evaluado con resistógrafo en dirección radial corteza-corteza. La línea continua marca el valor de resistencia media.

La densidad básica de la madera, fue determinada en 174 rodelas de 25 mm de espesor, obtenidas desde los diferentes puntos de medición con el resistógrafo, las cuales contenían la medición de resistencia. La densidad básica de la madera para cada rodelas fue determinada gravimétricamente, utilizando la Norma ASTM D2395 (ASTM 2009). En tanto, la densidad básica de árbol completo (DB_{arb}), fue obtenida ponderando la densidad básica por el área basal de cada rodelas obtenida en el árbol según la ecuación 1; aquí G es la suma del área basal de las n rodelas extraídas en el árbol, DB_i y g_i la densidad básica y el área basal de cada rodelas en el árbol, respectivamente.

$$DB_{arb} = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^n g_i DB_i \quad (1)$$

Finalmente, se determinó la variación longitudinal de la RM y la densidad básica de la madera, en función de la altura relativa del árbol. La diferencia de medias entre estas variables, en cada punto de medición, se evaluó con una prueba de comparación múltiple de medias utilizando el test de Tukey a un nivel de confianza del 95%.

Estimación de la densidad básica del árbol completo

La densidad básica de árbol completo (DB_{arb}) se estudió en un modelo lineal simple a partir de la resistencia media determinada a la altura del DAP (RM_{DAP}), siendo b_0 y b_1 parámetros de regresión del modelo:

$$DB_{arb} = b_0 + b_1 RM_{DAP} \quad (2)$$

Además, se estudió la incorporación de variables de estado de árbol DAP y HT en el modelo 1 con el objetivo de evaluar si la incorporación de estas variables mejora la precisión de estimación de la densidad básica a nivel de árbol completo. Los modelos estudiados fueron:

$$DB_{arb} = b_0 + b_1 RM_{DAP} + b_2 DAP \quad (3)$$

$$DB_{arb} = b_0 + b_1 RM_{DAP} + b_2 DAP^2 \quad (4)$$

$$DB_{arb} = b_0 + b_1 RM_{DAP} + b_2 DAP^2 HT \quad (5)$$

Del total de 29 árboles muestreados, 24 fueron utilizados en el ajuste de los modelos y 5 árboles separados aleatoriamente para la etapa de validación. La precisión de los modelos fue evaluada a partir de la raíz del cuadrado medio residual ($RMSE$), y la selección del modelo considerando el número de parámetros, se realizó mediante el índice de Akaike (AIC), los cuales son calculados utilizando las expresiones matemáticas que se indican a continuación:

$$RMSE = \sqrt{SSE / (n - p)} \quad (6)$$

$$AIC = n \ln(SSE / n) + 2p \quad (7)$$

Donde SSE es la suma de los cuadrados residuales, n es el número de observaciones asociadas a todas las oportunidades de medición y p es el número de parámetros del modelo.

Estimación de la densidad básica en secciones del árbol a diferente altura relativas

Si se conoce la DB_{arb} estimada desde la sección anterior, se puede determinar la densidad básica de una sección del fuste comprendida entre la altura del $DLU8$ y una altura inferior en el fuste (h_i). Para ello, primero se determinó el cociente $DB_{Sección} / DB_{arb}$, donde $DB_{Sección}$ es la densidad básica ponderada y acumulada en forma decreciente, desde la altura del $DLU8$ hasta la base del árbol, determinada a partir de la densidad básica en las 174 rodelas extraídas a diferentes alturas en el fuste. Esta relación es 1 cuando la $DB_{Sección}$ se calcula en la base del árbol ($DB_{Sección} = DB_{arb}$), y menor a 1 cuando se determina en secciones en altura ($DB_{Sección} < DB_{arb}$). Este cociente se estima con la siguiente relación:

$$\frac{DB_{Sección}}{DB_{arb}} = b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{HT} \right)^{0,5} + b_2 \left(\frac{h_i}{HT} \right)^5 \quad (8)$$

Conociendo HT y la DB_{arb} estimada desde la sección anterior (modelos 2, 3, 4 ó 5), es posible estimar la densidad básica de cualquier sección en el fuste comprendida entre una altura h_i y el $DLU8$ según la expresión:

$$DB_{Sección} = \left[b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{HT} \right)^{0,5} + b_2 \left(\frac{h_i}{HT} \right)^5 \right] \times DB_{arb} \quad (9)$$

El modelo 9 se obtiene despejando $DB_{Sección}$ del modelo 8, donde b_0 , b_1 y b_2 son las constantes de regresión estimadas en el modelo 8; las alturas h_i y HT se expresan en las mismas unidades de medición (metros), DB_{arb} y $DB_{Sección}$ en kg/m^3 .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variación longitudinal en el árbol de la densidad básica y resistencia de la madera

En la Tabla 1, se presentan los resultados promedios asociados a la variación de la densidad básica de la madera y la RM , en función de h_i del árbol.

