

TRABAJO DE FIN DE GRADO

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

TUTORES: LUIS ALFONSO BASTERRA OTERO

ROBERTO DIEGO MARTÍNEZ LÓPEZ

JOSÉ ANTONIO BALMORI ROIZ

JULIO 2019. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MADERA MEDIANTE TÉCNICAS PSEUDO-NO DESTRUCTIVAS

MARÍA ÁLVAREZ GARCÍA



Universidad de Valladolid



ETSAVA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

Resumen

Este trabajo de fin de grado se centra en obtener la densidad de la madera puesta en obra mediante varios tipos de **ensayos pseudo-no destructivos**, concretamente cuatro: el **penetrómetro**, el **arranque de tornillos**, el **extractor de virutas** y el **resistógrafo**, utilizados habitualmente por el Grupo de Investigación en Estructuras y Tecnología de la Madera de la Universidad de Valladolid para la estimación de la **densidad de la madera** y de esta manera poder ser utilizado en inspecciones técnicas de edificios patrimoniales.

El objetivo principal es hallar los modelos de regresión propios de cada uno de ellos, y compararlos entre sí, con el método normalizado de obtención de la densidad, para conocer su nivel de fiabilidad.

Para ello, se realizaron ensayos en probetas de seis especies diferentes de madera: paulownia, chopo, pino radiata, pino silvestre, roble y elondo. Todas ellas de densidades variadas, para comprobar cómo se comportan los equipos frente a cada una de ellas.

Como conclusión principal se obtuvo que existe una relación estadísticamente significativa entre los valores estimados mediante los diferentes ensayos pseudo-no destructivos y la densidad real de las piezas de madera.

Palabras clave:

Madera, Ensayos pseudo-no destructivos, penetrómetro, arranque de tornillo, extractor de virutas, resistógrafo, densidad

Abstract

This final undergraduate project focuses on obtaining the density of wood put into work through various types of **pseudo-non destructive techniques; penetration depth, screw withdrawal, wood extractor** and **resistograph**, commonly used by the Wood Structures and Technology Group of the University of Valladolid to estimate **wood density** and this be used in technical inspections of buildings assets.

The final objective is to find the regression models specific to each of them, and to compare them with each other with the standard method of obtaining the density, in order to know their level of reliability.

For this purpose, some tests have been carried out on test pieces of six different wood species; paulownia, poplar, radiata pine, scots pine, oak and elondo. All of them have different densities with the aim of checking how the equipment behaves in front of each of them.

The main conclusion was that there is a statistically significant relationship between the values estimated by the different pseudo-non destructive techniques and the real density of wood pieces.

Keywords:

Wood, non-destructive technique, penetration depth, screw withdrawal, wood extractor, resistograph, density

Índice:

RESUMEN	2
ABSTRACT	2
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS	8
3. ANTECEDENTES	9
3.1 MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS Y PSEUDO-NO DESTRUCTIVOS	9
3.2 MÉTODOS PSEUDO-NO DESTRUCTIVOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD	9
4. JUSTIFICACIÓN	14
5. MATERIALES Y EQUIPOS	15
5.1 EQUIPOS DE LABORATORIO	15
5.2 MATERIAL FUNGIBLE	17
5.3 UTILLAJE	18
5.4 MATERIAL DE ENSAYO	19
6. METODOLOGÍA	20
6.1 OBTENCIÓN DE LA DENSIDAD NORMALIZADA	20
6.2 MÉTODO GENERAL.	20
6.3 MÉTODOS ESTIMATIVOS	21
6.3.1. FASE PREVIA	22
6.3.2. MÉTODO DE ARRANQUE DE TORNILLO (MAT)	23
6.3.3. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE UNA VARILLA (PILODYN)	24
6.3.4. ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD MEDIANTE EL EXTRACTOR DE VIRUTAS	24
6.3.5. ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD MEDIANTE EL RESISTÓGRAFO	25
6.4 MÉTODOS ESTADÍSTICOS	26
7. RESULTADOS	28
7.1 HUMEDAD DE LAS PROBETAS TESTIGO	28
7.2 DENSIDADES DE LAS PROBETAS POR ESPECIE SEGÚN NORMA ISO/FDIS 13061-2:2014	29
7.3 ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN 5 ESPECIES CON EL MÉTODO DE ARRANQUE DE TORNILLO	32
7.4 ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN 5 ESPECIES CON EL PENETRÓMETRO	36
7.5 ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN 5 ESPECIES CON EL EXTRACTOR DE VIRUTAS	40
7.6 ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN 5 ESPECIES CON EL RESISTÓGRAFO	44
7.7 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS OBTENIDOS	49
8. CONCLUSIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	52
ANEXOS	53
ANEXO I. LEYENDA DE TABLAS DE DATOS	53
ANEXO II. TABLA DE DATOS DE DIMENSIONAMIENTO Y PESADO DE LAS PROBETAS	54
ANEXO III. TABLA RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	56

Índice de figuras

Figura Portada. "Fossil on paper". Pejac	
Figura 1. Grabado alegórico de la cabaña de Vitruvio. Marc Antoine Laugier 1755	7
Figura 2. Dispositivo de arranque de tornillo	10
Figura 3. Penetrómetro.	11
Figura 4. Aparato de extracción de virutas.	12
Figura 5. Resistograma de madera de Pino Silvestre	13
Figura 6. Calibre analógico.	15
Figura 7. Izquierda: Báscula GIBERTINI. Derecha: Báscula AccuWeight.	15
Figura 8. Sistema de fotografiado estereoscópico.	16
Figura 9. Resistógrafo.	17
Figura 10. Soporte de trabajo.	18
Figura 11. Ubicación de los ensayos.	23
Figura 12. Puesto de trabajo del ensayo de arranque de tornillos.	24
Figura 13. Diagrama de cajas y bigotes comparando la densidad de las probetas de las diferentes especies.	29
Figura 14. Comparación de la densidad media publicada y la densidad real obtenida.	30
Figura 15. Gráfico de comparación de las densidades medias de las diferentes especies.	30
Figura 16. Diagrama de medias de la resistencia al arranque de tornillo y la dirección del ensayo.	33
Figura 17. Diagrama de Cajas y Bigotes comparando MAT media (kN) para cada una de las especies.	33
Figura 18. Gráfico del modelo de regresión lineal de densidad según MAT media.	34
Figura 19. A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para MATm; B: Gráfico de residuos de la regresión lineal del modelo para MATm.	35
Figura 20. Diagrama de medias de la resistencia a penetración y la dirección del ensayo.	37
Figura 21. Diagrama de Cajas y Bigotes comparando PN media (mm) para cada una de las especies.	38
Figura 22. Gráfico del modelo de regresión lineal de la densidad según PN media.	38
Figura 23. A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PN media; B: Gráfico de residuos de la regresión lineal del modelo para PN media.	39
Figura 24. Diagrama de medias del peso del filtro lleno de virutas y la dirección del ensayo.	41
Figura 25. Diagrama de Cajas y Bigotes comparando PV media (g) para cada una de las especies.	41
Figura 26. Gráfico del modelo de regresión lineal de la densidad según PV media.	42
Figura 27. A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PV media; B: Gráfico de residuos de la regresión lineal del modelo para PV media.	43
Figura 28. Diagrama de medias de la energía necesaria para la penetración de la aguja y la dirección del ensayo.	45
Figura 29. Diagrama de Cajas y Bigotes comparando RESIS media (rel) para cada una de las especies.	45
Figura 30. Gráfico del modelo de regresión lineal de la densidad según RESIS media.	46
Figura 31. A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para RESIS media; B: Gráfico de residuos de la regresión lineal del modelo para RESIS media.	47
Figura 32. Comparación del estado de la aguja.	47
Figura 33. Comparación de la densidad real obtenida según ISO/FDIS 13061-2:2014 con la densidad estimada mediante los diferentes equipos en cada una de las especies	50
Figura contraportada. "Línea". Pejac	

Índice de tablas

Tabla 1. Probetas utilizadas para la estimación de la densidad de 6 especies (Guindeo, et al. 1997).	19
Tabla 2. Etapas de perforación en el método de extracción de virutas (Martínez López, 2016).	25
Tabla 3. Número de proyecto según especie.	25
Tabla 4. Cálculo del contenido de humedad (%) de una probeta por especie.	28
Tabla 5. Resumen estadístico para la densidad, por especies, según ISO/FDIS 13061-2:2014.	29
Tabla 6. Prueba de múltiples rangos para densidad de las probetas por especie.	31
Tabla 7. Valores medios y coeficientes de variación de la resistencia al arranque de tornillos (MAT) en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas.	32
Tabla 8. Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para la resistencia al arranque de tonillos en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas (95%; P-valor>0,05 – Normal).	32
Tabla 9. Pruebas de Múltiples Rangos para MAT media por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD.	33
Tabla 10. Valores medios y coeficientes de variación de la resistencia a penetración (PN) en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas.	36
Tabla 11. Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para la resistencia al arranque de tonillos en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas (95%; P-valor>0,05 – Normal).	36
Tabla 12. Pruebas de Múltiples Rangos para PN media por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD.	37
Tabla 13. Valores medios y coeficientes de variación del peso del filtro lleno de virutas (PV) en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas.	40
Tabla 14. Prueba de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para el peso del filtro con las virutas en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas (95%; P-valor>0,05 - Normal).	40
Tabla 15. Pruebas de Múltiples Rangos para PV media por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD.	41
Tabla 16. Valores medios de la energía necesaria para la penetración de la aguja (RESIS) en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas.	44
Tabla 17. Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para la energía necesaria en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas (95%; P-valor>0,05 - Normal).	44
Tabla 18. Pruebas de Múltiples Rangos para RESIS media por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD. ...	45
Tabla 19. Fotografías de la aguja del resistógrafo conforme se iban realizando los ensayos.	48
Tabla 20. Comparación de los diferentes métodos y modelos de estimación de densidad obtenidos en el conjunto de las 5 especies.	49

Índice de abreviaturas

δ_w / δ : la densidad de una pieza de madera con un contenido de humedad w (kg/m^3).

m_w / Mx : la masa de una pieza de madera con un contenido de humedad w (kg).

V_w / Vx : el volumen de una pieza de madera con un contenido de humedad w (m^3).

l_w : longitud de una probeta con un contenido de humedad w (m).

b_w : Ancho de una probeta con un contenido de humedad w (m).

a_w : Espesor de una probeta con un contenido de humedad w (m).

$\text{MAT}_R/\text{MAT}_{\text{radial}}$: fuerza necesaria para arrancar el tornillo en la dirección radial (kN).

$\text{MAT}_T/\text{MAT}_{\text{tangencial}}$: fuerza necesaria para arrancar el tornillo en la dirección tangencial (kN).

$\text{MAT}_M/\text{MAT}_{\text{media}}$: fuerza media entre las dos direcciones (kN).

$\text{PN}_R/\text{PN}_{\text{radial}}$: penetración de la varilla en la dirección radial (mm).

$\text{PN}_T/\text{PN}_{\text{tangencial}}$: penetración de la varilla en la dirección tangencial (mm).

$\text{PN}_M/\text{PN}_{\text{media}}$: penetración media de la varilla en las dos direcciones (mm).

$\text{PV}_R/\text{PV}_{\text{radial}}$: peso de las virutas extraídas en la dirección radial (g).

$\text{PV}_T/\text{PV}_{\text{tangencial}}$: peso de las virutas extraídas en la dirección tangencial (g).

