

La **Ciencia forestal** y su contribución a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible** 

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales **Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022 ISBN 978-84-941695-6-4** © Sociedad Española de Ciencias Forestales



8CFE

## Desarrollo de tecnologías no destructivas para calidad de madera en coníferas

HURTADO GONZÁLEZ, M.<sup>1</sup>, ARROJO, M.A.<sup>2</sup>, DÍAZ VAZQUEZ, R.<sup>3</sup>, GOICOECHEA, P.G.<sup>1</sup>, LARIO LEZA F.J.<sup>4</sup>, LUQUERO RAMOS, L.M.<sup>4</sup>, MAJADA GUIJO, J.<sup>2</sup>, MERLO SÁNCHEZ. E.<sup>5</sup>, PIÑEIRO GARCÍA, M.<sup>5</sup>, PRADA OJEA, E.<sup>3</sup>, VEGA CUETO, A.<sup>2</sup> y OCAÑA BUENO, L<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> NEIKER-BRTA, Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario, Campus Agroalimentario de Arkaute, Crtra N-104 km 355, 01192 Arkaute, Alava, España.

<sup>2</sup> CETEMAS, B<sup>o</sup> Pumarabule S/N 33936 Carbayin, Siero, Principado de Asturias, España.

<sup>3</sup> Centro de Investigación Forestal de Lourizán (AGACAL-Xunta de Galicia), Estrada, Pontevedra-Marín, km 4, España.

<sup>4</sup> Grupos Tragsa, C/ Maldonado nº 58, 28006 Madrid.

<sup>5</sup> Madera Plus Calidad Forestal, S.L., Parque Tecnológico de Galicia, Rúa de Vigo, 2 32900, San Cibrao das Viñas Ourense.

## Resumen

La construcción en madera está viviendo un auge sin precedentes durante estos últimos años. En este contexto, la ingeniería de producto y de proceso ha incrementado la necesidad de mejorar la materia prima, especialmente con la aparición de nuevos productos técnicos de madera. Esto ha llevado a que los programas de mejora genética de coníferas existentes en España precisen incorporar en sus estrategias caracteres de calidad de la madera para cubrir necesidades de la industria de transformación. El grupo operativo supra-autonómico GENMAC, ha desarrollado un trabajo colaborativo para la mejora, desarrollo y puesta en práctica de varios métodos no destructivos para caracterizar la calidad de la madera, incluyendo tecnologías sónicas, resistográficas, microdensitometría de rayos X, e infrarrojo cercano. Para el desarrollo de modelos estadísticos de calibración de estas metodologías se han seleccionado un conjunto de materiales genéticos de *Pinus radiata y Pinus pinaster* representativos de las poblaciones de mejora de estas especies en Galicia y País Vasco. Tras la ejecución del proyecto hemos generado unas herramientas para determinación de la densidad a nivel de anillo con distintas tecnologías no destructivas, así como densidad básica y el módulo de elasticidad dinámico a partir de la medición con sónicos sobre el fuste.

## Palabras clave

Ingeniería de productos, industria de transformación, mejora genética, Pinus pinaster, Pinus radiata.

## 1. Introducción

El incremento de la popularidad de la madera en el sector de la construcción está despertando el interés de los programas de mejora genética de coníferas en caracteres relacionados con la calidad de madera. Calidad de madera es un término que abarca diferentes aspectos como la ausencia de nudos, el color y la presencia de veteado entre otras. En el marco de este trabajo utilizamos dicho termino para referirnos a varias características físico-químicas de la madera que le confieren mayor resistencia y durabilidad y que la hacen apropiada para usos estructurales. Entre ellas podemos nombrar la densidad, el módulo de elasticidad, la longitud de las traqueidas, el ángulo de las microfibrillas y la espiralidad del grano. A pesar de estar moduladas por factores ambientales, la altitud y la edad, todas estas características muestran una heredabilidad alta, mayor que la de otros caracteres típicos de la mejora genética forestal, y están correlacionadas favorablemente (Gapare et al., 2009). Estas correlaciones favorables son muy interesantes desde el punto de vista de los programas de mejora, ya que implican que al mejorar cualquiera de los caracteres de interés, el resto variará en un sentido que favorece el aumento de calidad. En la parte negativa, todos los caracteres de calidad muestran correlaciones desfavorables con los caracteres de crecimiento, haciendo que la mejora para crecimiento disminuya la calidad y viceversa. Sin embargo, se ha comprobado que estas relaciones negativas entre crecimiento y calidad de madera pueden desacoplarse siendo viable la obtención de genotipos con crecimiento y calidad de madera elevados (Wu et al., 2007). Como



ejemplos prácticos de la viabilidad de esta mejora genética pueden citarse el programa de mejora genética de pino radiata en Nueva Zelanda, que incluyó la calidad de madera como carácter de interés a principios de siglo y que obtuvo unos grandes resultados en unos pocos años (RPBC 2015), o la eficiencia en la selección temprana (Wu et al. 2007).

Debido al mencionado interés en mejora genética de la madera existe la necesidad de implementar nuevas metodologías no destructivas que permitan la caracterización de la madera. En ese contexto el grupo operativo supra-autonómico GENMAC ha desarrollado y/o mejorado diversas técnicas basadas en tecnologías sónicas, resistográficas, microdensitometría de rayos X, e infrarrojo cercano que permiten la medición y estimación de caracteres de calidad de madera en *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*.