Tabla 1. Resultados de la variación en altura de la densidad básica de la madera y resistencia media (*RM*).

Altura relativa ¹	Densidad básica ¹ (kg/m ³)	<i>RM</i> ¹ (%)
Base	415 ^a	17,1 ^a
DAP	391 ^b	15,1 ^b
0,15	386 ^b	13,8 ^c
0,50	375 ^{bc}	12,8 ^{cd}
0,75	361 ^{cd}	11,7 ^d
DLU8	345 ^e	10,5 ^e
Valor árbol ²	393	14,9
Disminución <i>DLU8/Base</i>	16,8%	38,5%

¹Valores promedios seguidos de igual letra en cada columna y variable, significa que no difieren significativamente ($p < 0,05$).

²Valor árbol ponderado al *DAP*, en función del área basal medida en cada rodela.

Los resultados de densidad básica de la madera obtenidos en este estudio (Tabla 1), son similares a los valores reportados para la especie *Pinus radiata* creciendo en Nueva Zelanda (Cown and Clement 1983, McConchie 1995, Donalson *et al.* 1995), y Chile (Moya *et al.* 2002), respectivamente, quienes reportan valores de densidad básica que oscilan entre 290 y 420 kg/m³, medido en muestras obtenidas de plantaciones sometidas a diferentes manejos, con edades entre 16 y 20 años.

En la Tabla 1, se puede observar además que la densidad básica de la madera disminuye significativamente con la altura del árbol. Este comportamiento es similar a lo observado Cown y McConchie (1980), quienes determinaron una disminución de 16%, entre la densidad básica determinada en la base y el ápice del árbol, similar a la diferencia de 16,8% entre base y *DLU8* obtenido en este estudio. Estas variaciones, podrían estar explicada por la edad, altura del árbol, manejo silvícola, sitio, latitud, altitud, factores ambientales y mejoramiento genético (Bamber y Burley 1983 y Tsehay 1995).

La RM disminuye 38,5% entre base del árbol y *DLU8* (Tabla 1). Esta variación es significativa y evidencia la misma tendencia de la densidad básica a disminuir en función de la altura del árbol. Lo anterior, según lo descrito por Rinn *et al.* (1996), Couto *et al.* (2013) y Oliveira *et al.* (2015), corresponde a un comportamiento esperado, dado que a mayor densidad de la madera, mayor es la resistencia que opone la pared celular a la perforación, vinculadas posiblemente a una mayor proporción de madera tardía con paredes celulares más gruesas y resistentes.

Los valores de *RM*_{*DAP*}, encontrados en este estudio, están dentro de la variación en resistencia en coníferas reportada en otros estudios. En esta investigación se obtuvo una resistencia media a nivel de árbol de 14,9% (Tabla 1), y una variación a nivel del *DAP*, entre 11% y 19% (Figura 3). Para la especie *Pinus taeda* de 8 y 11 años de edad, creciendo en Estados Unidos, se han reportado valores de resistencia media al *DAP* entre 12 y 28% (Isik y Li 2003, Eckard *et al.* 2010). Valores similares fueron reportados por Gantz (2002), quien determinó una resistencia media entre 21 y 23%, para *Pinus caribaea* de 10 a 16 años, creciendo en Venezuela, y de un 14 a 15% para *Pinus radiata* de 10 años, creciendo en Chile.

Determinación de la relación entre la resistencia y densidad básica de la madera

La relación entre la *RM* y la densidad básica determinada al *DAP*, a nivel de árbol, se muestra en la Figura 3. Aquí se observa que el rango de resistencia media varió entre 11 a 19%, y su relación lineal con la densidad básica explica 65% de la variación según el coeficiente de determinación.