$\text{PV}_M/\text{PV}_{\text{media}}$: peso medio de las virutas en las dos direcciones (g).

Resis. R: energía necesaria para la penetración de la aguja en la dirección radial (rel).

Resis. T: energía necesaria para la penetración de la aguja en la dirección tangencial (rel).

Resis media: energía media necesaria para la penetración de la aguja entre ambas direcciones (rel).

1. Introducción

La construcción con madera es una de las técnicas más antiguas que conocemos. Incluso antes de existir las herramientas necesarias, ha formado parte de nuestros primeros refugios. Uno de los tratados de la arquitectura que conocemos fue “De architectura”, que escribió Marco Vitruvio, donde ya aparecían algunas breves descripciones de las cualidades y los usos de la madera:

«Por tanto, con ocasión del fuego surgieron entre los hombres las reuniones, las asambleas y la vida en común, que cada vez se fueron viendo más concurridas en un mismo lugar; (...) comenzaron unos a procurarse techados utilizando ramas y otros a cavar grutas bajo los montes, y algunos a hacer, imitando los nidos de las golondrinas con barro y ramas, recintos donde poder guarecerse. Luego, otros, observando los techos de sus vecinos y añadiéndoles ideas nuevas, fueron de día en día mejorando los tipos de sus chozas. (...) Al principio plantaron horcones, y entrelazándolos con ramas levantaron paredes que cubrieron con barro; otros edificaron, con terrones y céspedes secos, sobre los que colocaron maderos cruzados, cubriendo todo ello con cañas y ramas secas para resguardarse de las lluvias y del calor» (Vitruvio, 15 a. C.)



Figura 1. Grabado alegórico de la cabaña de Vitruvio. Marc Antoine Laugier 1755.

Gracias a ella ha sido posible la ejecución de la mayoría de los edificios históricos que conocemos. Su permanencia en la actualidad, de forma básicamente inalterada, nos demuestra su eficacia. Además de ser el único material biológico que se emplea en la construcción, se obtiene de la naturaleza, por lo que puede ser un recurso renovable si se mantiene una adecuada gestión sostenible de los bosques.

Madera como material de construcción

La madera ha sido un material muy utilizado en la construcción desde siempre, por sus grandes prestaciones y características, además de su belleza estética, aspecto importante para los arquitectos.

Antes de intervenir en un edificio que tiene una estructura de entramado de madera conviene tener unos conocimientos previos sobre aquellos aspectos que pueden influir en la aparición de problemas. Algunos de estos aspectos son: los componentes básicos de la madera, los defectos locales que se producen en algunas piezas, la humedad y la temperatura a la que algunos de los elementos están sometidos.

Dos de las características que se tienen en cuenta cuando se realiza una construcción con este material, ya que estas van asociadas con las características constructivas del mismo, son la densidad y la especie. Por eso, conocer la densidad de una madera en obra es importante para realizar una evaluación completa de toda la estructura.

2. Objetivos

El objeto de este trabajo se centra en el estudio de los datos obtenidos, mediante la utilización de cuatro equipos de laboratorio para el desarrollo de ensayos pseudo-no destructivos, para poder estimar la densidad de la madera.

Objetivos principales:

- Realizar un estudio comparativo de los diferentes métodos para la estimación de la densidad a través de los valores obtenidos en el laboratorio.
- Obtener los modelos de regresión lineal que relacionen los valores obtenidos en los ensayos con la densidad, permitiendo de esta manera estimarla en obra.

Como objetivo secundario se busca obtener el umbral de valores sobre los que se pueden realizar los ensayos.

3. Antecedentes

La investigación científica en España para la determinación de las propiedades físico-mecánicas de la madera comenzó alrededor de 1960, centrada en probetas libres de defectos. A mediados de los años 80 se empezaron a utilizar piezas de tamaño estructural (Fernández Llana, 2016).

A partir de entonces se han desarrollado muchos estudios en diversos países, para averiguar las propiedades resistentes de edificios construidos.

La evaluación de una estructura, en general, se puede centrar inicialmente en la observación visual, para detectar los primeros fallos, pero suele ser necesario la utilización de otros medios complementarios, que proporcionen datos adicionales objetivos. La madera puede presentar patologías estructurales por causa de agentes bióticos, como es el hongo de pudrición, la termita, la polilla, la carcoma, etc. O por otras causas como la radiación solar, la acción del agua, incendios, sobrecargas, cambios de uso, etc.

3.1 Métodos no destructivos y pseudo-no destructivos

Se denomina ensayo no destructivo a cualquier tipo de prueba realizada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo en la muestra examinada (Íñiguez González, 2007).

Los ensayos pseudo-no destructivos serían aquellos cuya alteración puede considerarse despreciable en comparación con la información suministrada.

Tales métodos de ensayo se pueden clasificar en dos grupos: ensayos globales y ensayos puntuales. Los ensayos globales son aquellos que evalúan el comportamiento de la pieza en su totalidad. En cambio, los métodos puntuales solo obtienen resultados de la zona ensayada. Estos últimos, tienen un papel importante como soporte a las inspecciones visuales (Martínez López, 2016).

3.2 Métodos pseudo-no destructivos para la estimación de la densidad

Los métodos de ensayo pseudo-no destructivos disponibles para estimar la densidad se pueden clasificar en las dos categorías referidas: global y local. La obtención de la densidad global se limita a dimensionar y pesar las piezas (Norma ISO/FDIS 13061-2:2014). Sin embargo, para la estimación de la densidad local existen varios métodos físicos y mecánicos (Martínez López, 2016).

Los métodos mecánicos de estimación de la densidad nos brindan valores puntuales. Sin embargo, la densidad de la madera puede tener una importante variabilidad intraespecífica, por lo que es recomendable realizar múltiples ensayos a lo largo de su longitud con el fin de obtener valores más representativos (Bobadilla, *et al.* 2007).

A continuación, se van a describir los métodos pseudo-no destructivos utilizados en este estudio.

- **Método de arranque de tornillo (MAT)**

Este método se basa en la medición de la fuerza utilizada para conseguir arrancar un tornillo, previamente introducido en una pieza de madera (Casado *et al.* 2005) (Casado *et al.* 2006) (Basterra *et al.* 2009).

Se puede considerar un método pseudo-no destructivo (Figura 2), ya que como resultado de este se produce un orificio pequeño (3 - 6 mm), en función del diámetro del tornillo y una posible rotura de las fibras, debido al esfuerzo de tracción.

Previamente a la realización del ensayo hay tres variables que es necesario establecer: la elección del tornillo (diámetro, tipo de punta y rosca), la profundidad de penetración del tornillo y la velocidad de extracción o de giro de las palancas (Martínez López, 2016). Según Basterra *et al.* (2006) cuando se trabaje en obra, es conveniente fijar las zonas donde debe realizarse la medición y el número de extracciones por muestra.



Figura 2. Dispositivo de arranque de tornillos.

Los ensayos con este aparato se realizan sobre todo en maderas de densidad baja o media, ya que, para densidades altas, la fuerza que necesita realizar el operario es tan alta, que puede dar lugar a error. En estudios realizados sobre madera de coníferas, diferentes autores han relacionado la fuerza de extracción media del tornillo con la densidad. Los coeficientes de determinación obtenidos son de 0,52 (Bobadilla, *et al.* 2007), 0,53 (Martínez López, 2016) y 0,64 (Íñiguez González, 2007). Estos autores demostraron, además, que no existían diferencias estadísticamente significativas entre los valores de los ensayos en dirección radial y tangencial.

- **Penetrómetro – Pilodyn**

Este equipo dispara una aguja a una energía constante de 6 Julios y, a partir de su penetración, que está relacionada con la dureza superficial, es posible estimar su densidad (Hoffmeyer, 1978).

Se le puede considerar pseudo-no destructivo ya que únicamente deja un pequeño orificio de 2,5 mm en la pieza y una profundidad que no llega a los 25 mm, en función de la resistencia de la madera.

No necesita fijar ninguna variable previa, porque cuenta con un mecanismo bastante simple (Figura 3). Tras cargar el aparato con la baqueta, y colocarlo en posición perpendicular a la cara donde vamos a ensayar, se realiza el disparo de la aguja. A continuación, extraemos el dato del grado de penetración de esta, que luego analizaremos.

Las dimensiones de la aguja son 2,50 mm de diámetro y 60,20 mm de longitud. Esta se cambia aproximadamente cada 5.000 disparos.



Figura 3. Penetrómetro.

En ensayos realizados sobre la estimación de la densidad de madera aserrada de coníferas se obtuvieron los coeficientes de determinación de 0,56 (Martínez López, 2016) y 0,59 (Íñiguez González, 2007), utilizando la media aritmética de los valores de penetración obtenidos en ambas direcciones. En estos estudios se demostró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de penetración en dirección radial y tangencial.

- **Método de extracción de virutas**

El método de extracción de virutas (Figura 4) se basa en la estimación de la densidad de la pieza mediante el análisis de las virutas extraídas en la perforación. Este dispositivo está diseñado para acoplarse a un taladro eléctrico convencional.

Para su uso se ha de fijar un diámetro de broca y la profundidad del taladrado, estableciendo un mismo volumen para todas las piezas a ensayar. Se le puede considerar un método no destructivo ya que deja en la madera un orificio de $\varnothing 8 \times 47$ mm.



Figura 4. Aparato de extracción de virutas.

El dispositivo se acopla al taladro y permite recoger, en un filtro de papel, todas las virutas que se producen durante el taladrado. Además, este dispositivo nos permite, a través de la observación de las virutas extraídas, detectar patologías de origen biótico.

Martínez López (2016) obtuvo un coeficiente de determinación de 0,97 utilizando en su investigación el extractor eléctrico y realizando el estudio en 10 especies con densidades diferentes.

- **Resistografía**

El ensayo mediante el resistógrafo mide la energía necesaria para la penetración de la broca en la pieza de madera a una velocidad constante de 20 mm/s (Figura 5). Es una técnica bastante precisa y de rápida ejecución, aunque requiere de un aparato de coste elevado. Es un método pseudo-no destructivo ya que ocasiona un orificio de 2 – 3 mm de diámetro que atraviesa la pieza.

VARIABLES QUE INFLUYEN EN LOS RESULTADOS SEGÚN KLOPPENBURG (2018):

- Geometría de la broca y el tipo de afilado: estas características están relacionadas con las dimensiones de la broca. Según se van produciendo ensayos la broca se va deteriorando.
- Velocidad de penetración.
- Velocidad de rotación.

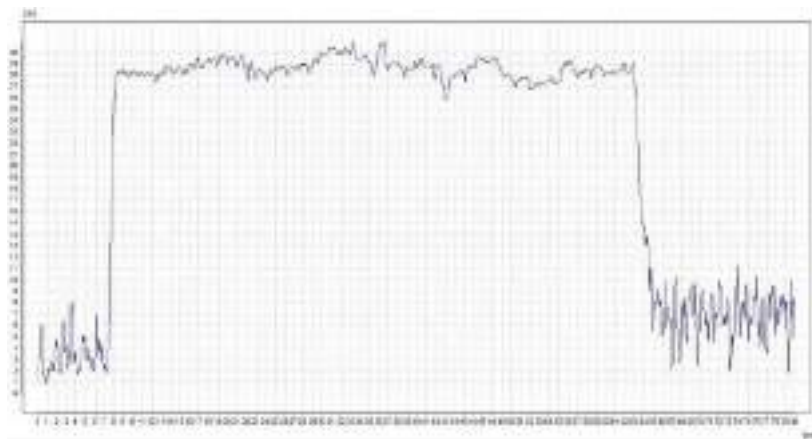


Figura 5. Resistograma de madera de Pino Silvestre

Una de las variables del material que intervienen en la resistencia es la dirección de perforación relativa a la fibra, en la que no se ha encontrado una influencia significativa (Kloppenburg, 2018).