## 1.1 Resistografía para la estimación de densidad en la madera

La técnica resistográfica se basa en la evaluación de la potencia consumida durante la penetración de una estrecha broca a través de la madera. El análisis de la madera mediante este tipo de tecnología se ha empleado previamente con diferentes objetivos como son la evaluación del estado de conservación de elementos estructurales, así como la evaluación de riesgo de caída de árboles, ya que al igual que en los elementos estructurales de obra, es posible detectar zonas de podredumbre de la madera que presentan una densidad mucho menor.

Posteriormente, y a raíz de la estrecha correlación entre el perfil de potencia obtenido y la densidad de la madera, esta técnica ha sido empleada para la evaluación de la calidad de la madera en árboles en pie (Acuña et al. 2010, Fundova et al. 2018, Isik & Li 2003, Johnstone et al. 2011) como son las mediciones en campo para el análisis de podredumbres.

### 1.2 Técnicas infrarrojas para la estimación de densidad en la madera

La espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS, por sus siglas en inglés Near Infrared Reflectance Spectroscopy) es una técnica espectroscópica basada en la absorción de luz infrarroja (770-2500nm) que consiste en la emisión de un haz de luz sobre la muestra y la medición de la intensidad de la luz resultante tras la interacción con la muestra. Como resultado se obtiene un espectro de absorción en función de las longitudes de onda que se correlaciona con parámetros físico-químicos de la muestra. La espectroscopia NIR tiene como ventaja su rapidez, así como su naturaleza no destructiva, su sencillez y su rentabilidad económica. En la industria forestal, los primeros resultados basados en NIRS y propiedades químicas de madera fueron presentados hace más de 20 años Shenk & Westerhaus 1995). Estos estudios presentaron la idoneidad de la tecnología NIRS para cuantificar propiedades químicas de la madera como contenido en lignina, celulosa, humedad, densidad, etc. También se ha empleado en la diferenciación de especies, así como de procedencias de distintos orígenes dentro de especies.

#### 1.3 Técnicas sónicas para estimación del módulo de elasticidad

Las técnicas sónicas consisten en la medición de la velocidad de desplazamiento de una onda a través de un cuerpo. Los equipos sónicos son herramientas muy eficientes para la estimación del módulo de elasticidad (MoE, por sus siglas en inglés modulus of elasticity) (e.g. Lindström et al. 2002; Gapare et al. 2009), carácter que al igual que la densidad, está estrechamente relacionado con la calidad de madera para uso estructural. El MoE se define como la fuerza necesaria para que un material se deforme. Es por eso que se trata de un parámetro de gran importancia cuando se habla del uso estructural de la madera. Sus valores vienen determinados por el valor de la densidad y del ángulo de la microfibra y sus propiedades condicionan tanto la resistencia mecánica (fundamental en el uso estructural, de carpintería y suelos) como la estabilidad dimensional, asegurando por tanto una



menor aparición de curvaturas y alabeos, y aumentando el rendimiento del aprovechamiento de la madera en rollo (Vikram et al. 2011). Estas propiedades internas de la madera no pueden ser evaluadas visualmente, por eso la metodología sónica es una herramienta muy potente para predecir la rigidez de la fibra de forma no destructiva sobre un amplio número de árboles y parcelas. Los métodos sónicos además han mostrado ser eficientes para realizar una selección temprana por calidad de madera sobre planta de vivero (Goncalves et al. 2018) a través de la estimación del MoE.

### 1.4 Influencia de la presencia de extractivos en la madera

En la madera se encuentran ciertos componentes que constituyen entre 4% y el 10% del peso anhidro de madera normal de especies que crecen en climas templados y más del 20% en madera de especies tropicales. La presencia de estos componentes, que se pueden extraer con solventes polares y no polares, no modifica la estructura de la madera y contribuye en un bajo porcentaje a su masa. Sin embargo, tiene un gran efecto en sus propiedades y en sus procesos de transformación, pudiendo llegar a ocasionar un incremento en la densidad de la madera (Alves et al. 2012).

### 2. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo mejorar y/o desarrollar nuevos métodos no destructivos de caracterización de la calidad de la madera, empleando tecnologías sónicas, resistográficas, microdensitometría de rayos X, e infrarrojo cercano en las dos coníferas de mayor importancia en España, Pinus radiata y Pinus pinaster.

### Metodología

### 3.1. Diseño del estudio y selección de parcelas

El presente estudio se divide en 5 procedimientos experimentales: (1) Calibración y validación resistográfica, (2) calibración y validación NIR, (3) Estimación MoE por técnicas sónicas en árboles en campo, (4) Estimación densidad por resistógrafo y (5) Estimación MoE por técnicas sónicas en plántulas. Las muestras empleadas, así como la localización de las mismas se muestran en la tabla 1. Para los ensayos (1) y (2) se seleccionaron 3 parcelas experimentales, incluyendo árboles de P. pinaster y P. radiata para la calibración y validación de las técnicas resistográficas y NIR que serían llevadas a cabo por CETEMAS. Se muestreó cada individuo obteniendo: (1) una medida mediante resistógrafo, (2) extracción de core para análisis de densidad mediante Rayos X (método de referencia) y (3) extracción de viruta para análisis mediante NIRS.

