

# CAPACIDAD DE PREDICCIÓN DE CALIDAD ESTRUCTURAL DE LA MADERA CON MÉTODOS SÓNICOS DESDE EDADES TEMPRANAS

## STRUCTURAL WOOD QUALITY PREDICTION CAPACITY WITH ACOUSTIC METHODS, IN YOUNG TREES

**Gonzalo Caballé** <sup>(1)</sup>, **Rafael Mansini** <sup>(2)</sup>, **Oscar Santaclara** <sup>(3)</sup>, **Raquel Gonçalves** <sup>(4)</sup>,  
**Manuel Guaita** <sup>(5)</sup>, **Francisco J. Lario Leza** <sup>(6)</sup>, **Esther Merlo** <sup>(7)</sup>

(1) Dr. Ing. Ftal., Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Bariloche, Argentina

(2) Prof., Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, FEAGRI, UNICAMP, Campinas, Brasil

(3) Ing. Ftal., MADERA PLUS, SL. Ourense, España

(4) Dra. Prof., Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, FEAGRI, UNICAMP, Campinas, Brasil

(5) Dr. Prof., Dir. Plataforma de Ingeniería de la Madera Estructural (PEMADE) de la USC, Lugo, España

(6) Ing. Ftal., TRAGSA, Maceda, España; (7) Dra. Ing. Ftal., MADERA PLUS, SL. Ourense, España

Dirección de contacto: Esther Merlo - maderaplus@maderaplus.es

### Código de identificación: T3-34

#### Resumen

La posibilidad de realizar una predicción de las propiedades tecnológicas que definen la aptitud para uso estructural de la madera, a partir de la medición de variables no destructivas sobre el árbol en pie a edades tempranas, permite acelerar los procesos de mejora genética de una especie o mejorar la eficiencia de las tareas de manejo forestal visando la producción de madera de calidad. El presente estudio se realizó sobre 40 árboles de *Pinus pinaster* de 9 años de edad. Los árboles fueron evaluados en pie y posteriormente apeados. En cada árbol se midieron variables de crecimiento, forma y velocidad de propagación de onda sónica en sentido longitudinal y radial. Se realizó un ensayo a flexión del fuste completo y la determinación mecánica del módulo de elasticidad (MOE), módulo de rotura (MOR), y densidad de la madera. Posteriormente, se desarrollaron modelos de regresión multivariante para predecir dichas propiedades. Los tres modelos desarrollados presentan un porcentaje de predicción próximo o superior al 50%. La esbeltez, la inclinación del árbol y la velocidad de propagación de la onda sónica en sentido longitudinal, son las variables que mejor se relacionan con el MOR y el MOE. En cuanto a la densidad, el diámetro de las ramas y la velocidad de propagación en la cara de compresión fueron relevantes. Deberán tenerse en cuenta estas variables en las labores de gestión selvícola y selección genética si se pretende obtener madera estructural de calidad.

**Palabras clave:** *Pinus pinaster*; MOR; MOE; métodos no destructivos

#### Abstract

*Making a prediction of the technological properties that define the structural quality of the wood, from non-destructive methods on the standing tree at early ages, allows to accelerate the processes of selection and genetic improvement of a Species or improve the forest management efficiency aiming the production of high quality timber. The present study was carried out on 9 years old Pinus pinaster (n:40). The measurements were made in standing trees and then they were felled. In each tree, growth and shape variables were measured and the acoustic wave velocity propagation in the longitudinal and radial directions was also measured. Standard test method for elasticity (MOE) and rupture modulus (MOR) of entire stem and density of the wood were performed in all trees. Subsequently, multivariate regression models were developed to predict these properties. The three models developed have coefficient of determination close or greater than 50%. The slenderness, the inclination of the tree and the wave velocity propagation in the longitudinal direction are the variables that best relate to MOR and MOE. As for density, the diameter of the branches and the velocity of propagation in the face of compression were relevant. These variables should be taken into account in the silvicultural management and genetic selection in order to obtain high quality structural timber.*