Es un método ampliamente utilizado en inspección de estructuras existentes y sobre el que se han llevado a cabo numerosas investigaciones obteniendo unos coeficientes de determinación del 0,82 para un conjunto de tres especies de coníferas y tres de frondosas (Acuña *et al.* 2011), 0,94 (Rinn, 2012) y 0,95 (Kloppenburg, 2018) para la especie tropical del Meranti.

4. Justificación

El grupo de investigación en Estructuras y Tecnología de la Madera de la Universidad de Valladolid es un equipo multidisciplinar en el que participan los Departamentos de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Estructuras, con sede en la E.T.S. de Arquitectura de Valladolid, y el de Ingeniería Agrícola y Agroforestal, ubicado en la E.T.S. de Ingenierías Agrarias de Palencia.

Su trabajo se centra en el diagnóstico, conservación y restauración de estructuras de madera existentes, orientándose a facilitar la toma de decisiones con criterios técnicos solventes sobre base científica.

Una de sus líneas de investigación es el desarrollo de una metodología para la evaluación del estado de los elementos estructurales de madera en el patrimonio histórico cultural español. Para ello, una de las principales características de la estructura es determinar la densidad de las piezas que la componen.

Como objeto de este trabajo, se propone obtener las ecuaciones de regresión para estimar la densidad mediante los equipos con los que cuenta el grupo de investigación, y relacionar cada valor obtenido de los mismos entre sí y con la densidad real obtenida en laboratorio mediante métodos normalizados.

Como se ha explicado en el apartado anterior, la relación entre las mediciones obtenidas con los métodos pseudo-no destructivos es lineal. Por lo tanto, se propone realizar el análisis en un amplio rango de densidades.

Por el tipo, el alcance y la extensión de este trabajo se proponen seis especies de madera que van de aquellas muy densas a otras, menos densas.

5. Materiales y equipos

En el apartado siguiente se recogen las características de los materiales y equipos de trabajo del laboratorio, necesarios para la obtención de los datos de estudio.

5.1 Equipos de laboratorio

A continuación, se van a exponer los diferentes instrumentos de laboratorio que han sido necesarios para la realización de este trabajo.

Calibre: Marca: MITUTOYO, modelo: Dial Caliper, resolución: 0,02 mm. Se utilizó para el dimensionamiento de las probetas (Figura 6).



Figura 6. Calibre analógico.

Básculas: se utilizaron dos diferentes.

Marca: GIBERTINI, modelo: EUROPE 3000HR, máximo 3300 g, resolución 0,1 g. Se utilizó para determinar la masa de las probetas (Figura 7).

Marca: AccuWeight-255, máximo 300 g, resolución 0,01 g. Se utilizó para el pesado de las virutas pertenecientes al ensayo de extracción de virutas (Figura 7).



Figura 7. Izquierda: Báscula GIBERTINI. Derecha: Báscula AccuWeight.

Lupa binocular con sistema de adquisición de imágenes: Marca: MOTIC Microscopes SMZ-168 con cámara: Marca: MOTICAM, modelo: 2300. Utilizada para la captación de fotografías de la broca del resistógrafo, para la comprobación del afilado de la broca (Figura 8).



Figura 8. Sistema de fotografiado estereoscópico.

Equipo de arranque de tornillos: Marca: FAKOPP, modelo: 9861-5kN-3. Se trata de un equipo portátil que consta de un husillo con una célula de carga de 5 kN que mide la fuerza necesaria para arrancar un tornillo de la pieza de madera. La resolución que ofrece este equipo es de 10 N.

Penetrómetro: Marca PILODYN, modelo: 6J Forest. Dispositivo utilizado para los ensayos de penetración de una varilla. Esta se acciona con una energía constante de 6J. La resolución del equipo es de 2 mm.

Taladro: Marca WORX, modelo: WX128.9. Batería 12V / 2.0Ah. Potencia 12 W. Par de giro 24 Nm. Se utilizó para introducir el tornillo en la pieza y realizar el ensayo de arranque de tornillos.

Aparato extractor de virutas: Equipo de fabricación propia que permite extraer y almacenar un volumen constante de madera en forma de virutas en un filtro. El valor nominal de la extracción del equipo es $\varnothing 8 \times 47$ mm y el peso del filtro utilizado de 0,27 g.

Resistógrafo: Marca: RINNTECH, modelo: Serie 6 R650-SC, profundidad máxima: 500 mm. El resistógrafo de la serie 6 está equipado con dos motores, uno para la rotación de la aguja (modelo Maxon DCX) y otro para la penetración. Se utiliza para obtener un resistograma que nos relaciona la energía consumida por el motor según va avanzando la aguja en la pieza a velocidad constante (Figura 9).



Figura 9. Resistógrafo.

Estufa de secado: Marca: IBERTEST. Se utilizó para el secado de una probeta de cada especie para obtener el peso seco.

5.2 Material fungible

Filtro de té: Componente del sistema para recoger las virutas en el ensayo de la extracción de virutas. Marca: Finum.

Tirafondo: fueron los utilizados en el ensayo de arranque de tornillo. Modelo: HecoFix Plus SPAX (PZD) cincado de 4x70 mm.

5.3 Utillaje

Soporte de trabajo: Se utiliza para disminuir el error del operario fijando las probetas mediante las bridas rápidas (Figura 10).

Gatos: utilizados para fijar el soporte de trabajo a la mesa.

Elemento de guía: elemento de ayuda para el ensayo del arranque de tornillo.

Martillo: necesario para clavar mínimamente el tornillo, que después introduciremos con el taladro para el ensayo del arranque de tornillos.



Figura 10. Soporte de trabajo.

5.4 Material de ensayo

En este apartado se distinguen los diferentes lotes de probetas, destinadas después a cada uno de los ensayos. Al laboratorio llegaron diferentes lotes de probetas, uno con más cantidad de piezas, de las cuales mediante un análisis visual se descartaron aquellas que presentaban defectos importantes.

Los lotes provienen del grupo de investigación en Estructuras y Tecnología de la Madera de la Universidad de Valladolid y estaban formados por:

- 17 piezas de Paulownia.
- 12 piezas de Chopo.
- 14 piezas de Pino Radiata.
- 14 piezas de Pino Silvestre.
- 14 piezas de Roble.
- 10 piezas de Elondo.

Se han utilizado diez probetas de cada especie para ver cómo se comportan los ensayos cuando se enfrentan a todo tipo de densidades, pudiendo analizar después que ensayo es más efectivo con respecto a cada tipo de madera. A continuación, en la Tabla 1 se recogen las especies utilizadas en el estudio.

Tabla 1. Probetas utilizadas para la estimación de la densidad de 6 especies (Guindeo, et al. 1997).

Especie	Nombre Científico	Largo nominal (mm)	Ancho nominal (mm)	Espesor nominal (mm)	Clasificación	Densidad comercial (kg/m ³)
Paulownia	<i>Paulownia tomentosa</i> (Thunb.) Steud., 1841 non Baill., 1888	160	100	60	Madera ligera	270
Chopo	<i>Populus</i> L.Sp.	180	100	60	Madera ligera	440
Pino Radiata	<i>Pinus radiata</i> D. Don	185	95	60	Madera medio ligera	500
Pino silvestre	<i>Pinus sylvestris</i> L.	200	95	60	Madera medio ligera	520
Roble	<i>Quercus robur</i> L.	200	100	65	Madera pesada	710
Elondo	<i>Erythrophleum Afzel</i> ex G. Don Sp.	190	95	70	Madera muy pesada	920

6. Metodología

6.1 Obtención de la densidad normalizada

Para la obtención de la densidad característica de la madera estructural, inicialmente la norma UNE – EN 384:2010¹ expone que debe calcularse a través de unas muestras seleccionadas. Estas deben de ser representativas de la población y cada una de ellas de una sola procedencia.²

Y para el cálculo de densidad de pequeñas piezas, la norma ISO/FDIS 13061-2:2014³, que utiliza la ecuación 1:

$$\delta_w = \frac{m_w}{a_w \times b_w \times l_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad (1)$$

Donde m_w es la masa en kg (o g) de la pieza a una con un contenido de humedad w ; a_w, b_w, l_w son las dimensiones de la pieza en m (o cm) con un contenido de humedad w ; V_w es el volumen en m^3 (o cm^3) con un contenido de humedad w .

6.2 Método general

A continuación, se va a definir el protocolo común que se utilizará previamente a la realización de los ensayos. Mediante un análisis visual se elegirán las piezas que presenten la mejor orientación posible para realizar los ensayos, evitando en la mayoría de lo posible aquellas con nudos o algún defecto físico importante (nudos, gemas, acebolladuras, ataques de xilófagos, etc.).

- **Codificación de las probetas**

Las probetas se codifican mediante dos letras, en función de la especie:

- PAPaulownia.
- CHChopo.
- PRPino Radiata.
- PS.....Pino Silvestre.
- EL.....Elondo.

¹ UNE-EN 384:2016 “Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad”.

² UNE-EN 14081-2 “Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 2: Clasificación mecánica. Requisitos complementarios para los ensayos de tipo”.

³ ISO/FDIS 13061-2:2014 “Physical and mechanical properties of Wood – Test methods for small clear specimen. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests”.

Después, cada probeta llevará un número, del 01 al 10. Por otro lado, se realiza la elección de la fibra de ensayo, en la dirección radial y tangencial, y se marca la posición donde se realizarán los ensayos, siguiendo el apartado de *Marcado de posición de muestreo*.

Las probetas de roble no fueron codificadas porque debido a su alto contenido de humedad no se pudieron realizar los ensayos convenientemente (Ver apartado resultados).

Dimensionado: Todas las dimensiones fueron obtenidas por medio de un calibre analógico Mitutoyo Dial Caliper, con una resolución de 0,02 mm. Las probetas han sido medidas en sus tres direcciones.

Obtención del peso húmedo: Todos los pesos fueron obtenidos mediante una báscula digital Gibertini Europe 3000 HR, con una resolución de 0,01 g.

Obtención del peso seco: Después del secado de las probetas se obtuvo el peso seco, utilizando la báscula digital descrita en el apartado anterior.

Medición del contenido de humedad: Para obtener la humedad se utiliza la norma UNE – EN: 13183 – 1:2002⁴, que define un método para la determinación del contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Para la obtención del dato, es necesaria una balanza con una precisión de 0,01 g y un equipo que permita secar la madera asegurando la circulación libre de aire en su interior y que se pueda mantener a una temperatura de $(103 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. Para proceder se toma una muestra dimensionada previamente. Se pesa y se la introduce en la estufa de secado, hasta que la diferencia de masa entre dos pesadas sucesivas sea menor del 0,1%. Realizar la pesada inmediatamente después de extraer la muestra de la estufa.