La estimación MoE, llevada a cabo por Madera Plus, se dividió en dos partes: estimación MoE por técnicas sónicas en árboles en campo, ensayo (3); y estimación MoE por técnicas sónicas en plántulas, ensayo (5). Las plantas de campo se repartieron en más de 650 árboles de P. radiata distribuidos en 12 plantaciones forestales y 4 ensayos genéticos en Galicia y País vasco y 945 árboles en 2 ensayos genéticos de P. pinaster en Galicia. Las plantas de vivero sumaron un total de 260 plantas de 9 familias diferentes, procedentes de árboles jóvenes seleccionados por crecimiento, forma y calidad de madera para ser integrados en el programa de mejora de Pinus pinaster. Las plantas fueron semilladas en bandejas alveoladas de cultivo (2 bandejas por familia) y distribuidas completamente al azar sobre una mesa de cultivo. Para evitar la influencia del micrositio a lo largo del proceso de cultivo todas las bandejas fueron cambiadas de sitio de manera aleatoria.

Además de los individuos de P. radiata previstos para la estimación MoE por técnicas sónicas en árboles en campo, para la estimación de densidad por resistógrafo, ensavo (4), Neiker realizó medidas adicionales mediante resistografía en 38 plantaciones forestales de P. radiata distribuídas a lo largo de la cornisa cantábrica y Galicia, sumando un número total de árboles mayor de 1400 individuos (Figura 1).



### 3.2 Obtención de perfiles resistográficos y procesado

Los perfiles resistográficos fueron tomados mediante un resistógrafo Rinntech Modelo 4453-S (Rinntech) para la calibración y validación resistográfica realizada por CETEMAS y Resistograph R650 (Rinntech) para la estimación de densidad por resistógrafo realizada por Neiker. Dicho equipamiento proporciona un valor de potencia empleada (o amplitud) en función de la distancia de avance de la broca (profundidad de penetración), con una frecuencia de 1 medida por cada centésima de milímetro. Los perfiles resistográficos fueron tomados en cada árbol considerando la dirección perpendicular a la máxima pendiente en el caso de existir pendiente significativa, o en dirección E-O en el caso de montes llanos, con el objetivo de minimizar el efecto de distintos crecimientos norte-sur o la posible existencia de madera de reacción.

Los perfiles resistográficos obtenidos fueron procesados individualmente para su correcta aplicación en el desarrollo de los modelos de estimación o estimación de densidad. Los perfiles resistográficos tienden a incrementar según penetra la broca en el tronco, debido a la fricción de la broca con la madera. Con el objetivo de eliminar este sesgo en las estimaciones de la densidad de madera se realizó la corrección de base en los perfiles, asumiendo una tendencia lineal, calculando la pendiente entre el punto de inicio y final del perfil. Posteriormente cada punto del perfil fue corregido teniendo en cuenta la posición y el valor de la pendiente (Fundova et al. 2018). Debido a la imposibilidad de obtención de la pendiente de corrección de base en los perfiles incompletos en los que la broca no atravesó el árbol por completo, a estos se les aplicaron valores medios reales obtenidos de otras mediciones. Además de la corrección de base, normalmente se quiere eliminar la parte del perfil correspondiente a la corteza. Una vez realizadas estas correcciones existen diferentes métodos para el análisis de densidades como FWPA ResiProcessor v4.2.3 (https://forestquality.shinyapps.io/Test/) o como la propia herramienta de Rinntech DECOM™. Una de las ventajas de DECOM™ es que posibilita seleccionar diferentes segmentos de un mismo perfil resistáráfico, lo que a su vez permite estimar la densidad media, la densidad de la madera juvenil y la densidad de la madera adulta. Esto es importante para evaluar los métodos de selección temprana en plántulas (e.g., sónicos), ya que están basados en la interpolación entre densidad de madera juvenil y de madera adulta.

Para la elaboración de los modelos de estimación de densidad a partir de los datos resistográficos, CETEMAS segregó por cm de longitud, comenzando por la médula, los datos de perfiles resistográficos y del análisis RX. De cada cm fueron obtenidas las siguientes variables: potencia máxima, mínima y media registradas por el resistógrafo, y densidad máxima, mínima y media obtenidas mediante microdensitometría RX (tabla 2). Fue elaborada la base de datos correspondiente con dichas variables obtenidas para cada uno de los árboles del grupo de calibración para cada especie. Se realizaron los modelos mediante regresión lineal, tras depurar los datos y analizar los outliers. Como resultado la ecuación, se proporcionó el valor del coeficiente de determinación (R2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

## 3.3 Extracción de virutas y análisis NIR

CETEMAS tomó muestras de viruta en cada uno de los árboles, mediante la perforación con taladro eléctrico y broca de 5 mm de diámetro. Las perforaciones fueron realizadas en un punto cercano (<2 cm) a la toma del perfil resistográfico, siguiendo la misma dirección e intentando alcanzar la médula del árbol para abarcar toda la variabilidad del mismo. Las virutas obtenidas fueron almacenadas y adecuadamente etiquetadas en sobres cerrados para su posterior procesado en laboratorio.