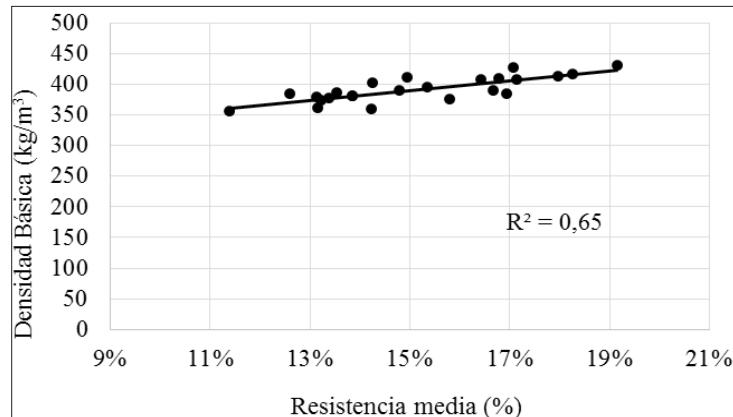


Figura 3. Relación entre resistencia media y la densidad básica determinadas al DAP .

Comparativamente, el valor antes señalado, es levemente superior a las relaciones y rangos consultados. En este contexto, Gantz (2002) y Eckard *et al.* (2010), determinaron para *Pinus taeda* y *Pinus caribaea*, correlaciones moderadas entre las variables analizadas, donde un 51% a 60% de la variación en la densidad de la madera fue explicada por la variación de la RM_{DAP} . En tanto, Gantz (2002), determinó que solo entre un 16% a un 35% de la variación de la densidad de la madera de *Pinus radiata*, fue explicada por la variación de la RM_{DAP} ; coeficientes de determinación inferiores a los observados en la presente investigación.

Estimación de la densidad básica de árbol completo

En la Tabla 2, se presentan las ecuaciones de regresión asociados al ajuste de modelos para estimar la DB_{arb} , a partir de las variables medidas en árboles, tales como RM_{DAP} , DAP y HT . En ella, se puede observar que todos los modelos ajustados son altamente significativos ($p < 0,0001$), y explican entre el 67,5% y el 68,7% de la variabilidad total de la DB_{arb} y poseen errores de estimación semejantes, los cuales fluctúan entre 11,94 kg/m³ y 12,05 kg/m³. En tanto, el análisis de los residuales muestra que los datos cumplen con los supuestos de la regresión lineal. El menor valor obtenido para el criterio de selección de Akaike, exhibido en la Tabla 2, permitió seleccionar el modelo de DB_{arb} , a partir de la medición de RM_{DAP} como el modelo más preciso. El modelo seleccionado, posee un error de estimación de la densidad básica de 11,94 kg/m³ y un coeficiente de determinación de 67,5%.

Tabla 2. Modelos ajustados para estimar densidad básica ponderado árbol completo.

Modelo número	b_0	b_1	b_2	R^2	RMSE	AIC	Valor p
$DB_{arb} = f(RM_{DAP})$	266,31	828,65	-	0,675	11,94	118,94	< 0,0001
$DB_{arb} = f(RM_{DAP}, DAP)$	287,91	839,32	-0,764	0,687	12,00	120,07	< 0,0001
$DB_{arb} = f(RM_{DAP}, DAP^2)$	275,16	839,62	-0,011	0,685	12,04	120,25	< 0,0001
$DB_{arb} = f(RM_{DAP}, DAP^2, HT)$	273,92	838,49	-0,0003	0,684	12,05	122,28	< 0,0001

En la literatura consultada, no se encontró un análisis similar que considere el ajuste de modelos que permitan estimar la DB_{arb} a partir de la RM_{DAP} , en árboles en pie. Los desarrollos evaluados, han estado enfocados principalmente, en evaluar las correlaciones entre la densidad y la resistencia media, perfil completo y a diferentes profundidades en la dirección corteza-médula, todas determinadas principalmente a la altura del DAP . En general, los mejores modelos consultados, utilizan como única variable predictora la resistencia media, similar a lo observado en este estudio.

La validación externa del modelo seleccionado, realizada en cinco árboles que no participaron en el proceso de ajuste del modelo de DB_{arb} en función de la RM_{DAP} se muestra en la Figura 4. En este análisis se obtuvo un coeficiente de determinación de 92% y una $RMSE$ de $12,4 \text{ kg/m}^3$. Si bien estos resultados aún deben considerarse preliminares debido al tamaño muestral, se puede inferir que la técnica permite discriminar o segregar individuos con baja, media o alta densidad básica de la madera; tendencia similar a la observada por Isik y Li (2003) y López *et al.* (2010).