6.3 Métodos estimativos

El trabajo de laboratorio se divide en cuatro fases, correspondientes a los diferentes tipos de ensayos a realizar. Utilizando para ello, las técnicas y los instrumentos de cuatro ensayos pseudo no destructivos, como son:

- Método de arranque de tornillo.
- Penetrómetro (Pylodin).
- Extractor de virutas.
- Resistógrafo.

En las diferentes fases de la investigación se han realizado los ensayos sobre diez probetas de cada una de las especies.

⁴ UNE – EN: 13183 – 1:2002 “*Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Estimación por el método de secado en estufa*”. Madrid: AENOR, 2002.

6.3.1. Fase previa

Este apartado es común para todos los ensayos y se ha realizado al inicio del estudio.

Procedimiento operativo:

- Mediante un análisis visual se seleccionan las piezas que mejor aspecto presenten, evitando en la mayoría de lo posible aquellas que presenten anomalías o defectos (nudos, gemas, acebolladuras, resina, ataques de xilófagos, etc.). A continuación, se procede a su numeración y codificación.
- Se prepara un lote de probetas de una misma especie. Se toman las dimensiones de cada probeta con ayuda del calibre analógico. Se recogen los datos en una tabla, añadiendo también las anomalías físicas que hemos detectado.
- Se pesan con una báscula digital. Se anotan los datos obtenidos en una tabla.
- Se realiza un marcado de la posición donde se realizarán los ensayos mediante un código de símbolos, tanto en la dirección radial como en la tangencial.
- Se realizan los ensayos por especies, analizando primero la dirección radial y después la dirección tangencial.

Una vez finalizada la fase previa, se realiza cada uno de los ensayos sobre las probetas, en cada una de las direcciones, anotando en tablas los resultados obtenidos, para llevar un registro detallado. Una vez finalizada toda la recogida de datos se procede a realizar el estudio estadístico de los mismos.

- **Marcado de posición de muestreo**

Los ensayos se realizan en dirección radial y tangencial, sobre una misma línea de ensayo paralela a la dirección de la fibra de la madera.

Para definir cada dirección se lleva a cabo una observación de la testa de las probetas y se elige la línea más adecuada. Una vez elegida la línea de ensayo se prolonga a lo largo de la probeta y se realizan las marcas donde después se llevarán a cabo los ensayos. En cada una de las direcciones se crea:

- Una marca para realizar el taladro de extracción de virutas.
- Una marca para realizar el ensayo del resistógrafo.
- Una marca para realizar los ensayos de arranque de tornillos.
- Una marca para realizar el ensayo de penetración.

Así nos garantizamos que todos los ensayos se produzcan sobre la misma línea de fibras. Al tener dos direcciones diferentes se debe ir intercalando las marcas para que no haya riesgo de que se superpongan unas con otras, sobre todo en los ensayos de mayor profundidad.



Figura 11. Ubicación de los ensayos.

6.3.2. Método de arranque de tornillo (MAT)

Para este ensayo se va a utilizar un tornillo HecoFix Plus SPAX (PZD) cincado de 4x70 mm. Con una profundidad de penetración de 20 mm en la madera y sin pretaladro (Basterra *et al.* 2006).

Se dispone la probeta en la mesa de trabajo y se fija mediante bridas rápidas. Se introduce sobre la marca del ensayo un tornillo a una profundidad de 20 mm, en dirección perpendicular a la cara del ensayo, con ayuda de un martillo para la colocación inicial y, con ayuda de un elemento de guía, con el taladro se acaba de introducir el tornillo.

Se sitúa el equipo sobre la probeta de tal manera que el soporte de ensayo impida el movimiento de giro de este y procurando que el tornillo se encuentre lo más centrado posible. Se coloca el husillo en la cabeza del tornillo sin que se ejerza ninguna fuerza, si fuera necesario se tara a 0 kN la consola del equipo.

Una vez posicionado, se procede a la extracción del tornillo, girando de la palanca del equipo a una velocidad constante (3 - 5 segundos por vuelta), hasta que la pantalla de la consola nos muestre un valor fijo. Se anota este dato, se extrae el tornillo con ayuda del taladro y se cambia la posición de la probeta para realizar el mismo ensayo desde la otra cara. Se registran todos los datos en tablas manualmente.



Figura 12. Puesto de trabajo del ensayo de arranque de tornillos.

6.3.3. Ensayo de resistencia a la penetración de una varilla (Pilodyn)

Primero de todo, se selecciona un lote de probetas. Se dispone la probeta en la mesa de trabajo y se fija mediante las bridas rápidas, intentando que no coincida la zona del ensayo con la sujeción de la pieza, ni cercana a ella.

Se prepara el dispositivo, se carga el muelle por medio de una baqueta, dejándolo listo para el disparo. Se coloca el penetrómetro en posición perpendicular a la cara, ayudándose de los dos topes, que deben de estar en contacto con la pieza. Se debe procurar que la proyección de la aguja se encuentre lo más próxima a la marca de ensayo.

Cuando esté en una correcta posición, se dispara apretando desde la parte superior, una vez disparado y presionando se observa la medición, se realiza la lectura y se transcribe a la tabla manualmente. Para extraer la aguja se realiza uno o varios movimientos verticales en dirección lo más perpendicular a la cara de la probeta posible, para evitar que la aguja se doble.

A continuación, se cambia la posición de la probeta y se realiza el mismo ensayo en la otra dirección. Se vuelve a registrar el dato en la tabla manualmente.

6.3.4. Estimación de la densidad mediante el extractor de virutas

Se prepara un lote de probetas y el equipo necesario para el ensayo. Se codifica el filtro de papel y se introduce en el cartucho, teniendo precaución para que no se rompa y de que este lo más estirado posible. Después, se introduce el cartucho en el dispositivo.

Se dispone la probeta en la mesa de trabajo y se fija mediante las bridas rápidas. Se posiciona el taladro perpendicular a la cara del ensayo. Se acciona la taladradora previamente y se realiza la perforación siguiendo las indicaciones de la Tabla 2.

Tabla 2. Etapas de perforación en el método de extracción de virutas (Martínez López, 2016).

Etapas	Madera Blanda (< 600 kg/m³)	Madera dura (≥ 600kg/m³)
1	Se taladra hasta la mitad de la profundidad, se extrae la broca hasta un tercio de la profundidad	Se taladra hasta un tercio de la profundidad, se extrae la broca hasta un cuarto de la profundidad
2	Se taladra hasta alcanzar la profundidad máxima y se extrae la broca mínimamente	Se taladra hasta los dos tercios y se extrae hasta un tercio de profundidad
3	Se introduce de nuevo la broca hasta la máxima profundidad y se extrae definitivamente la broca	Se taladra hasta la profundidad máxima y se extrae mínimamente
4	-	Se vuelve a taladrar hasta el máximo y se extrae definitivamente la broca

Sin dejar de apretar el botón de funcionamiento del taladro, se coloca este en posición vertical, para que el serrín restante se introduzca en el filtro. Se suelta el pulsador, manteniendo la posición vertical y se extrae el cartucho.

Se cierra el filtro girándolo sobre sí mismo y lo colocamos sobre la báscula, mientras se estabiliza el peso de las virutas. Luego se traslada el dato a la tabla y se almacena el filtro lleno de viruta.

A continuación, se realiza el ensayo en la otra cara de la pieza. Se registran todos los datos en tablas manualmente.

6.3.5. Estimación de la densidad mediante el resistógrafo

Previamente a la realización de los ensayos se ha establecido un número de proyecto (Tabla 3) para cada una de las especies a ensayar:

Número de proyecto	Especie
0000	Ensayos de prueba
0001	Pino Silvestre
0002	Pino Radiata
0003	Chopo
0004	Paulownia
0005	Elondo

Tabla 3. Número de proyecto según especie.

Una vez fijado el número de proyecto (*Project Number*), el número de perfil (*Profile Number*) es el que va a ir variando conforme se vayan realizando los ensayos. Para la codificación de los diferentes ensayos se ha utilizado una tabla base para cada especie, donde se anotó de forma manual el número perfil que iba correspondiendo.

Otra de las variables que se han fijado en estos ensayos ha sido la profundidad límite (*Drill Depth*), a la cual llegará la aguja del resistógrafo, esta varía en función de la dirección de la probeta y de la cara en la que se esté ensayando. En esta investigación se han fijado dos profundidades: 80 mm y 110 mm, dependiendo de la posición de la probeta.

Una vez preparado el aparato, configurado el número de proyecto y de perfil, dependiendo de la dirección en la que estemos realizando el ensayo se fijará la profundidad. Se dispone la probeta en el soporte de trabajo y se fija con las bridas rápidas.

Se posiciona el aparato de tal manera que el ensayo se produzca perpendicular a la cara de la pieza sobre la que se va a ensayar y lo más próximo a la marca destinada para el ensayo. Una vez colocado, se acciona el aparato y se mantiene en la posición perpendicular hasta que haya finalizado.

Los perfiles se almacenan en un banco de memoria, para el análisis posterior de los datos. Una vez detenido el resistógrafo, se cambia la probeta de posición y se realiza el mismo ensayo para la otra dirección, modificando en este caso la profundidad.

6.4 Métodos estadísticos

Una vez finalizados los ensayos, con los resultados obtenidos, se elabora una tabla en Microsoft Excel, compatible con Statgraphics Centurion XVI.I (64-bit), donde se va a realizar el análisis estadístico de los mismos siguiendo la metodología propuesta por Martínez López (2016).

El objetivo final de este trabajo es obtener modelos de estimación de la densidad en función de las variables obtenidas con los diferentes sistemas de ensayo. Para cada una de estas variables se realiza un procedimiento de estudio:

- Se obtienen los valores medios y sus coeficientes de variación en cada especie.
- Se comprueba la normalidad de los datos a través de un análisis de ajuste de distribuciones de datos no censurados.
- Se analiza la existencia de diferencias estadísticas significativas entre los datos de partida para los diferentes niveles (especies, dirección de ensayo, etc.) mediante un análisis de varianza. Mediante la prueba de múltiples rangos (Método: 95,0 porcentaje LSD o Diferencia Mínima Significativa) se puede apreciar si existen estas diferencias o no.
- Para finalizar, se procede a relacionar los factores aplicando una regresión simple y/o múltiple. Los factores para comparar son la densidad con los diferentes datos obtenidos de las metodologías no destructivas de la investigación.

- **6.4.1. Comprobación de la normalidad (ajuste de datos no censurados)**

En esta fase del análisis estadístico se comprueba la normalidad de todas las funciones, condición indispensable para validar los procedimientos estadísticos. Para realizar esta comprobación, se utilizará la Prueba de Kolmogorov-Smirnov, en cada una de las especies. Por lo tanto, si el P-valor de la especie es mayor o igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que la variable proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

- **6.4.2. Test ANOVA (análisis de varianza)**

Se realiza el análisis de varianza mediante el test ANOVA. Se comparan los valores medios de los factores (dirección del ensayo), para las diferentes especies. Así, se comprueba qué factores influyen en la densidad para agruparlos en un conjunto donde no exista una diferencia estadística significativa.

La prueba-F determinará si hay diferencias significativas entre los diferentes grupos mediante el P-valor, puesto que si este es menor de 0,05 existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de los métodos utilizados y los diferentes niveles, con un porcentaje del 95% de confianza.

Para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras, se realiza la prueba de múltiples rangos. Determinar esas diferencias resultará muy útil para confirmar variaciones entre los grupos, lo que permitirá apreciar de una manera más clara la tendencia de los datos.