Una vez en el laboratorio, las muestras fueron sometidas a un proceso de secado a 35°C durante 24-48h para evitar el desarrollo de hongos, acondicionamiento (condiciones de temperatura y humedad estándar) y de cada una de las muestras se hizo una homogenización y una carga en dos cápsulas portamuestras, seguida de una compresión mediante peso y tiempo controlado (1kg/3min por cápsula). Tras el prensado, la muestra fue inmediatamente escaneada con Lab Spec 5000. Se realizaron 5 disparos por cápsula de muestra (5 subset). Estos cinco disparos de cada subset son promediados obteniendo un espectro promedio para cada una de las cápsulas de muestra cargadas en un rango de longitudes de onda entre 350-2500nm. El programa empleado para la recogida espectral es el IndicoPro Malvern Panalytical Ltd. Una vez tomados los espectros (Figura 2) se realiza un análisis de componentes principales, así como una detección de "outliers". Tras esta operación, se procede al desarrollo de los modelos de calibración mediante la aplicación de los tratamientos espectrales necesarios y el análisis de regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS), el cual construye unos factores, que se seleccionan de tal forma que expliquen el mayor porcentaje de variabilidad, no solo en los datos espectroscópicos, sino también en los de composición química.

Una vez obtenidos los modelos, se aplican una serie de estadísticos espectrales que indican la bondad de los mismos, previamente a su uso en la validación. Los estadísticos RER y RPD permiten considerar estos modelos como aptos para realizar una estimación cuantitativa de la densidad.

- 1- RPD: Desviación típica / SECV. Relaciona la desviación típica de los datos de referencia para la población de validación y el error típico de validación cruzada o de predicción. Este estadístico facilita la comparación de los resultados obtenidos con diferentes colectivos de validación. Se recomiendan valores iguales o mayores a 2,5.
- 2- RER: Rango / SECV. Al igual que el anterior, este estadístico facilita la comparación de los resultados obtenidos con diferentes colectivos de validación. Es la relación entre el intervalo de composición de los datos de referencia para la población de calibración y el error típico de validación cruzada. Se consideran aceptables valores entre 8-10.

## 3.4 Extracción de cores y análisis RX

En la misma zona de extracción de la viruta fue extraído un core de cada árbol mediante barrena de Pressler, lo más cerca posible al perfil resistográfico para calibración y validación obtenido previamente. Los cores fueron etiquetados y almacenados individualmente en recipientes plásticos para conservar la humedad hasta su procesado en laboratorio y evitar así daños y roturas por secado. El análisis de densidad de la madera y la obtención de perfiles de densidad mediante técnicas de microdensitometría de RX requiere de una cuidadosa preparación (Figura 3). Se empleó la sierra de precisión Atelier Fabrication et dÚsinage Mecanique (A.F.U.M.E) adaptado al laboratorio para el corte en sierra de precisión. Una vez acondicionadas las muestras en el laboratorio de microdensitometría de Rayos X, se procedió a su análisis, requiriendo un escaneado inicial óptico previo al escaneado mediante Rayos X con Itrax Multiscanner (Itrax, Cox Analytics, Sweden). Las condiciones de análisis fueron las siguientes: voltaje 30 kv, intensidad 50 mA, tiempo de exposición 75 ms, resolución 20 µm. Por último, las imágenes radiográficas obtenidas mediante microdensitomatría de Rayos X fueron analizadas usando el programa WinDendro (Regent Instruments, Canada) mostrado en la Figura 4.

#### 3.5 Procesado de muestras para análisis de la influencia de la presencia de extractivos

Para llevar a cabo el estudio de la influencia de la presencia de extractivos sobre los modelos de predicción de densidad, se llevó a cabo la determinación de densidad mediante densitometría de Rayos X en las muestras *de P. pinaster* empleadas en la calibración y validación resistográfica y NIR antes y después de ser sometidas al proceso de extracción con etanol durante 12h. Una vez



finalizada la extracción, las muestras se secaron evitando deformaciones y se realizó de nuevo su análisis.

## 3.6 Medición mediante técnicas sónicas en árboles en campo

Se utilizó el equipo sónico ST300. Este consta de dos transductores que se clavan en sentido longitudinal en el fuste a una distancia aproximada de 1m. Golpeando sobre uno de ellos se genera una onda de impacto que es transmitida a lo largo de la fibra de la madera y recogida por el otro transductor, obteniendo así la velocidad de desplazamiento. Se realizan tres series de 8 mediciones y se hace la media. También se empleó una barrena de Pressler para extraer una muestra de madera sobre la que posteriormente se calculó la densidad en verde y la densidad básica en laboratorio por medios gravitométricos. Las barrenas fueron conservadas en húmedo hasta su análisis en laboratorio. Una vez obtenidos estos valores se calculó el módulo de elasticidad dinámico obtenido en base a la velocidad y la densidad de la madera, utilizando la expresión:

### MoEdyn = V<sup>2</sup> x densidad

## 3.7 Medición mediante técnicas sónicas en plántulas

Tras 6 meses de cultivo, las plántulas fueron caracterizadas (Figura 5). Se ha medido la altura, el diámetro en el cuello de raíz, la velocidad de propagación longitudinal de la onda ultrasónica, la densidad básica, y el módulo de elasticidad (aplicando el modelo previamente desarrollado). La altura de las plántulas (H) consideró todo el tallo, sin considerar las hojas en las extremidades. El diámetro (D) se midió en la interfaz con el sustrato (región del cuello de la raíz).