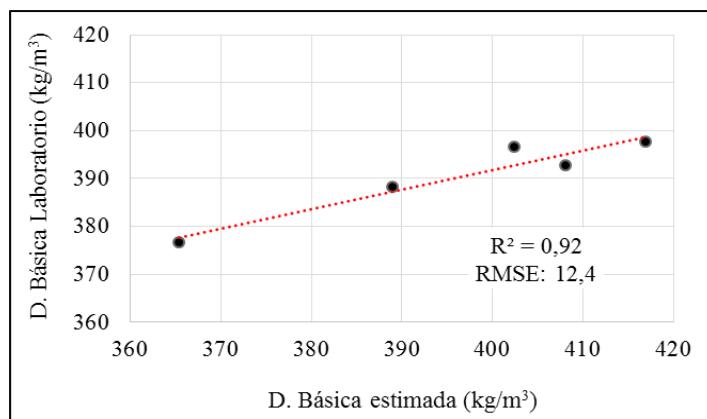


Figura 4. Relación entre la densidad básica árbol determinada en laboratorio y estimada por el modelo seleccionado.

La incorporación de las variables medidas tradicionalmente en árboles en pie, evaluadas en los modelos 3, 4 y 5, no mejoró la precisión de los modelos. Esto queda demostrado a partir de la $RMSE$ y AIC , donde los índices denotan que la incorporación de estas variables en un modelo lineal múltiple, entorpecen la precisión de la estimación. El efecto es puntual, y probablemente se deba a la poca variabilidad de la muestra de árboles seleccionados asociada a clones y familias, de una misma edad y establecidos en mismo sitio. Megraw (1985), muestra claras evidencias que justificarían este comportamiento, a través de resultados obtenidos en estudios desarrollados en coníferas, de una misma edad, de similar clase de altura y establecidas en un mismo sitio, en la cual se demuestra que no existe relación, entre las variables diámetro y volumen con la densidad de la madera.

Estimación de la densidad básica en secciones del árbol a diferente altura

En la Figura 5, se presenta el modelo estimación del cociente entre la $DB_{Sección}$ y la DB_{arb} en función de h_i del árbol descrito en el polinomio de la ecuación 8.

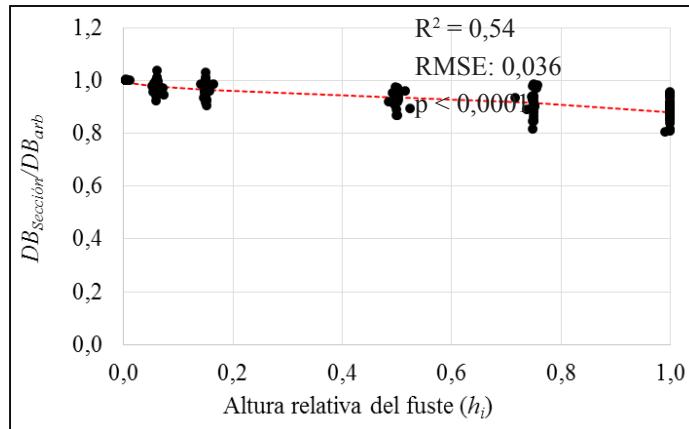


Figura 5. Modelo estimación cociente entre la $DB_{Sección}$ y la DB_{arb} en función de h_i

La estructura del modelo captura la tendencia de los datos, siendo el ajuste altamente significativo ($p < 0,0001$) y explicando el 54% de la variabilidad del cociente $DB_{Sección}/DB_{arb}$ según el R^2 . Consolidando la ecuación 9 se obtiene un modelo que permite obtener la densidad básica en una sección en el fuste, definida entre el $DLU8$ y un punto de altura inferior del árbol (h_i). La ecuación final queda descrita según:

$$DB_{Sección} = \left[1,0 - 0,08933 \left(\frac{h_i}{HT} \right)^{0,5} - 0,0315 \left(\frac{h_i}{HT} \right)^5 \right] \times [266,31 + 828,65 \cdot RM_{DAP}] \quad (10)$$

Lo interesante de este desarrollo, es que la estimación de la densidad básica se realiza solamente conociendo la HT y la RM_{DAP} . Esto, sumado a la capacidad predictiva de la RM_{DAP} sobre la DB_{arb} , transforma a esta metodología como una alternativa interesante de investigar, profundizar y validar en futuros desarrollos.