- **6.4.3. Propuesta de los modelos de regresión**

Una vez realizados estos procedimientos, se actuará en la propuesta de los modelos de regresión mediante los análisis estadísticos correspondientes. Para la predicción de la densidad, se han analizado los datos obtenidos con los métodos o equipos mediante la realización de los diferentes ensayos, presentándose los modelos considerados válidos, es decir los que cumplan las siguientes condiciones:

- P-valor de la tabla ANOVA sea menor o igual a 0,05.
- Normalidad de los residuos del modelo.
- Homocedasticidad de los residuos del modelo.
- Linealidad de los residuos del modelo.
- Independencia de los residuos del modelo.
- El coeficiente de determinación sea mayor o igual que 50%.
- Dependiendo de los resultados obtenidos, se han realizado modelos de regresión simple y múltiple.

7. Resultados

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos. En primer lugar, se comprobaron todos los datos, excluyendo los valores anómalos cuyos orígenes fueron probetas defectuosas, errores de medida o alguna particularidad influyente y evitable en la práctica.

Un ejemplo de estos fueron las probetas de roble retiradas del estudio por presentar un alto contenido de humedad.

Los resultados se expondrán en el siguiente orden:

- Humedad de las probetas testigo
- Densidades de las probetas por especie.
- Estimación de la densidad en 5 especies con el método de arranque de tornillo.
- Estimación de la densidad en 5 especies con el penetrómetro.
- Estimación de la densidad en 5 especies con el extractor eléctrico.
- Estimación de la densidad en 5 especies con el resistógrafo.
- Comparación de todos los modelos obtenidos.

7.1 Humedad de las probetas testigo

En la Tabla 4 se muestran los pesos de las diferentes probetas, antes y después del secado. Se ha calculado el contenido de humedad según la Norma UNE-EN 13183-1:2002.⁵

Tabla 4. Cálculo del contenido de humedad (%) de una probeta por especie.

Especie	Probeta Nº	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Contenido de humedad (%)
Paulownia	09	229,14	210,98	8,60
Chopo	10	340,18	312,12	8,99
Pino Radiata	09	411,57	375,17	9,70
Pino Silvestre	02	579,75	529,48	9,49
Roble	01	1128,35	796,60	41,65
Elondo	09	1145,63	1016,77	12,67

Como se observa en la tabla anterior, las probetas del roble tenían un alto contenido de humedad al llegar al laboratorio, por lo que fueron eliminadas del estudio. Además, según se iban secando hasta humedad ambiente, se fueron agrietando, resultando casi imposible realizar los ensayos sobre las mismas.

⁵ UNE-EN 13183-1:2002 "Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa".

7.2 Densidad normalizada, por especie

En la Tabla 5 se muestra el valor medio de las densidades de las diferentes especies, obtenidas por el procedimiento normalizado en la ISO/FDIS 13061-2:2014⁶, así como el coeficiente de variación de estas.

Tabla 5. Resumen estadístico para la densidad, por especies, según ISO/FDIS 13061-2:2014.

Especie	Nº	Media (kg/m ³)	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Normalidad Kolmogorov-Smirnov	P-valor (p>0,05)
Paulownia	10	246,45	5,36%	228,08	266,36	Si	0,788
Chopo	10	327,53	3,32%	313,06	341,81	Si	0,744
Pino Radiata	10	476,14	7,06%	432,0	534,23	Si	0,791
Pino Silvestre	10	507,65	7,55%	469,87	602,23	Si	0,208
Elondo	10	886,51	1,10%	866,04	898,31	Si	0,987
Total	50	488,86	45,85%	228,08	898,31	Si	0,788

Tal y como se esperaba, el conjunto total de probetas no sigue una distribución normal debido a que el criterio de selección de especies buscaba una distribución uniforme y creciente entre las densidades (Figura 13). Pero, por otro lado, cada grupo de probetas sí sigue una distribución normal con un nivel de confianza del 95% (Tabla 5).

Gráfico Caja y Bigotes

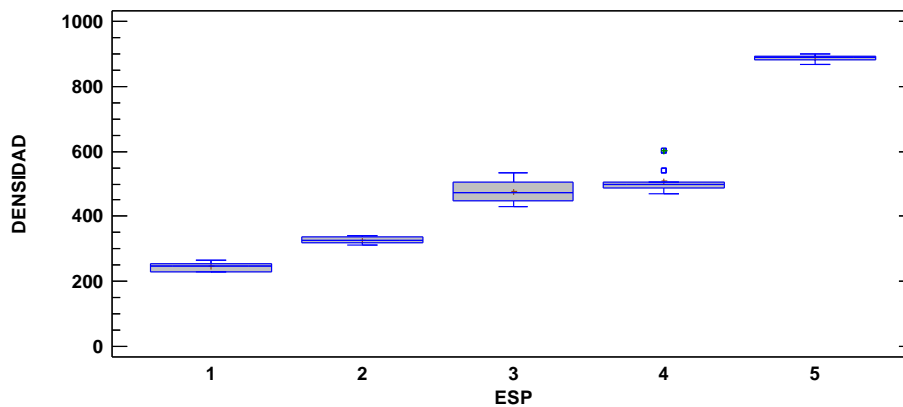


Figura 13. Diagrama de cajas y bigotes comparando la densidad de las probetas de las diferentes especies.

⁶ ISO/FDIS 13061-2:2014 “Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests”.

A continuación, en la Figura 14, se realizó una comparación entre las densidades referidas en la literatura (Guindeo *et al.* 1997) y las densidades reales de las especies obtenidas mediante la ISO/FDIS 13061-2:2014. De esta gráfica se deduce que hay grupos de probetas con una densidad muy parecida. Se puede observar también que la gráfica tiene una tendencia ascendente en cuanto a las densidades obtenidas, esto fue así para poder trabajar con especies de diferentes densidades y comprobar cómo se comportaban los equipos frente a ellas. Se produce un salto entre el Pino Silvestre y el Elondo, debido a la eliminación del Roble que estaría situado entre ambos.

Observamos que, a excepción del Chopo, todas las especies muestran una gran similitud entre ambas densidades.

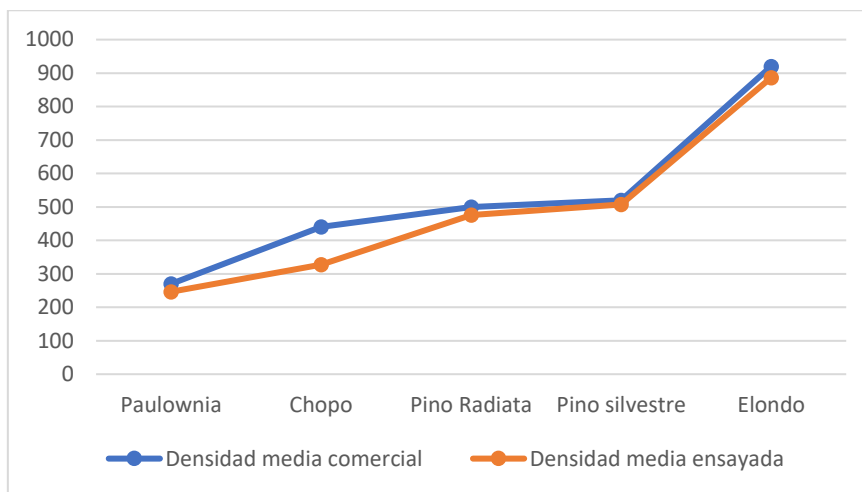


Figura 14. Comparación de la densidad media publicada y la densidad real obtenida.

Para comprobar esta hipótesis se realizó una prueba de Múltiples Rangos para la densidad de las probetas por especie (Método: 95,0 porcentaje LSD). Al aplicar este procedimiento de comparación se aprecia que cada una de las especies pertenece a un grupo homogéneo diferente (Figura 15).

Medias y 95,0% de Fisher LSD

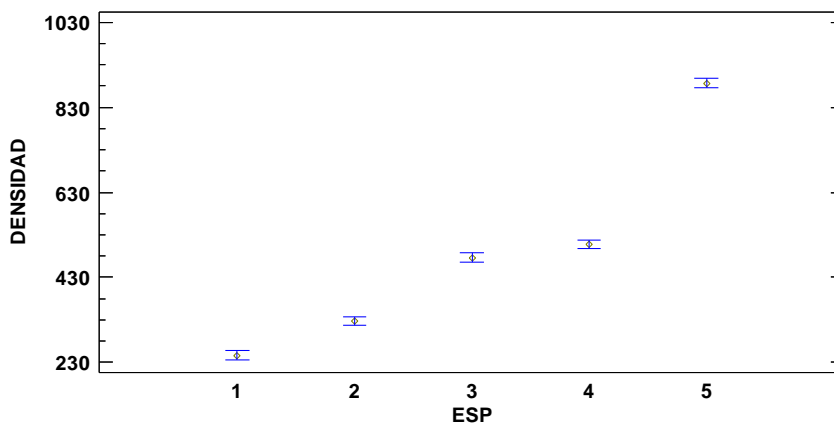


Figura 15. Gráfico de comparación de las densidades medias de las diferentes especies.

Todas ellas muestran diferencias estadísticamente significativas, con un nivel del 95,0% de confianza. En la Tabla 6 se han identificado 5 grupos homogéneos según la alineación de las X en columnas. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla 6. Prueba de múltiples rangos para densidad de las probetas por especie.

Especie	Código	Nº	Media (kg/m3)	Grupos Homogéneos
Paulownia	1	10	246,45	X
Chopo	2	10	327,53	X
Pino Radiata	3	10	476,14	X
Pino Silvestre	4	10	507,65	X
Elondo	5	10	886,51	X

7.3 Estimación de la densidad de la madera en 5 especies con el método de arranque de tornillos

Para la estimación de la densidad en las 5 especies con el método de arranque de tornillos, se realizaron dos ensayos por probeta, uno en la dirección radial y otro en la tangencial.

El ensayo consiste en medir la fuerza (kN) necesaria para extraer un tornillo tirafondo de la probeta de madera, para correlacionarla con la densidad. En la Tabla 7 se muestran los valores medios de resistencia al arranque de tornillo (MAT) en dirección radial, tangencial, y la media de ambas para cada especie, así como su coeficiente de variación.

Tabla 7. Valores medios y coeficientes de variación de la resistencia al arranque de tornillos (MAT) en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas.

Especie	Nº	MAT Radial		MAT Tangencial		MAT Media	
		Media (kN)	Coficiente de Variación (%)	Media (kN)	Coficiente de Variación (%)	Media (kN)	Coficiente de Variación (%)
Paulownia	10	1,077	9,93351%	0,934	20,1267%	1,008	14,0049%
Chopo	10	1,514	8,85719%	1,387	6,85711%	1,453	5,89411%
Pino Radiata	10	2,901	12,3962%	2,335	17,8863%	2,62	12,0483%
Pino Silvestre	10	2,713	12,3686%	2,783	15,004%	2,751	10,8084%
Elondo	10	4,29	6,69484%	4,259	6,03453%	4,277	5,19321%
Total	50	2,499	46,8823%	2,3396	51,7294%	2,4218	48,5175%

Se realizaron las Pruebas de Ajuste-de-Bondad de ajuste según Kolmogorov-Smirnov para las direcciones de ensayo radial, tangencial y la media de ambas para cada una de las especies. Debido a que los P-valores son mayores que 0,05, se asume que las muestras provienen de una distribución normal, con 95% de confianza (Tabla 8).