Para determinar la velocidad longitudinal de las ondas ultrasónicas en el tallo de las plántulas del vivero, se delimitó una distancia (L) de 100 cm entre los transductores desde 2 cm por encima del cuello de la raíz, para mantener una relación entre la longitud del desplazamiento y la longitud de onda de aproximadamente 3. Las mediciones se realizaron con equipos de ultrasonido (USLAB, Agricef, Brasil) y transductores de 45 kHz, con puntas puntiagudas diseñadas y producidas por el grupo de investigación de Madera Plus. Para las pruebas, los transductores se colocaron a 45° (prueba indirecta), permitiendo analizar las plántulas de vivero sin destruirlas. La velocidad del pulso ultrasónico que pasó por el tallo de las plántulas (VL) se calculó de acuerdo con el tiempo de propagación de la onda ultrasónica. Posteriormente se aplica el modelo de predicción desarrollado para predecir el módulo de elasticidad tras ensayo a flexión que tendrán los árboles a los 5 años a partir de las mediciones de velocidad y altura de dichas plantas en vivero (Gonçalves et al. 2018).

## 4. Resultados

## 4.1 Modelos de estimación de densidad mediante resistografía

En la figura 6 se muestra el procesado de un perfil resistográfico al que posteriormente se le estimará la densidad. El objetivo futuro es poder comparar diferentes programas para evaluar las diferencias entre ellos. Hasta el momento se han realizado más de 1400 medidas resistográficas que actualmente se encuentran en fase de análisis que valdrán para comparar medidas, así como posteriores análisis fenotípicos. Los modelos de calibración y estimación de densidad (Tablas 3 y 4, Figura 7) muestran una correlación positiva entre resistencia y potencia con un mejor ajuste a una regresión lineal de *P. pinaster* que *P. radiata*.

## 4.2 Modelos de estimación de densidad mediante tecnología NIR

Debido a la poca diversidad en la población de calibración se emplearon muestras pertenecientes a otros proyectos de investigación que presentaban densidades más altas o más



bajas que las del colectivo de calibración del proyecto. La población se incrementa en 115 muestras (cuya información espectral y presentación al equipo NIR es idéntica a las muestras de estudio) dando lugar a una población final de 197 muestras que permiten el desarrollo del modelo (Figura 8). Los modelos seleccionados, se emplearon en la validación (Figura 9) con una población de validación compuesta por 20 muestras del proyecto.

## 4.3 Efecto de la extracción en la determinación de la densidad

Como puede apreciarse en los resultados obtenidos de medición de densidades por microdensitometría de RX para las muestras seleccionadas, la densidad antes de la extracción presenta valores más altos (Tabla 5), considerando un promedio de 11%. La variabilidad en la presencia de resina en las muestras da lugar a variabilidad en los resultados.

## 4.4 Densidad básica y estimación del módulo de elasticidad en árboles en campo

En la Figura 10c podemos observar la estimación del MoE para *P. radiata* a partir de los datos y de la velocidad de desplazamiento de una onda de impacto (Figura 10a) y de densidad básica (Figura 10b). Los resultados muestran diferencias significativas entre las parcelas/ensayos analizados para MoE y densidad básica. Además, se aprecia una variabilidad media (CV=8,5 %) de la densidad básica en los 654 árboles analizados, mientras que el MoE muestra una mayor variabilidad (CV mayor del 20 %) para los mismos árboles.

En las parcelas del País Vasco se extrajo el core completo de médula a corteza, por lo que la medición de densidad básica separada de ambos extremos permitió analizar las diferencias entre madera adulta y juvenil (Figura 11). Se vieron diferencias significativas entre ambas, siendo más densa la madera adulta. Además, existe una correlación significativa positiva moderada entre las densidades de la madera adulta y juvenil (Tabla 6) y alta con la densidad básica global.

Finalmente, se analizaron las correlaciones entre las variables que forman parte de la estimación del MoE (densidad básica, la velocidad de desplazamiento de la onda y el propio MoE) y caracteres de crecimiento (Tabla 7). Se vio que la velocidad de desplazamiento de la onda está positivamente correlacionada con la densidad básica. El módulo dinámico tiene un coeficiente de correlación de 0,74 con la densidad y de 0,92 con la velocidad. Esta correlación de densidad con velocidad y módulo de elasticidad es más elevada que en especies como el *P. pinaster*, que también mostró diferencias significativas entre las dos parcelas analizadas (resultados no mostrados).

## 4.5 Estimación del módulo de elasticidad en plántula

Se observan diferencias significativas entre las familias muestreadas en la velocidad de ultrasonidos a través de la plántula (Figura 12a), así como en el MoE estimado (Figura 12b) a partir del modelo predictivo previamente desarrollado que integra velocidad y altura de la planta (Gonçalves et al. 2018). Se han observado correlaciones significativas entre la velocidad y las variables de crecimiento (Tabla 8), observándose mayor rigidez en las de mayor crecimiento. Existe, además, una alta variabilidad en velocidad de desplazamiento del ultrasonido con un CV=20%.