**Keywords:** *Pinus pinaster*; MOR; MOE; non-destructive evaluation methods

## 1. INTRODUCCIÓN

El *Pinus pinaster* Ait. es una de las especies coníferas más importantes utilizadas por la industria forestal de España, especialmente en Galicia, donde se producen más de 2,8 millones de metros cúbicos anuales de madera en rollos de esta especie. El destino principal, en esta región, es la industria de triturado para producción de distintos tipos de paneles. No obstante, el *P. pinaster* presenta propiedades mecánicas aptas para su empleo como madera estructural con clase resistente media-alta [1,2,3]. La posibilidad de realizar una predicción de las propiedades tecnológicas que definen su aptitud para uso estructural, a partir de la medición de variables no destructivas sobre el árbol en pie a edades tempranas, permite acelerar los procesos de mejora genética de esta especie y al mismo tiempo, mejorar la eficiencia de las tareas de manejo forestal visando la producción de madera de calidad estructural.

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar modelos de predicción para las principales variables que definen el uso estructural de la madera (módulo de elasticidad, resistencia a flexión y densidad básica) utilizando mediciones no destructivas sobre árboles en pie en etapa juvenil (9 años).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó sobre 40 árboles de *P. pinaster* de 9 años de edad que formaban parte de un ensayo de procedencias de la especie, instalado en el vivero forestal de la empresa TRAGSA (42°16'43"N, 7°37'29"O), Maceda, Orense, España. Se seleccionaron de manera aleatoria 3-5 árboles de las 10 procedencias con mejor desempeño (tasa de crecimiento y volumen) sobre un grupo total de 25 procedencias. Los árboles fueron evaluados en pie y posteriormente apeados. En cada árbol se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP, 1,3 m) con forcípula y la altura total y de inicio de la copa con pértiga. Relacionando la altura total con el DAP, se estimó el coeficiente de esbeltez. En el verticilo más próximo al DAP, se contaron todas las ramas y se midieron los diámetros de las mismas empleando calibre digital y su ángulo de inserción en el tronco mediante clinómetros. Se registró el número total de verticilos en cada árbol diferenciándolos en vivos y muertos.

La rectitud fue evaluada con dos tipos de mediciones. La primera, consistió en medir la flecha máxima originada al colocar una varilla recta de 1,8 m de longitud desde la base del árbol. La segunda, se realizó colocando una plomada a la altura del DAP en la posición del perímetro donde mayor inclinación se observaba para luego medir el ángulo formado con la vertical utilizando un clinómetro.

En los árboles en pie, se midió la velocidad de propagación de la onda acústica (método de tiempo de vuelo) utilizando el equipo de ultrasonido USLab (AGRICEF, Brasil), y los equipos sónicos ST300 (FibreGen, Nueva Zelanda) y MST Microsecond Timer (Fakopp, Hungría). Se realizó una medición con estos tres equipos en sentido longitudinal, en la cara opuesta a la de madera de compresión originada por la inclinación del árbol y sólo con los equipos MST y USLab en la cara de compresión de cara a reducir el daño por inserción de los transductores del ST300 en árboles de tan pequeño porte. Asimismo, se realizó una medición en sentido radial (USLab y MST) colocando los sensores a un metro de altura respecto al suelo y a ambos lados del tronco en sentido de madera de compresión a madera opuesta.

Finalizadas las mediciones en pie, los árboles fueron apeados, desramados y los fustes enteros (aproximadamente 3 m de longitud) se enviaron al laboratorio PEMADE, en la Escuela Politécnica Superior de Lugo (Universidad de Santiago de Compostela) para realizar los ensayos mecánicos. Las pruebas fueron realizadas en un banco de ensayos múltiple con cuatro actuadores, de 200 y 600 kN, de la firma MicroTest. Cada fuste se sometió a flexión colocándolo sobre dos apoyos, a una distancia aproximada a de 18 veces el diámetro con corteza en la sección central, y aplicando dos

cargas iguales y simétricas en el tercio central de la luz. La carga se aplicó a velocidad constante de recorrido, midiendo la deformación durante el tramo elástico en el centro de la luz y en el canto inferior de cada fuste. Esta deformación se utilizó para el cálculo del módulo de elasticidad (MOE). Una vez sobrepasado el tramo elástico, se llevó cada fuste hasta la rotura con el fin de conocer la carga máxima aplicada y realizar el cálculo de la resistencia a flexión (MOR). Una vez finalizado el ensayo, fue extraída una rodaja libre de defectos lo más cercana posible a la sección de rotura para la determinación de la densidad y humedad de cada fuste. Para esto, la rodaja fue pesada con precisión de 0,01 gramos y medidas sus dimensiones con calibre con precisión de 0,01 milímetros, y se secó en estufa según la norma EN 13.183-1 con el fin de conocer su contenido de humedad. A partir de este contenido de humedad y de las dimensiones y peso de la rodaja, se determinó la densidad básica de la madera en cada fuste.