CONCLUSIONES

Se determinó que tanto la densidad básica como la resistencia de la madera de *Pinus radiata* disminuyen significativamente en función de la altura del árbol, en la dirección base y altura comercial, en un 16,8% y 38,5% respectivamente.

Los valores de resistencia media determinados a la altura del *DAP* presentaron un valor promedio de 15% y una variación a nivel de árbol, entre 11% y 19%. Por su parte, esta variable explicó un 65% de la variación de la densidad básica de la madera determinado a través de un modelo de regresión lineal simple.

La densidad básica a nivel de árbol completo en pie se estima con mayor precisión utilizando la resistencia media al *DAP* como única variable predictora en un modelo de regresión lineal simple, altamente significativo y con un error de estimación de 11,9 kg/m³. La incorporación de variables de estado de árbol (*DAP* y *HT*) no reduce significativamente el error de estimación.

El modelo estimación de densidad básica en altura generado en este estudio, podría ser utilizado para estimar la densidad básica de la sección pulpable en árboles en pie de mayores dimensiones, donde el interés es conocer la calidad de la materia prima y segregar entre diferentes productos.

El método desarrollado y el uso de la resistografía como técnica de muestreo no destructivo muestra un alto potencial para ser utilizado como una herramienta de caracterización y segregación de plantaciones en pie, considerando las restricciones de edad, tamaño y condiciones de crecimiento de la muestra de árboles evaluada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Bioforest S.A., por facilitar la materia prima utilizada y financiar este trabajo. A Don José Ordoñez, de Forestal Arauco Zona Centro, por su valiosa colaboración durante la ejecución del muestreo en terreno.

BIBLIOGRAFÍA

Abellán, E. 2011. Caracterización de la anisotropía de la madera por medios de las técnicas no destructivas del resistógrafo y del georadar. Universidad Politécnica de Valencia, España. 97p.

Acuña, L.; Basterra, L.; Casado, M.; López, G.; Ramón-Cueto, G.; Relea, E.; Martínez, C.; González, A. 2011. Aplicación del resistógrafo a la obtención de la densidad y la diferenciación de especies de madera. *Materiales de Construcción* 61(303): 451-464.

ASTM International. ATM. 2009. *Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction*, Vol 04.10 Wood. West Conshohocken, Pennsylvania, United States.

Bamber, R.; Burley, J. 1983. *The wood properties of radiata pine*. Commonwealth Agricultural Bureaux. England. First edition. ISBN 0 85198 516 5. 84p.

Blanco, J. 2012. Caracterizacão tecnológica da madeira jovem de Teca (*Tectona grandis* L.f.). Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, título de Mestre. Universidade Federal de Lavras, Brasil. 81p.

Bouffier, L.; Charlot, C.; Raffin, A.; Rozenberg, P.; Kremer, A. 2008. Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)? *Annals of Forest Science* 65(1): 1-8.

Carson, S.; Cown, D.; Mckinley, R.; Moore, J. 2014. Effects of site, silviculture and seedlot on wood density and estimated wood stiffness in radiata pine at mid-rotation. *New Zealand Journal of Forest Science* 44(26): 1-12.

Couto, A.; Trughilo, P.; Neves, T. 2013. Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus uruphylla* using nondestructive methods. *Cerne* 19(1): 27-34.

Cown, D.J.; McConchie, D. 1980. Wood property variations in an old-crop stand of radiata pine. *New Zealand Journal of Forest Science* 10(3): 508-520.

Cown, D.; Clement, B. 1983. A wood densitometer using direct scanning with x-rays. *Wood Science and Technology* 17: 91-99.

Diaz-vaz, J.E. 1981. Delimitación de madera temprana – tardía y juvenil –madura en pino oregón. *Bosque* 4(1): 55 -58.

Donalson, L.A.; Evans, R.; Cown, D.J.; Lausberg, M.J.F. 1995. Clonal variation of wood density variables in *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forest Science* 25(2): 175-188.

Eckard, J.; Isik, F.; Bullock, B.; Li, B.; Gumpertz, M. 2010. Selection efficiency for solid wood traits in *Pinus taeda* using time-of-flight acoustic and micro-drill resistance methods. *Forest Science* 56(3): 233-241.

Fundová, I. 2012. In situ wood quality assessment in interior Spruce. Master of Science Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Gao, P.; Wang, X.; Brashaw, B.; Ross, R.; Wang, L. 2012. Rapid assessment of wood density of standing trees with nondestructive methods-A review. In: International Conference on Biobase Material Science and Engineering (BMSE), October 21-23, 2012, Changsha, China. p. 262-267.