## 5. Discusión

A lo largo de este trabajo se han desarrollado métodos para la estimación de dos caracteres de calidad de madera: la densidad y el módulo de elasticidad (MoE). Además, se han empleado dichas técnicas para la caracterización de la madera en *Pinus pinaster* y *Pinus radiata*. La estimación de densidad de la madera en árbol por medidas resistográficas tienen la ventaja de ser rápidas y permitir la medida *in situ* en el campo. Sin embargo, existen ciertos parámetros no incluidos como variables



importantes en los modelos con una potencial repercusión en los resultados obtenidos. Entre ellos encontramos el contenido de humedad de la madera y el contenido en resina. Ambos parámetros (los cuales no son sencillos de determinar en árbol en pie) cuentan con gran variabilidad entre individuos y/o momento de la toma de datos, lo cual puede dificultar la estimación de la densidad mediante resistografía. En el presente estudio se han obtenido unas correlaciones con R<sup>2</sup> de 0,7 y 0,61 para P. pinaster y P. radiata respectivamente. A pesar de las variables que influyen en los modelos de estimación, las medidas de resistografía han mostrado ser válidas en la estimación de la densidad de la madera en estudios anteriores (Acuña et al. 2010, Fundova et al. 2018, Isik & Li 2003, Johnstone et al. 2011), aunque la mejora de los modelos desarrollados puede ser hipotéticamente alcanzada mediante la implementación de dichas variables. En el momento de la escritura de este trabajo se han realizado más de 1400 mediciones con resistógrafo en poblaciones a lo largo de la cornisa cantábrica para la estimación de la densidad, cuyos datos se están en proceso de análisis. A pesar de la variedad de métodos de análisis de datos resistográficos que existen, se ha optado por hacer la corrección de manera independiente con el programa R para así poder obtener los valores de las pendientes de corrección de base, de manera que se puedan aplicar datos de corrección reales a perfiles incompletos que no muestran la salida de la broca del tronco del árbol. Una vez realizada la corrección de base, DECOM™ permite la estimación de valores resistográficos seleccionados, de manera que se pueda calcular los valores para madera joven y adulta. Además, se pretende comparar lo que se obtenga en dicho programa con otros como FWPA ResiProcessor v4.2.3.

La espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIR) muestra resultados prometedores cuando se aplica a la determinación de densidad en muestras de viruta de *P. pinaster* tomadas en campo. Los modelos NIRS aplicados a esta especie presentan unos valores para los estadísticos RER y RPD que se consideran aceptables para la determinación de la densidad. Sin embargo, dichos modelos para el colectivo de calibración actual, indican que sería necesario aumentar el colectivo de calibración, no solo en lo que se refiere a variabilidad espectral, sino en cuanto a valores de densidad. Un aumento de la población de calibración permitiría unos modelos más robustos.

El análisis de densidad mediante Rayos X en muestras de *P. pinaster* antes y después de ser sometidas a la extracción de la resina indica que la presencia de la misma da lugar a una sobrestimación de la densidad promedio de un 11%, dándose porcentajes más altos y más bajos en función del contenido en resina de las muestras. Este parámetro es altamente variable, no solo de individuo a individuo (de una muestra a otra), sino dentro del mismo individuo (dentro de la misma muestra).

En cuanto a los resultados de ultrasonidos para la estimación en plántula de vivero, podrían considerarse como la primera caracterización de los árboles superiores seleccionados a partir de una evaluación temprana en vivero de las progenies. En principio el ranking de familias en rigidez de madera sobre la planta de vivero no coincide con el ranking por módulo de elasticidad de las madres. Teniendo en cuenta la influencia demostrada de parámetros de crecimiento y calidad de estación en las propiedades tecnológicas de la madera se debería considerar esta primera caracterización como caracterización temprana a la espera de resultados sobre otros ensayos de progenie con árboles de más edad.

#### 6. Conclusiones

Mediante el presente estudio se han caracterizado diferentes métodos que permitan la estimación de caracteres de calidad de la madera como la densidad. En primer lugar, se han desarrollado modelos de estimación de la densidad de madera de árbol en pie con datos resistográficos para las especies *P. pinaster* y *P. radiata* que alertan de la potencial afectación a las medidas finales de factores como humedad y resina en la madera, aunque permiten margen de mejora. Por otro lado, la tecnología NIR parece ser prometedora en su uso para la estimación de la



densidad de madera con unas tasas de error aceptables. Sin embargo, el aumento del colectivo de calibración, tanto en cuanto a variabilidad espectral, como a valores de densidad, permitirían unos resultados más robustos. En tercer lugar, las substancias presentes en la madera tales como la resina provocan la sobrestimación de la densidad de la madera. Finalmente, los resultados de tecnología sónica en pino radiata de campo parecen mostrar un gran potencial a la hora de estimar el módulo de elasticidad (MoE). El uso de tecnologías sónicas para la estimación del módulo de elasticidad en plántulas de vivero presenta correlaciones con caracteres de crecimiento (altura y diámetro) pero se debería considerar la medición en árboles de mayor edad para una mayor fiabilidad. Los resultados presentes en este estudio muestran que las técnicas exploradas podrían ser en el futuro alternativas viables no invasoras para la medición de caracteres de calidad de madera.

# 7. Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado parcialmente por el Grupo Operativo GENMAC del Grupo Tragsa (<u>https://www.tragsa.es/</u>). Asimismo, M. Hurtado agradece la concesión de una beca de doctorado al organismo de Desarrollo Económico e Infraestructuras del Gobierno Vasco.

## 8. Bibliografía

ACUÑA, L.; BASTERRA, L.A.; CASADO, M.; LÓPEZ, G.; RAMÓN-CUETO, G.; RELEA, E.; MARTÍNEZ, C.; GONZÁLEZ, A.; 2010. Aplicación del resistógrafo a la obtención de la densidad y la diferenciación de especies de madera. Materiales de Construcción. 61 (303) 451-464.