En el cálculo del MOR y MOE fueron empleadas las Ecuaciones 1 y 2. Para la obtención del módulo de elasticidad se utilizó la carga correspondiente al 40% ( $P_{40\%}$ ) y 10% ( $P_{10\%}$ ) para la carga de rotura, así como los desplazamientos verticales en este trecho ( $f_{40\%}$  y  $f_{10\%}$ ).

$$MOR = \frac{16P_{max}L}{3\pi D^3} \quad (1)$$

$$MOE = \frac{1,33L^3(P_{40\%}-P_{10\%})}{\pi D^4(f_{40\%}-f_{10\%})} \quad (2)$$

Donde:  $MOR$  = módulo de ruptura a flexión (MPa);  $P_{max}$  = carga máxima (N);  $L$  = espacio libre entre apoyos (mm);  $MOE$  = módulo de elasticidad (MPa);  $P_{40\%}$  = 40% de la carga máxima (N);  $P_{10\%}$  = 10% de la carga máxima (N);  $f_{40\%}$  = desplazamiento vertical correspondiente a  $P_{40\%}$  (mm);  $f_{10\%}$  = desplazamiento vertical correspondiente a  $P_{10\%}$  (mm).

Posteriormente, se desarrollaron modelos de regresión múltiple para predecir MOR, MOE y densidad básica. Se empleó el procedimiento “paso a paso” (stepwise) para elegir el subconjunto de variables regresoras que formaron parte del modelo y se descartaron posibles problemas de colinealidad entre las variables manteniendo el factor de inflación de la varianza (VIF en inglés) por debajo de 10. La bondad de ajuste de los modelos de regresión fue fijada en base al coeficiente de determinación,  $R^2$ , buscando minimizar el error cuadrático medio promedio. Se eliminaron datos con residuos studentizados menores o mayores a -2 y 2 por considerarlos aberrantes. Para el caso de la velocidad de propagación de la onda acústica se evaluaron las diferencias entre los equipos mediante el test de comparación de medias de Students.

### 3. RESULTADOS

La tasa de crecimiento anual promedio fue 0,88 cm.año<sup>-1</sup> en diámetro y 0,49 cm.año<sup>-1</sup> en altura existiendo una escasa correlación entre ambos parámetros. Los árboles con mayor crecimiento en altura, fueron las que menor crecimiento en diámetro presentaron. En consecuencia, la esbeltez, fue mayor en los árboles con mayor crecimiento en altura. La rectitud del árbol, medida a través del ángulo de inclinación o la flecha, fue la variable con mayor dispersión en los datos (Tabla 1).

La velocidad de propagación de la onda acústica en los árboles en pie presentó diferencias entre los equipos utilizados debidas, especialmente, a la forma de medición de cada equipo. No obstante, se comprobó una correlación alta ( $R^2=0,82$ , Fig. 1) y positiva entre las medidas de velocidad de los equipos sónicos (ST300 y MST Fakopp) y algo menor entre los equipos sónicos y el ultrasónico (USLab,  $R^2= 0,60$ , Fig. 1).

Tabla 1: Valores promedio (EE), máximos y mínimos de las principales características de crecimiento evaluadas sobre árboles de *Pinus pinaster* de 9 años de edad.