Tabla 8. Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para la resistencia al arranque de tornillos en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas (95%; P-valor>0,05 – Normal).

Especie	MAT radial (P-valor)	MAT tangencial (P-valor)	MAT media (P-valor)
Paulownia	0,950391	0,97322	0,935485
Chopo	0,672907	0,950028	0,363671
Pino Radiata	0,818093	0,415783	0,818787
Pino Silvestre	0,938555	0,581982	0,935934
Elondo	0,86991	0,859857	0,988705
5 especies	0,204447	0,222334	0,189545

Puesto que el P-valor (0,505) de la prueba-F del TEST ANOVA es mayor que 0,05, no existe una diferencia significativa entre las medias de las direcciones de ensayo con un nivel del 0,05 de significación, como se aprecia en la Figura 16.

Dado que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las dos direcciones, en las pruebas posteriores se trabajará con la media aritmética de los valores de la resistencia al arranque de tornillo de las dos direcciones (MAT media).

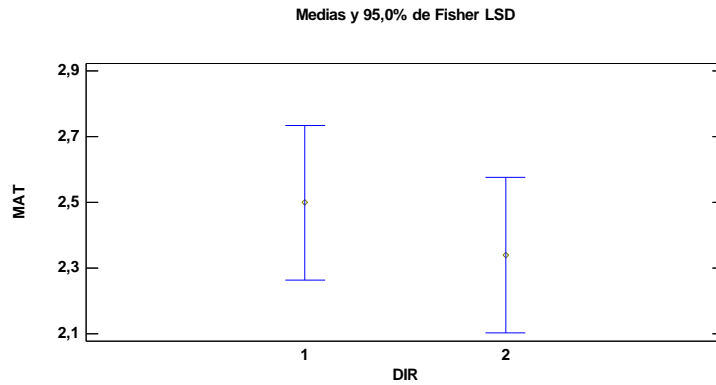


Figura 16. Diagrama de medias de la resistencia al arranque de tornillos y la dirección del ensayo.

Se analizaron las diferencias entre especies. Puesto que el P-valor (0,000) es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 5 variables con un nivel del 5% de significación. Para determinar que medias son significativamente diferentes se ha realizado la Prueba de Múltiples Rangos, en la que se han identificado 4 grupos homogéneos, dentro de las 5 especies (Figura 17). En la Tabla 9 se observa que las dos especies de pino pertenecen a un mismo grupo homogéneo.

Tabla 9. Pruebas de Múltiples Rangos para MAT media por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD.

Especie	Nº	Media (kN)	Grupos Homogéneos
Paulownia	10	1,01	X
Chopo	10	1,45	X
Pino Radiata	10	2,62	X
Pino Silvestre	10	2,75	X
Elondo	10	4,28	X

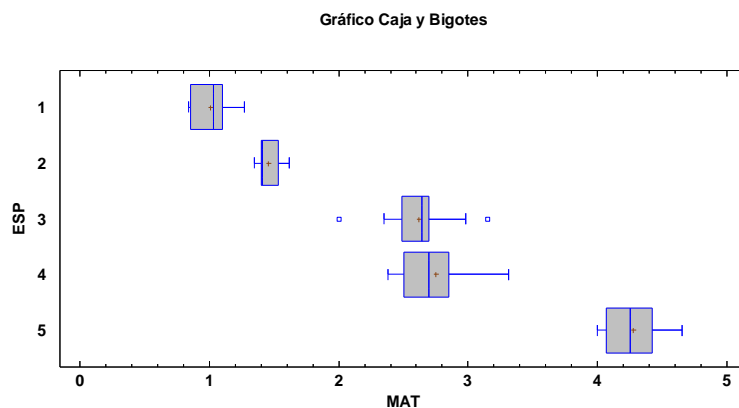


Figura 17. Diagrama de Cajas y Bigotes comparando MAT media (kN) para cada una de las especies.

No se halló ningún modelo de regresión simple que cumpliera la hipótesis de normalidad, linealidad y homocedasticidad de sus residuos para el total de las 5 especies. Para que el modelo cumpliera estas hipótesis fue necesario eliminar una de las especies, el elondo. Teniendo en cuenta estas condiciones y puesto que P-valor (0,000) en la tabla ANOVA es menos que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%. El modelo resultante se muestra en la ecuación 2 y en la Figura 18.

$$\delta = 118,121 + 138,572 \times MATm \quad R^2 = 96,00\% \quad (2)$$

Donde δ es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3); $MATm$ es la media de la fuerza necesaria para arrancar un tornillo, entre el valor de dirección radial y tangencial (kN) de las siguientes especies paulownia, chopo, pino radiata y pino silvestre.

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 96,00% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El coeficiente de correlación es igual a 0,98 indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. Por último, el error estándar indica que la desviación estándar de los residuos es $22,56 \text{ kg}/\text{m}^3$.

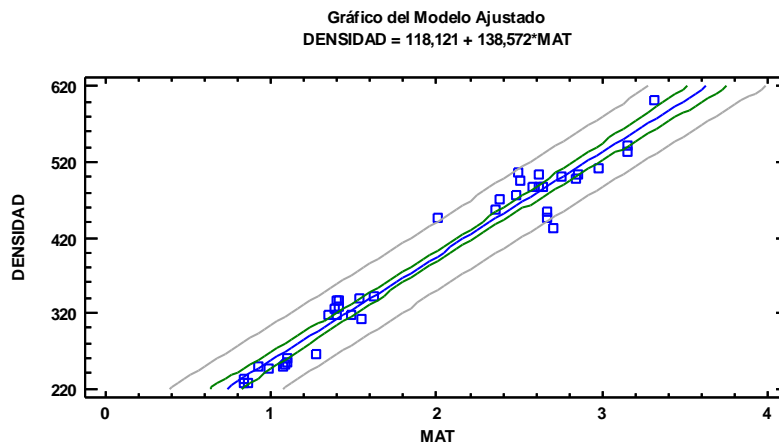


Figura 18. Gráfico del modelo de regresión lineal de densidad según MAT media.

Se realizaron pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos de modelo. Debido a que el P-valor (0,961) es mayor que 0,05, no se puede rechazar la idea de que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

Por tanto, el modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, como se aprecia en la Figura 19.

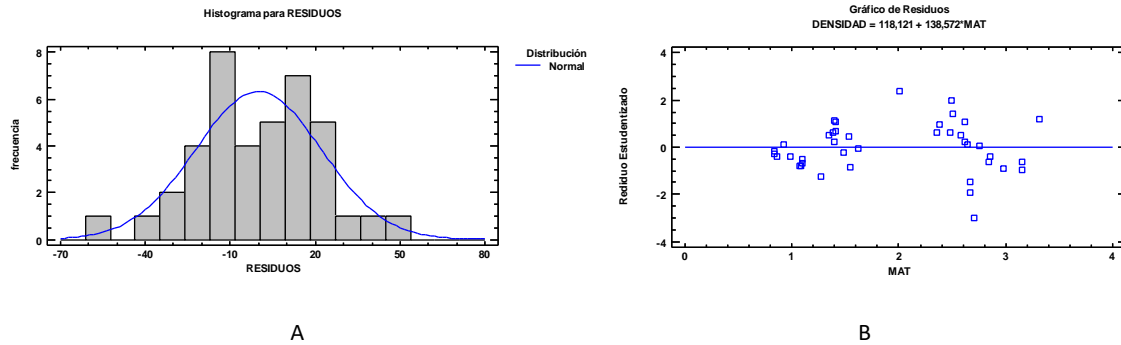


Figura 19. A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para MATm; B: Gráfico de residuos de la regresión lineal del modelo para MATm.

El modelo anterior solo se puede utilizar para cuatro de las cinco especies estudiadas. En el caso del Elondo, que ha sido la especie excluida, cabía esperar resultados anormales debido a su densidad muy superior a la media. Para poder analizar esta especie habría que variar las condiciones del ensayo.

Los resultados de R^2 en comparación con anteriores estudios: 0,49 (Basterra *et al.* 2006), 0,52 (Bobadilla, *et al.* 2007), 0,53 (Martínez López, 2016) y 0,64 (Íñiguez González, 2007) resulta demasiado elevado, por lo que habría que realizar una investigación más a fondo del valor R^2 obtenido en este método.

7.4 Estimación de la densidad de la madera en 5 especies con el penetrómetro

Para la estimación de la densidad en las 5 especies mediante el penetrómetro, se realizaron dos ensayos por probeta, uno en la dirección radial y otro en la tangencial.

El ensayo consiste en medir la profundidad de penetración (mm) en la madera de una varilla metálica disparada con energía constante, para relacionarla con la densidad de la probeta. En la Tabla 10 se muestran los valores medios de penetración (mm) en dirección radial, tangencial, y la media de ambas para cada especie, así como su coeficiente de variación.

Tabla 10. Valores medios y coeficientes de variación de la resistencia a penetración (PN) en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas.

Especie	Nº	PN Radial		PN Tangencial		PN Media	
		Media (mm)	Coefficiente de Variación (%)	Media (mm)	Coefficiente de Variación (%)	Media (mm)	Coefficiente de Variación (%)
Paulownia	10	13,80	15,95%	15,10	34,83%	14,70	18,44%
Chopo	10	11,50	22,17%	14,10	17,83%	12,90	14,82%
Pino Radiata	10	6,30	18,40%	9,70	18,22%	8,20	16,06%
Pino Silvestre	10	7,70	22,95%	11,60	19,57%	9,70	14,62%
Elondo	10	5,60	9,22%	6,50	10,88%	6,20	6,80%
Total	50	8,98	40,34%	11,40	36,83%	10,34	34,16%

Se realizaron las Pruebas de Ajuste-de-Bondad según Kolmogorov-Smirnov para las direcciones de ensayo radial, tangencial y media de ambas para cada una de las especies. Debido a que los P-valores son mayores que 0,05, se asume que las muestras provienen de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla 11).

Tabla 11. Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para la resistencia al arranque de tonillos en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas (95%; P-valor>0,05 – Normal).

Especie	PN radial (P-valor)	PN tangencial (P-valor)	PN media (P-valor)
Paulownia	0,605583	0,969579	0,639973
Chopo	0,910183	0,827012	0,950837
Pino Radiata	0,323092	0,556051	0,519842
Pino Silvestre	0,651593	0,129569	0,765903
Elondo	0,110184	0,149231	0,0190529
5 especies	0,605583	0,969579	0,639973

Puesto que el P-valor (0,002) de la prueba-F del TEST ANOVA es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos direcciones con un nivel del 95,0% de confianza (Figura 20). Debido a esta diferencia, se va a trabajar con cada una de las direcciones, para después comprobar cuál es la más idónea. Esta diferencia nos ha sorprendido ya que otros autores como Íñiguez González (2007) y Martínez López (2016) demostraron que no existían diferencias significativas entre los valores de penetración en dirección radial y tangencial.