ALVES, A.; SANTOS, A.; ROZENBERG, P.; PÂQUES, L.; CHARPENTIER, J.P.; SCHWANNINGER, RODRIGUES, J.; 2012. A common near infrared—based partial least squares regression model for the prediction of wood density of Pinus pinaster and Larix 3 eurolepis. Wood Sci Technol 46 157–175.

FUNDOVA, I.; FUNDA, T.; WU, H.; 2018. Non-destructive wood density assessment of Scots pine (Pinus sylvestris L.) using Resistograph and Pilodyn. PLoS ONE 13(9)

GAPARE, W.J.; BALTUNIS, B.S.; IVKOVIC, M.; WU, H.J.; 2009. Genetic correlations among juvenile wood quality and growth traits and implications for selection strategy in Pinus radiata D. Don. Ann. For. Sci. 66, 606

GONÇALVES, R.; LORENSANI, R.; MERLO, E.; SANTACLARA, O.; TOUZA, M.; GUAITA, M.; LARIO, F.J.; 2018. Modeling of wood properties from parameters obtained in nursery seedlings. Canadian Journal of Forest Research 48(1)

ISIK F.; LI B.; 2003. Rapid assessment of wood density of live trees using IML Resi for selection in tree improvement programs. Canadian Journal of Forest Research. 33 2426–2435

JOHNSTONE, D.M.; ADES, P.; SMITH, I.; 2011. Using an IML-Resi drill to assess wood density in Eucalyptus globulus subsp. Pseudoglobulus. Australian Forestry Vol. 74(3) 190–196

LINDSTRÖM, H.; HARRIS, P.; NAKADA, R.; 2002. Methods for measuring stiffness of young trees. European Journal of Wood and Wood Products 60(3) 165-174



SHENK, J.S.; WESTERHAUS, M.O.; 1995 Analysis of agricultural and Food products by near infrared reflectance spectroscopy. Monograph. NIRSystems Inc., Silver Spring, MD, USA.

VIKRAM, V.; CHERRY, M.L.; BRIGGS, D.G.; CRESS, D.W.; EVANS, R.; HOWE, G.T.; Stiffness of Douglas-fir lumber: effects of wood properties and genetics. Canadian Journal of Forest Research 41(6) 1160-1173

WU, H.X.; POWELL, M.B, YANG, J.L.; IVKOVIC, M.; MCRAE, T.A.; 2007. Efficiency of early selection for rotation-aged wood quality traits in radiata pine. Ann. For. Sci. 64(1) 1-9.



Experimento	Especie	Muestras		
		Calibración Validad		<u>ón</u>
1-Calibración y validación	P. pinaster	-Gomesende (Orense) -Gomesende n=50 n=61		Orense)
resistográfica		<u>Calibración</u>	Validacio	ón
2-Calibración y validación NIR	P. radiata	-Benade (Lugo) n=25	-Benade (Lug	o) n=43
		-Zekutze (Vizcaya) n=25	-Zekutze (Vizca	ya) n=19
	P. pinaster	-2 ensayos genéticos Galicia (solo MoE)		n=945
		-2 ensayos genéticos Galicia		
3-Estimación MoE por técnicas		-2 ensayos genético		
sónicas		-12 plantaciones fore	stales del País	
(árboles en campo)		Vasco		n=+650
4-Estimación densidad por resistógrafo	P. radiata	<ul> <li>-1 plantación de País Vasco resistente a Fusarium circinatum</li> <li>-38 plantaciones forestales norte de España (solo resistógrafo)</li> </ul>		
				n=760
5-Estimación MoE por técnicas sónicas en plántulas	P. pinaster	1 ensayo de progenies cultivado en vivero (9 familias		n=260

Tabla 1. Descripción de las muestras empleadas en los experimentos

Tabla 2. Descripción de variables empleadas en el desarrollo de los modelos de estimación de densidad mediante resistografía.

Variable	Unidades	Descripción			
d	cm	Distancia desde la médula del árbol			
A	%	Porcentaje de potencia consumida por resistógrafo (amplitud)			
	(kg/m³)	Densidad de la madera			
A <sub>max_i</sub>	%	Potencia máxima registrada en cada centímetro del perfil			
A <sub>min_i</sub>	%	Potencia mínima registrada en cada centímetro del perfil			
A <sub>mean_i</sub>	%	Potencia media en cada centímetro del perfil			
🗆 max_i	(kg/m³)	Densidad máxima registrada en cada centímetro del perfil			
min_i	(kg/m <sup>3</sup> )	Densidad mínima registrada en cada centímetro del perfil			
🗆 mean_i	(kg/m³)	Densidad media en cada centímetro del perfil			



Tabla 3. Modelo de estimación de densidad (□) a partir de resistografía (potencia o amplitud, A) obtenido a partir del grupo de calibración.