Variable	n	Media	E.E.	Mínimo	Máximo
Altura total (m)	40	4,44	0,09	3	5,85
Altura inicio de copa (m)	40	1,11	0,07	0,25	2,25
Diámetro a la altura del pecho (DAP, 1,3 m)	40	7,93	0,15	5,99	10,24
Ángulo de inclinación (°)	40	12,15	1,13	1,4	36,3
Flecha en 1,8 m desde la base (mm)	40	53,73	4,17	8	124
Esbeltez (adimensional)	40	56,78	1,54	42,25	75,62
Cantidad de verticilos	36	11,94	0,42	7	17
Verticilos Muertos	39	4,59	0,29	0	8
Ramas x Verticilo a 1,3 m	39	5,1	0,22	2	8
Diámetro de ramas a 1,3 m (mm)	36	14,67	0,65	6,64	22,44
Ángulo de ramas a 1,3 m (°)	39	64,77	2,25	6	85

La velocidad de propagación de la onda acústica promedio en sentido longitudinal sobre la cara opuesta a la compresión fue 2465 m.s<sup>-1</sup> y en la cara de compresión 2365 m.s<sup>-1</sup>. La velocidad en sentido radial promedio arrojó un valor de 2050 m.s<sup>-1</sup> y en sentido tangencial fue algo menor, 1870 m.s<sup>-1</sup>.

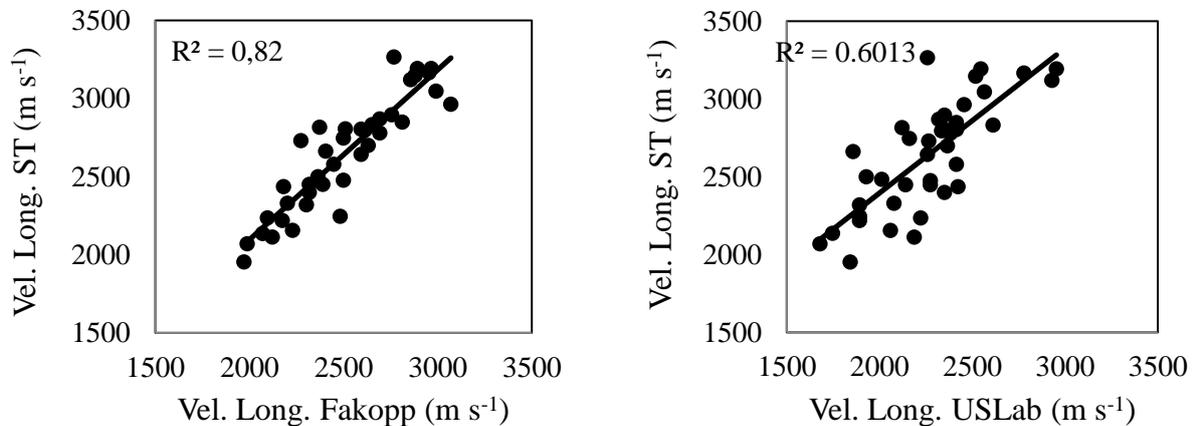


Figura 1: Relación entre valores de velocidad de propagación de onda acústica en sentido longitudinal con equipos sónicos ST300 y MST Fakopp (izquierda) y entre el equipo sónico ST300 y el ultrasónico USLab (derecha).

El módulo de elasticidad promedio (MOE) fue 1655,8 N.mm<sup>-2</sup> ( $\pm 675,4$ ), la resistencia a flexión promedio (MOR) 18,5 N.mm<sup>-2</sup> ( $\pm 5,4$ ) y la densidad básica promedio 0,36 g.cm<sup>-3</sup> ( $\pm 0,05$ ). La densidad básica no presentó correlación significativa con el MOE ( $r = 0,16$ ,  $p = 0,34$ ) ni con el MOR ( $r = 0,2$ ;  $p = 0,22$ ). La velocidad de propagación de la onda acústica en sentidos longitudinal y tangencial, independientemente del equipo utilizado, presentaron una correlación positiva superior a 0,6 y significativa tanto con el MOE como el MOR. Por el contrario, la velocidad en sentido radial presentó una correlación negativa y no significativa con los mismos parámetros. La velocidad

de propagación, en cualquiera de los sentidos, presentó correlaciones inferiores a 0,3 y no significativas con la densidad básica.

Los modelos predictivos para el MOE y MOR, realizados para cada equipo, quedaron conformados por la velocidad de propagación de onda acústica en sentido longitudinal en la cara opuesta a la compresión ( $VL$ ), la flecha ( $F$ ) o el ángulo de inclinación del árbol ( $Ang$ ) y la altura total del árbol ( $H$ ) o la esbeltez ( $E$ ). Los valores del coeficiente de determinación,  $R^2$ , fluctuaron entre 0,58 y 0,68 siendo el equipo ST300 el que mejor ajuste presentó con ambas variables (Tabla 2).