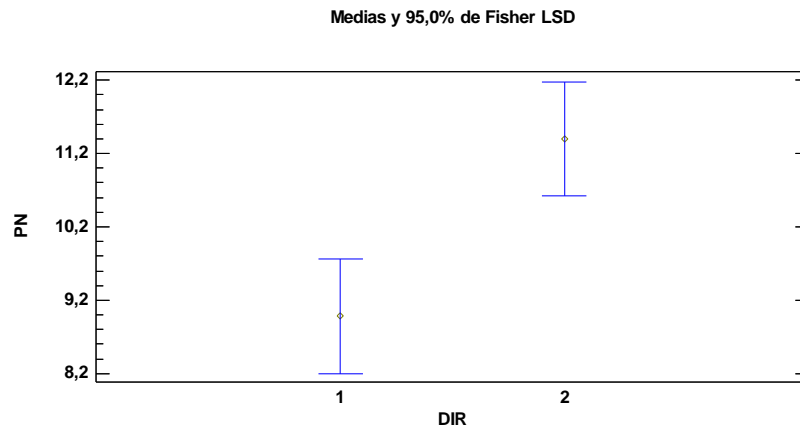


Figura 20. Diagrama de medias de la resistencia a penetración y la dirección del ensayo.

Tras observar los resultados de los modelos de estimación tanto en dirección radial como en dirección tangencial por separado, se ha creído conveniente descartar ambos, debido a que en obra no se pueden diferenciar las direcciones de ensayo. Por lo tanto, se ha propuesto obtener un modelo de estimación a través de la media de ambas.

Se analizaron las diferencias entre especies utilizando la media aritmética de los valores del penetrómetro en las dos direcciones. Puesto que el P-valor (0,000) es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las especies con un nivel del 5% de significación.

Se ha realizado la Prueba de Múltiples Rangos para determinar cuáles son diferentes y se han identificado 4 grupos homogéneos, dentro de las 5 especies. En la Tabla 12 y en la Figura 21 se observa que las dos especies de pinos forman un grupo homogéneo.

Tabla 12. Pruebas de Múltiples Rangos para PN media por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD.

Especie	Código	Nº	Media (mm)	Grupos Homogéneos
Elondo	5	10	6,2	X
Pino Radiata	3	10	8,2	X
Pino Silvestre	4	10	9,7	X
Chopo	2	10	12,9	X
Paulownia	1	10	14,7	X

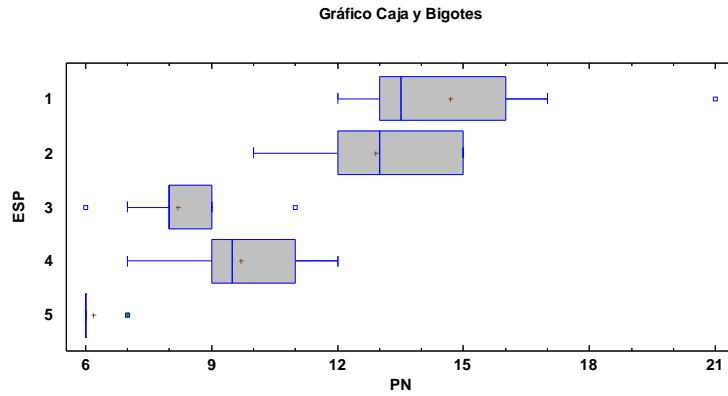


Figura 21. Diagrama de Cajas y Bigotes comparando PN media (mm) para cada una de las especies.

No se halló ningún modelo de regresión simple que cumpliera la hipótesis de linealidad, normalidad y homocedasticidad de sus residuos para el total de las 5 especies. Para que el modelo cumpliera estas hipótesis fue necesario eliminar una de las especies, el elondo.

Teniendo en cuenta estas condiciones y puesto que P-valor (0,000) en la tabla ANOVA es menos que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%. El modelo resultante se muestra en la ecuación 3 y en la Figura 22.

$$\delta = 707,015 - 27,9183 \times PNmedia \quad R^2 = 63,71\% \quad (3)$$

Donde δ es la densidad de la pieza a estimar (kg/m³); PN media es la media de la penetración de la aguja en la pieza de madera (mm) de las siguientes especies paulownia, chopo, pino radiata y pino silvestre.

El estadístico R² indica que el modelo ajustado explica 63,71% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El coeficiente de correlación es igual a -0,798, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 67,97 kg/m³.

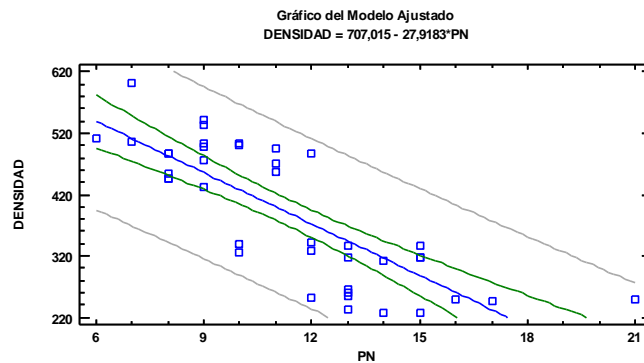


Figura 22. Gráfico del modelo de regresión lineal de la densidad según PN media.

Se realizó la prueba de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor (0,973) es mayor que 0,05, no se puede rechazar la idea de que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

Por tanto, el modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, como se aprecia en la Figura 23.

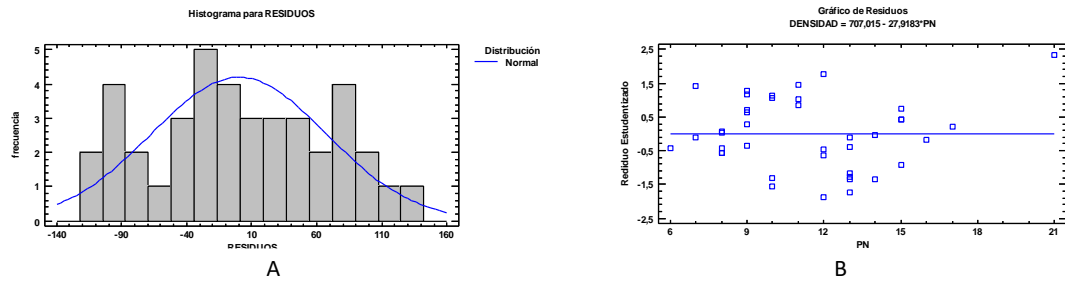


Figura 23. A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PN media; B: Gráfico de residuos de la regresión lineal del modelo para PN media.

Solo se puede utilizar para cuatro de las cinco especies estudiadas. En el caso del Elondo que ha sido la especie excluida cabía esperar resultados anormales debido a su densidad muy superior a la media. Además, este método cuenta con un R^2 muy bajo en comparación con el resto de los aparatos, como también era de esperar a la vista de estudios anteriormente publicados.

7.5 Estimación de la densidad de la madera en 5 especies con el extractor de virutas

Para la estimación de la densidad en las 5 especies con el extractor eléctrico de virutas, se realizaron dos ensayos por probeta, uno en la dirección radial y otro en la tangencial.

El ensayo consiste extraer un volumen ($\varnothing 8 \times 47$ mm) de madera en forma de virutas y pesarlas para relacionar ese peso (g) con la densidad de la probeta original. En la Tabla 13 se muestran los valores medios del peso del filtro con las virutas (PV) en dirección radial, tangencial, y la media de ambas para cada especie, así como su coeficiente de variación.

Tabla 13. Valores medios y coeficientes de variación del peso del filtro lleno de virutas (PV) en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas.

Especie	Código	Nº	PV Radial		PV Tangencial		PV Media	
			Media (g)	Coefficiente de Variación (%)	Media (g)	Coefficiente de Variación (%)	Media (g)	Coefficiente de Variación (%)
Paulownia	1	10	0,87	6,16%	0,88	4,98%	0,88	5,33%
Chopo	2	10	1,10	2,57%	1,09	2,38%	1,10	1,93%
Pino Radiata	3	10	1,44	13,41%	1,37	8,58%	1,41	9,63%
Pino Silvestre	4	10	1,46	4,64%	1,54	4,67%	1,50	3,64%
Elondo	5	10	2,25	1,33%	2,23	2,71%	2,24	1,25%
Total		50	1,42	33,75%	1,42	33,12%	1,42	33,20%

Se realizó la prueba de Ajuste-de-Bondad según Kolmogorov-Smirnov para las direcciones de ensayo radial, tangencial y la media de ambas para cada una de las especies. Debido a que los P-valores son mayores que 0,05, se asume que las muestras provienen de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla 14).

Tabla 14. Prueba de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para el peso del filtro con las virutas en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas (95%; P-valor>0,05 - Normal).

Especie	Código	PV radial (P-valor)	PV tangencial (P-valor)	PV media (P-valor)
Paulownia	1	0,852247	0,602192	0,398191
Chopo	2	0,67463	0,501035	0,919767
Pino Radiata	3	0,299562	0,415563	0,519213
Pino Silvestre	4	0,992943	0,891648	0,998703
Elondo	5	0,800583	0,199403	0,391952
Total		0,852247	0,602192	0,398191

Puesto que el P-valor (0,972) de la prueba F del TEST ANOVA es mayor que 0,05, no existe una diferencia significativa entre las medias de las direcciones de ensayo con un nivel del 0,05 de significación (Figura 24). Dado que **no hay diferencia significativa entre las direcciones** se trabajará con la media aritmética de los valores (PV media).

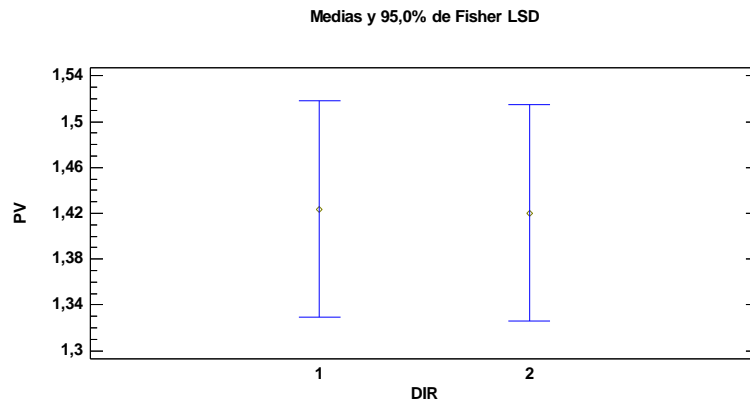


Figura 24. Diagrama de medias del peso del filtro lleno de virutas y la dirección del ensayo.

Por otro lado, se realizó el análisis de las diferencias entre especies. Puesto que P-valor (0,0000) de la prueba F del TEST ANOVA es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 5 variables con un nivel del 5% de significación. Se realizó la Prueba de Múltiples Rangos (Tabla 15) y se ha observado a través de la Figura 25 que hay 5 grupos homogéneos diferentes, uno para cada una de las especies.

Tabla 15. Pruebas de Múltiples Rangos para PV media por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD.