Especie	Modelo	R <sup>2</sup>	RMSE	
Pinus pinaster	🔲 = 81,70A - 523,01 (kg/m³)	0,70	191,96	28,74 %
Pinus radiata	□ = 45,50A - 26,12 (kg/m³)	0,61	160,51	25,71 %

#### Tabla 4. Resumen de los resultados de la validación de los modelos de estimación de densidad

n	Especie	Densidad media (kg/m³)	Error máximo (%)	Error mínimo (%)	Error medio (%)	Error absoluto medio (%)
61	Pinus pinaster	569,99	23,81	-25,79	3,5	12,56
61	Pinus radiata	539,82	33,10	-26,48	5,6	13,29

#### Tabla 5. Efecto de la extracción en la determinación de la densidad.

Muestras	Variable	Densidad con extracción (g/cm³)	Densidad sin extracción (g/cm³)	Dif D Extraída – D Sin Extraer	% Diferencia
PG84SR	D ponderada	0,4571	0,5666	-0,1095	-24
PG118SR	D ponderada	0,4650	0,5520	-0,0869	-19
PG70	D ponderada	0,4616	0,5026	-0,0410	-9
PG51	D ponderada	0,5994	0,6391	-0,0397	-7
PG66SR	D ponderada	0,4641	0,4691	-0,0050	-1
PG140SR	D ponderada	0,6001	0,6060	-0,0058	-1
PG99SR	D ponderada	0,5976	0,6926	-0,0950	-16
PG74	D ponderada	0,4736	0,4982	-0,0246	-5
PG107	D ponderada	0,7020	0,7230	-0,0211	-3
PG8SR	D ponderada	0,4461	0,5729	-0,1268	-28
PG126SR	D ponderada	0,5232	0,6592	-0,1361	-26
PG23SR	D ponderada	0,6673	0,7065	-0,0392	-6
PG242SR	D ponderada	0,5205	0,5537	-0,0332	-6
PG207SR	D ponderada	0,5569	0,5878	-0,0309	-6
	-11				
Mínimo					1%
	28%				



Tabla 6. Correlaciones entre la madera adulta y juvenil en Pinus radiata.

Correlaciones	DB adulta	DB juvenil	DB global
DB adulta		0,5053	0,8319
(tamaño de la muestra)		(172)	(172)
[Valor P]		[0,0000]*	[0,0000]*
DB juvenil			0,8992
(tamaño de la muestra)			(172)
[Valor P]			[0,0000]*
DB global			
(tamaño de la muestra)			
[Valor P]			

Tabla 7. Correlaciones entre la densidad básica, velocidad de desplazamiento de la onda y MoE y entre estas y las variab	bles
de crecimiento en Pinus radiata.	

Correlaciones	DB	V	MoE	Edad	Diámetro	Altura
DB		0,4451	0,7446	0,4079	0,4739	0,5315
(tamaño de la muestra)		(73)	(73)	(73)	(73)	(73)
[Valor P]		[0,0001]*	[0,0000]*	[0,0003]*	[0,0000]*	[0,0000]*
V			0.9252	0.0941	0.0080	0.2861
(tamaño de la muestra)			(73)	(73)	(73)	(73)
[Valor P]			[0,0000]*	[0,4286]	[0,9467]	[0,0141]*
MoE				0 2335	0 1894	0.4258
(tamaño de la muestra)				(73)	(73)	(73)
[Valor P]				[0,0468]*	[0,1085]	[0,0002]*

Tabla 8. Correlaciones entre la velocidad de la onda de ultrasonidos en planta y las variables de crecimiento en Pinus

	pinaster.		
Correlaciones	Altura	Diámetro	Vmedia10
Altura		0,5428	0,7993
(tamaño de la muestra)		(255)	(255)
[Valor P]		[0,0000]*	[0,0000]*
Diámetro			0,4162
(tamaño de la muestra)			(255)
[Valor P]			[0,0000]*
Vmedia10			
(tamaño de la muestra)			
[Valor P]			





Figura 1. Localizaciones de las plantaciones medidas mediante resistografía para la estimación de densidad.



Figura 2. Ejemplo de espectros obtenidos para muestras del proyecto





Figura 3. Procesado de los cores en laboratorio para análisis por microdensitometría por RX.



Figura 4. Formato de resultados del programa WinDendro. Perfil radiográfico analizado junto con el perfil óptico (a) y tabla de resultados (b).





Figura 5. Proceso de medición del módulo de elasticidad en plántulas. Se muestran las plántulas sobre las que se ha llevado a cabo el proceso (a), medición (b), medición con equipo de ultrasonidos USLAB (c) e inserción de transductores en planta (d).





Figura 6. Procesado de perfiles resistográficos. Se muestran el perfil crudo (a), comparativa de la corrección de base en verde y perfil crudo rojo (b), perfil corregido antes de eliminar la corteza señalada en rojo y perfil final corregido y sin corteza (d).



Figura 7. Gráficos de regresión lineal del modelo de estimación de densidad a partir de datos resistográficos para P. pinaster (a) y P. radiata (b).







Figura 8. Resultado del modelo de estimación de densidad desarrollado mediante tecnología NIR.





Figura 9. Validación de los modelos de estimación de densidad mediante tecnología NIR para diferentes tratamientos matemáticos.





Figura 10. Mediciones de velocidad de onda de impacto (a) y densidad básica (b) para la estimación del MoE (c) en Pinus radiata.





Figura 11. Mediciones de densidad básica en las partes externas o madera adulta (a) e internas o madera juvenil (b) del core.



Figura 12. Mediciones de velocidad de ultrasonidos (a) necesarios para la estimación del módulo de elasticidad (b) a partir del modelo predictivo previamente desarrollado (Gonçalves et al. 2018).