Tabla 2: Ecuaciones y parámetros estimados para predicción de MOR y MOE con equipos ST 300 (FibreGen, Nueva Zelanda), MST (Fakopp (Hungría) y USLab (AGRICEF, Brasil) en árboles de 9 años de *Pinus pinaster*.

Ecuación y parámetros estimados	$R^2_{Aj}$	ECMP
<b>ST300</b>		
$MOE = -1948,11 + 0,98VL + 21,46E - 21,24Ang$	0,63	222829,5
$MOR = -11,21 + 0,01VL - 0,04F + 1,73H$	0,68	11,06
<b>MST Fakopp</b>		
$MOE = -2103,86 + 1,03VL + 24,97E - 20,64Ang$	0,59	237971,1
$MOR = -13 + 0,01VL + 2,83H - 0,05F$	0,59	14,33
<b>USLab</b>		
$MOE = -1555,18 + 0,93VL + 23,94E - 5,32F$	0,60	241045,6
$MOR = -10,56 + 0,01VL + 2,80H - 0,05F$	0,58	14,48

$MOE$ : módulo de elasticidad global ( $N.mm^{-2}$ ),  $MOR$ : resistencia a flexión ( $N.mm^{-2}$ ),  $VL$ : velocidad de propagación de onda acústica en sentido longitudinal sobre la cara opuesta a la compresión ( $m.s^{-1}$ ),  $E$ : esbeltez (adimensional),  $Ang$ : ángulo de inclinación del árbol ( $^\circ$ ),  $F$ : Flecha (mm) y  $H$ : Altura total (m). ECMP: Error cuadrático medio promedio.

Los modelos estudiados para la predicción de densidad básica consideran un número mayor de variables que los modelos anteriores y se logra un coeficiente de determinación inferior. Las velocidades de propagación de onda en sentido longitudinal en la cara opuesta a la compresión y en sentido radial o tangencial medidas con los equipos sónicos (ST300 o MST), presentaron escasa o nula asociación con la densidad básica. Por el contrario, a partir de mediciones de velocidad de propagación de la onda en sentido longitudinal en la cara de compresión realizadas con el equipo USLab (ultrasónico), junto a un grupo de variables de forma y estructura, se logra un modelo que arroja un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,5$  (Tabla 3).

#### 4. DISCUSIÓN

La madera juvenil formada en los primeros años de actividad del cambium vascular, se caracteriza por su baja densidad, paredes celulares delgadas, traqueidas cortas con lúmenes grandes, alto ángulo del grano y alto ángulo microfibrilar [4]. Como consecuencia, los valores de rigidez, módulo de elasticidad y densidad encontrados son inferiores a los que presenta la madera madura de *P. pinaster* [3].

Tabla 3: Ecuación y parámetros estimados para predicción de densidad básica con equipo ultrasónico USLab (AGRICEF, Brasil) en árboles de 9 años de *Pinus pinaster*.

Ecuación y parámetros estimados	R <sup>2</sup> <sub>Aj</sub>	ECMP
USLab $Den. básica = 0,31 + 5,7 \cdot 10^{-5} VL_c + 2,9 \cdot 10^{-3} Ang - 4,2 \cdot 10^{-3} D_r - 0,01 DAP + 4,2 \cdot 10^{-3} Vert$	0,50	0,002

*Den. Básica*: densidad básica (grcm<sup>-3</sup>), *VL<sub>c</sub>*: velocidad de propagación de onda acústica en sentido longitudinal sobre la cara de compresión originada por la inclinación del árbol (ms<sup>-1</sup>), *Ang*: ángulo de inclinación del árbol (°), *D<sub>r</sub>*: diámetro promedio de las ramas del verticilo más próximo al DAP (mm), *DAP*: diámetro a la altura del pecho, 1,3m sobre el suelo (cm) y *Vert*: número de verticilos totales. ECMP: Error cuadrático medio promedio.

Los modelos predictivos desarrollados para las variables elastomecánicas de la madera juvenil, permiten realizar una selección temprana de individuos o procedencias con cierto grado de seguridad ( $R^2 > 0,5$ ) sabiendo que la selección se hace sobre madera que, a futuro, presentará mejores características para uso estructural. La velocidad de propagación de onda acústica, especialmente en sentido longitudinal, junto con la esbeltez o la altura y la rectitud del árbol (ángulo o flecha) son las variables que mejor predicen las características tecnológicas de la madera de *P. pinaster* en etapa juvenil.