Gantz, C. 2002. Evaluating efficiency of the resistograph to estimate genetic parameters for wood density in two softwood and two hardwood species. Master of Science Thesis, North Carolina State University, Raleigh, United State.

Gomes, A.; Trugilho, P.; Gomide, J.; Moreira, J.; Andrade, C.; Nogueira, I. 2011. Determinacão da densidade básica da madeiras de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. *Revista Árvore* 35(2): 349-358.

Isik, F.; Li, B. 2003. Rapid assessment of wood density of live trees using the resistograph for selection in tree improvement programs. *Canadian Journal of Forest Research* 33(12): 2426-2435.

Kahl, T.; Wirth, C.; Mund, M.; Böhnisch, G.; Schulze, E.D. 2009. Using drill resistance to quantify the density in coarse woody debris of Norway spruce. *European Journal of Forest Research* 128(5):467-473.

Lima, J.; Cardoso, R.; Trughilo, P.; Da Cruz, C.; Da Silva, R. 2007. Use of the resistograph for *Eucalyptus* wood basic density and perforation resistance estimative. *Scientia Forestalis* 75(1): 85-93.

López, A.; Genes, P.; López, J. 2010. Evaluación No-destructiva de la densidad de la madera de árboles vivos en pie de *Eucalyptus grandis* utilizando Resistógrafo. XXIV Jornadas Forestales de Entre Ríos, Nov, 2010, Concordia, Argentina.

McConchie, D. 1995. Wood quality of radiata pine on farm sites, In: Wood quality workshop 95. FRI Bulletin N° 201. New Zealand, Forest Research Institute Ltd, Rotorua.

Megraw, R.A. 1985. Wood quality factors in loblolly pine. The influence of tree age, position in tree, and cultural practice on wood specific gravity, fiber length, and fibril angle. TAPPI PRESS. Atlanta, GA, United State.

Moya, R.; Salazar, F.; Valenzuela, L. 2002. Efecto de la fertilización a la pradera en la densidad básica de la madera de *Pinus radiata*. D. Don. *Investación Agraria: Sistema Recursos Forestales* 11(1): 181-192.

Moya, R.; Tomazello, M. 2009. Wood density variation and tree ring demarcation in *Gmelina arborea* trees using X-ray densitometry. *Cerne* 15(1): 92-100.

Oliveira, J.T.S.; Wang, X.; Baptista, G. 2015. Assessing specific gravity of young Eucalypt plantation trees using a resistance drilling technique, In: Proceedings of the 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symp. Sept, 22-25, Sao Paulo, Brazil. 574-584.

Ramírez, M.; Peredo, M. 2015. Ten years of experience using NIR in Arauco: From model development to operational use in *Eucalyptus* sp. breeding program and commercial plantations assessment, In: Proceedings of the 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Sept, 22-25, Sao Paulo, Brazil.

Rinn, F. 1994. Resistographic visualization of tree-ring density variations, In: International conference on tree rings, environment and humanity relationships and processes. Arizona, United State.

Rinn, F.; Schweingruber, H.; Schar, E. 1996. Resistograph and x-ray density charts of wood comparartive evaluation on drill resistance profiles and x-ray density charts of different wood species. *Holzforschung* 50(4): 303-311.

Rinn, F. 2012. Basics of micro-resistance drilling for timber inspection. *Holztechnologie* 53(3): 24-29.

Soto, L.; Valenzuela, L.; Lasserre, J.P. 2012. Efecto de la densidad de plantación inicial en el módulo de elasticidad dinámico de árboles en pie y trozas de una plantación de pino radiata de 28 años, en la zona de arenas, Chile. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 14(2): 209-224.

Schimleck, L.; Mora, C.; Daniels, R. 2003. Estimation of the physical wood properties of green *Pinus taeda* radial wood samples by near infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Research* 33(12): 2297-2305.

Tsehaye, A. 1995. Within and between-tree variations in the Wood quality of radiata pine. Doctoral Thesis, University of Canterbury, New Zealand.

Wang, X. 2013. Acoustic measurements on trees and logs: a review and analysis. *Wood Science and Technology* 47: 965-975.

Zobel, B.; Van Buijtenen, J.P. 1989. *Wood variation: its causes and control*. Springer-Verlag, Berlin.