La fuerte y positiva correlación entre las mediciones acústicas de los árboles en pie y las propiedades elastomecánicas de la madera, en particular el MOE, forman parte de la base teórica del empleo de estos métodos [5,6]. La velocidad de propagación de la onda dependerá esencialmente de las características mecánicas de la pared celular. Los retardos de señal que se produzcan serán debidos a la inclinación de las fibras respecto a la dirección de medida, la humedad y las singularidades o defectos que se presenten en su recorrido [5,7].

La correlación positiva entre la esbeltez y las propiedades mecánicas tiene su fundamento en la fórmula de pandeo de Euler. La altura crítica que el fuste de un árbol puede alcanzar antes de experimentar pandeo elástico depende del MOE, de la densidad en verde de la madera y del diámetro del fuste. Los individuos más esbeltos, evitan el pandeo de Euler aumentando la relación MOE/densidad, principalmente, a través de incrementos en el MOE, ya que la densidad es relativamente constante [8,9].

La relación entre la rectitud del árbol y la caracterización interna de la madera ha sido un tema ampliamente estudiado, especialmente cuando se examina la distribución espacial de la madera de reacción o compresión. Radi y Castera [10], en pino marítimo, encontraron que el porcentaje de madera de compresión y la excentricidad, definida como la relación entre el radio máximo y el mínimo, presentaron correlación positiva hasta los 6 m de altura. Más allá de esta altura las relaciones se hicieron menos evidentes. Más recientemente, Alteyrac y colaboradores [11] también analizaron el *P. pinaster* y en base a simulaciones computarizadas de la forma del árbol y de las características de la madera (MOE, densidad básica, contenido de humedad), concluyeron que la forma actual del fuste es un buen indicador de la ubicación de la madera de compresión, pero la relación es compleja y difícil de evaluar sin ningún conocimiento de la historia del árbol. La relación inversa entre la rectitud del árbol y las variables elastomecánicas (MOE y MOR) y directa con la densidad básica que se encontraron en el presente trabajo, posiblemente responda al reducido tamaño de los árboles (>6 m de altura) y al significativo efecto que la madera de compresión tiene sobre estos parámetros.

Numerosos estudios exploraron la relación entre la velocidad de propagación de la onda acústica y la densidad de la madera. Sin embargo, las conclusiones difieren considerablemente. En algunos

casos la velocidad de propagación no depende de la densidad de la madera [12] y en otros, se prueba que aumentos de velocidad se relacionan con mayor densidad [13], o por el contrario, disminuye la velocidad frente a aumentos de densidad [14]. El modelo predictivo desarrollado contempla una relación lineal positiva entre la velocidad de propagación de la onda y la densidad básica de la madera juvenil del *P. pinaster*. No obstante, esta respuesta se logró solo con la velocidad en sentido longitudinal sobre la cara de compresión originada por la inclinación del árbol y con el equipo ultrasónico. Los equipos sónicos no presentaron un ajuste aceptable.

La longitud de onda,  $\lambda$ , es directamente proporcional a la velocidad de onda e inversamente proporcional a la frecuencia del pulso acústico. Para una velocidad de propagación dada, a medida que la frecuencia aumenta la longitud de onda decrece, proporcionando la posibilidad de mayor resolución. El aumento de la madera de compresión sobre la cara de compresión y la mayor resolución del equipo ultrasónico, al parecer, permiten captar las diferencias en densidad de la madera e incorporar la medida de velocidad en el modelo predictivo.

El crecimiento en diámetro y su efecto sobre la densidad básica de la madera es controversial. Zobel y van Buijtenen [15] mencionan que la variación de la densidad de la madera entre árboles debido a causas genéticas es tan grande, que no permite apreciar la variabilidad por causa de otros factores externos como calidad de sitio, nivel de competencia, estructura de copa o ubicación geográfica. El modelo predictivo desarrollado contempla una relación inversa entre el DAP y la densidad básica de la madera juvenil del *P. pinaster*. Esta respuesta se debe especialmente al aumento de la proporción de madera tardía respecto a madera temprana dentro de cada anillo de crecimiento (datos no presentados). Similar respuesta fue encontrada por Merlo y colaboradores [3] en árboles adultos de *P. pinaster*.

## 5. CONCLUSIÓN

Es posible predecir las propiedades tecnológicas que definen la aptitud para uso estructural de la madera *P. pinaster*, a partir de la medición de variables no destructivas sobre el árbol en pie a edades tempranas. Estos modelos servirán de base para la selección y mejoramiento genético de esta especie visando la producción de madera de calidad para uso estructural.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco de diferentes proyectos de investigación que se definen a continuación: Proyecto "TOPWOOD" Convocatoria H2020-MSCA-RISE-2014, n°: 645654 con título "Wood phenotyping tools: properties, functions and quality"; Proyecto "IMAGINE" convocatoria, FEDER INNTERCONECTA n°:ITC-20151167 con título " Innovación en la sinergia de la cadena de valor de la madera gallega de coníferas para una industria más eficiente" y Beca FAPESP. 2015/11926-7 con título "Antecipação do conhecimento de propriedades da madeira utilizando ensaio de propagação de ondas em plantas jovens". Especial agradecimiento al apoyo técnico del personal del vivero de TRAGSA y del personal del laboratorio PEMADE, en la Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.

## REFERENCIAS

- [1] Riesco, G. y Díaz González J. Características físicas de la madera de pino procedente de raleos en el noroeste de España. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 9 (2007) 233-244.
- [2] Carballo, J, Hermoso, E., Fernández-Golfín, J.I. Mechanical properties of structural maritime pine sawn timber from Galicia (*Pinus pinaster* Ait. ssp. *atlantica*). *Invest Agrar Sist Recur For* 18 (2009) 152-158.
- [3] Merlo, E, Alvarez-Gonzalez, J.G., Santaclara, O., y Riesco, G. Modelling modulus of elasticity of *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain with standing tree acoustic measurements, tree, stand and variables. *Forest Systems* 23 (1) (2014) 1-14.

- [4] Barnett, J.R. y Jeronimidis, G. Wood quality and its biological basis. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK. (2003) 226pp.
- [5] Bucur, V. 1995. Acoustic of wood. New York: CRC Press Inc.
- [6] Rajeshwar, B., Bender, D. A., Bray, D. E. y McDonald. K. A. An ultrasonic technique for predicting tensile strength of southern pine lumber; American Society of Agricultural Engineers 40(4) (1997):1153-1159.
- [7] Acuña, L., Díez, M.R. y Casado, M. Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus pinaster* ait. Boletín del CIDEU 2 (2006): 7-26.
- [8] Lasserre, J.P., Mason, E. y Watt, M. The effects of genotype and spacing on *Pinus radiata* (D. Don) corewood stiffness in a 11 year old experiment. For Ecol Manage 205 (2005) 375-383.
- [9] Watt, M.S., Moore, J.R., Façon, J.P., Downes, G.M., Clinton, P.W., Coker, G., Davis, M.R., Simcock, R., Parfitt, R.L., Dando, J., Mason, E.G. y Bown, H.E. Modelling the influence of stand structural, edaphic and climatic influences on juvenile *Pinus radiata* dynamic modulus of elasticity. For Ecol Manage 229 (2006): 136-144.
- [10] Radi M., Castera P., Qualification de deux pins maritimes en liaison avec la structure de leur bois, Ann. Sci. For. 49 (1992) 185–200
- [11] Alteyrac, J., Fourcaud, T., Castera, P., Stokes A. Analysis and simulation of stem righting movements in Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.), in Proc. 3rd Workshop IUFRO WP S5.01-04, La Londe-Les-Maures, France (1999) 644 p.
- [12] Ilic, J. Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. Holz Roh- Werkst 61 (2003):167-172.
- [13] Oliveira, F.G.R. y de Sales, A. Relationship between density and ultrasound velocity in Brazilian tropical woods. Bioresour Technol 97 (2006) 2443-2446.
- [14] Bucur, V. y Chivers, R.C. Acoustic properties and anisotropy of some Australian wood species. Acoustica 75 (1991) 69-75.
- [15] Zobel, B.J. y Van Buijtenen, J.P. Wood variation: Its causes and control. Springer-Verlag, Berlín. Germany (1989) 363 p.