Código	Nº	Media (g)	Grupos Homogéneos
1	10	0,88	X
2	10	1,10	X
3	10	1,41	X
4	10	1,50	X
5	10	2,24	X

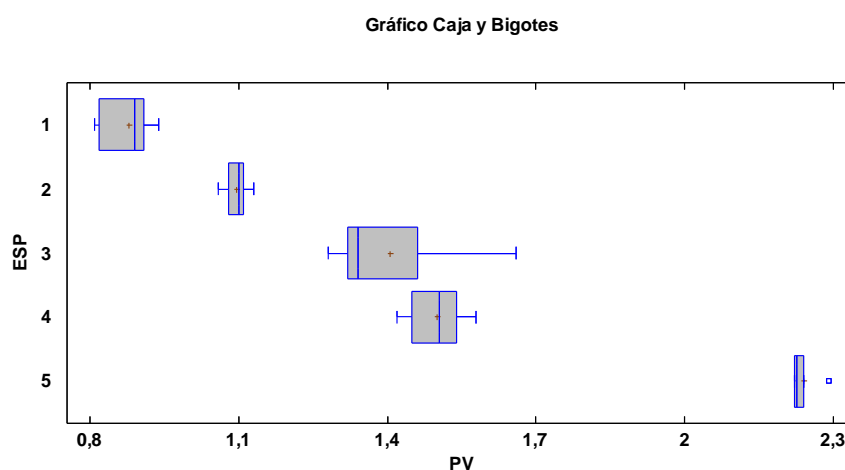


Figura 25. Diagrama de Cajas y Bigotes comparando PV media (g) para cada una de las especies.

No se halló ningún modelo de regresión simple que cumpliera la hipótesis de linealidad, normalidad y homocedasticidad de sus residuos para el total de las 5 especies. Para que el modelo cumpliera estas hipótesis fue necesario eliminar una de las especies, en este caso la paulownia.

La causa de la eliminación de la especie de la paulonia puede ser debida a su baja densidad. Por consecuencia, al realizar los ensayos se produce un aplastamiento de las paredes de las fibras que impide extraer el volumen de material requerido, también existe una pérdida de humedad en la pieza debido al aumento de temperatura por la fricción de la broca y por último, existe una pérdida de material durante la extracción en forma de polvo (Martínez López, 2016).

Teniendo en cuenta estas condiciones y puesto que P-valor (0,000) en la tabla ANOVA es menos que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%. El modelo resultante se muestra en la ecuación 4 y en la Figura 26.

$$\delta = (484,151 \times PV_{media}) - 205,937 \quad R^2 = 98,36\% \quad (4)$$

Donde δ es la densidad de la pieza a estimar (kg/m³); PV media es la media del peso del filtro con las virutas de las dos direcciones en la pieza de madera (g) de las siguientes especies chopo, pino radiata, pino silvestre y elondo.

El estadístico R² indica que el modelo ajustado explica 98,36% de la variabilidad en la densidad. El coeficiente de correlación es igual a 0,992, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 27,25 kg/m³.

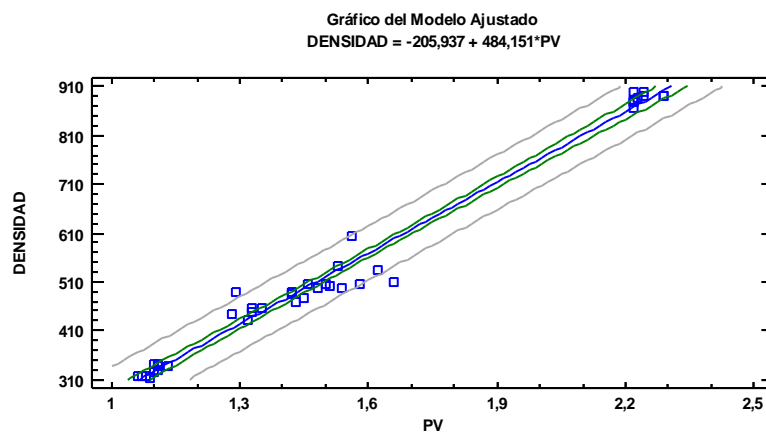


Figura 26. Gráfico del modelo de regresión lineal de la densidad según PV media.

Se realizó la prueba de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor (0,393) es mayor que 0,05, no se puede rechazar la idea de que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

Por tanto, el modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, como se aprecia en la Figura 27.

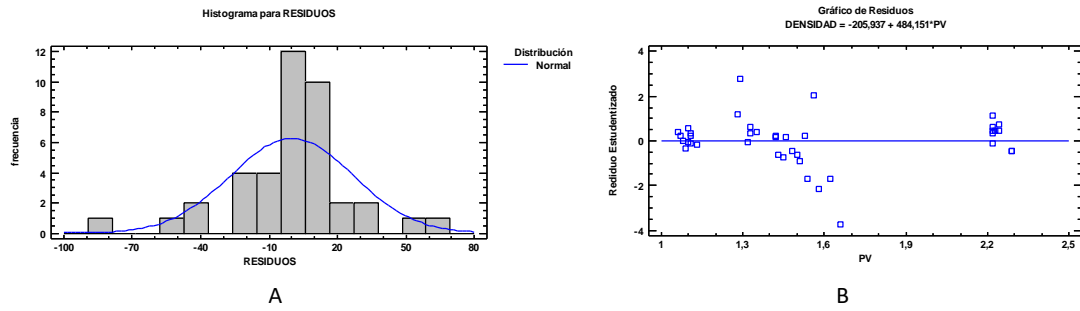


Figura 27. A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PV media; B: Gráfico de residuos de la regresión lineal del modelo para PV media.

7.6 Estimación de la densidad de la madera en 5 especies con el resistógrafo

Para la estimación de la densidad en las 5 especies mediante el resistógrafo, se realizaron dos ensayos por probeta, uno en la dirección radial y otro en la tangencial.

El ensayo consiste en medir la energía necesaria para la penetración de la broca en la pieza de madera y relacionar esta variable con la densidad de la probeta original. En la Tabla 16 se muestran los valores medios de la energía utilizada (RESIS) en dirección radial, tangencial y la media de ambas para cada especie, así como su coeficiente de variación.

Tabla 16. Valores medios de la energía necesaria para la penetración de la aguja (RESIS) en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas.

Especie	Código	Nº	RESIS Radial		RESIS Tangencial		RESIS Media	
			Media (rel)	Coefficiente de Variación (%)	Media (rel)	Coefficiente de Variación (%)	Media (rel)	Coefficiente de Variación (%)
Paulownia	1	10	319,4	3,65%	326,2	3,22%	322,8	3,07%
Chopo	2	10	354,4	1,28%	363,4	3,61%	358,9	2,26%
Pino Radiata	3	10	400,0	3,11%	412,5	7,20%	406,3	4,75%
Pino Silvestre	4	10	397,5	4,01%	408,1	1,82%	402,8	2,68%
Elondo	5	10	695,2	2,73%	702,7	5,63%	698,9	3,74%
Total		50	433,3	31,45%	442,6	30,97%	437,9	31,13%

Se realizó la prueba de Ajuste-de-Bondad según Kolmogorov-Smirnov para las direcciones de ensayo radial, tangencial y la media de ambas para cada una de las especies. Debido a que los P-valores son mayores que 0,05, se asume que las muestras provienen de una distribución normal con 95% de confianza (Tabla 17).

Tabla 17. Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para la energía necesaria en dirección radial, tangencial y en el valor medio de ambas (95%; P-valor>0,05 - Normal).

Especie	Código	RESIS Radial (P-valor)	RESIS Tangencial (p-valor)	RESIS Media (P-valor)
Paulownia	1	0,891525	0,974477	0,961347
Chopo	2	0,959113	0,956083	0,982092
Pino Radiata	3	0,951973	0,948893	0,94542
Pino Silvestre	4	0,432682	0,846983	0,919188
Elondo	5	0,850764	0,625641	0,550135
Total		0,000097361	0,000158251	0,000124126

Puesto que el P-valor (0,734) de la prueba F del TEST ANOVA es mayor que 0,05, no existe una diferencia significativa entre las medias de las direcciones de ensayo con un nivel del 0,05 de significación (Figura 28). Dado que **no hay diferencia significativa entre las direcciones**, en las pruebas posteriores se trabajará con la media aritmética de los valores de las dos direcciones (RESIS media).

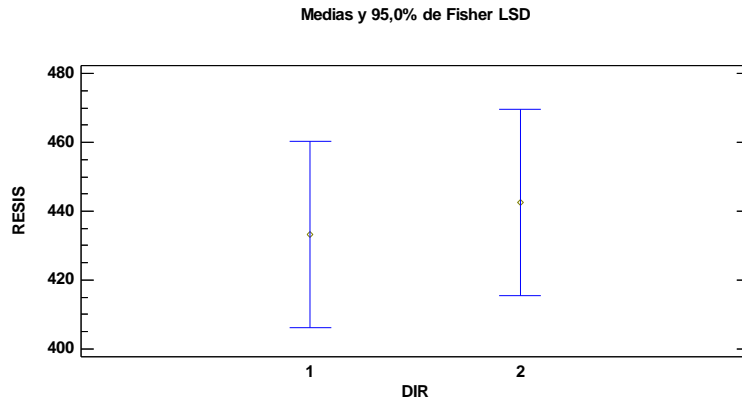


Figura 28. Diagrama de medias de la energía necesaria para la penetración de la aguja y la dirección del ensayo.

Por otro lado, analizando las diferentes especies y puesto que P-valor (0,0000) es menos que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 5 variables con un nivel del 5% de significación. Para determinar cuáles de estas medias son significativamente diferentes se ha realizado la Prueba de Múltiples Rangos (Tabla 18) y se han identificado a través de la Figura 29 que existen 4 grupos homogéneos diferentes, de los cuales uno está formado por las dos especies de pino.

Tabla 18. Pruebas de Múltiples Rangos para RESIS media por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD.

Código	Nº	Media	Grupos Homogéneos
1	10	322,8	X
2	10	358,9	X
4	10	402,8	X
3	10	406,3	X
5	10	698,9	X

Gráfico Caja y Bigotes

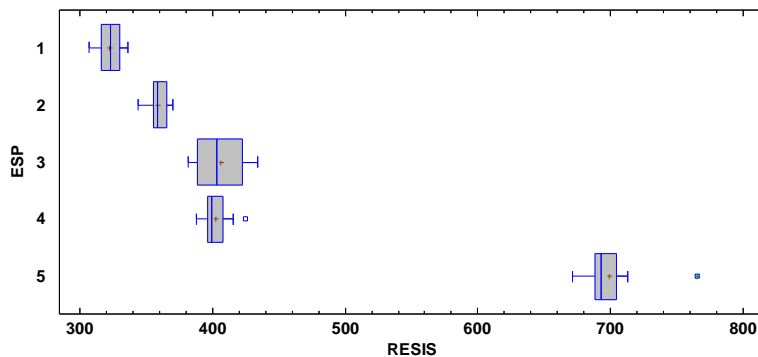


Figura 29. Diagrama de Cajas y Bigotes comparando RESIS media (rel) para cada una de las especies.

No se halló ningún modelo de regresión simple que cumpliera la hipótesis de linealidad, normalidad y homocedasticidad de sus residuos para el total de las 5 especies. Para que el modelo cumpliera estas hipótesis fue necesario eliminar una de las especies, el elondo.

Teniendo en cuenta estas condiciones y puesto que P-valor (0,000) en la tabla ANOVA es menos que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%. El modelo resultante se muestra en la ecuación 5 y en la Figura 30.

$$\delta = (2,879 \times RESIS_{media}) - 683,571 \quad R^2 = 90,82\% \quad (5)$$

Donde δ es la densidad de la pieza a estimar (kg/m³); RESIS media es la media de la energía necesaria para la penetración de la aguja en las dos direcciones de la pieza de madera (rel) de las siguientes especies paulownia, chopo, pino radiata y pino silvestre.

El estadístico R² indica que el modelo ajustado explica 90,82% de la variabilidad en la densidad. El coeficiente de correlación es igual a 0,953, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 34,17 kg/m³.

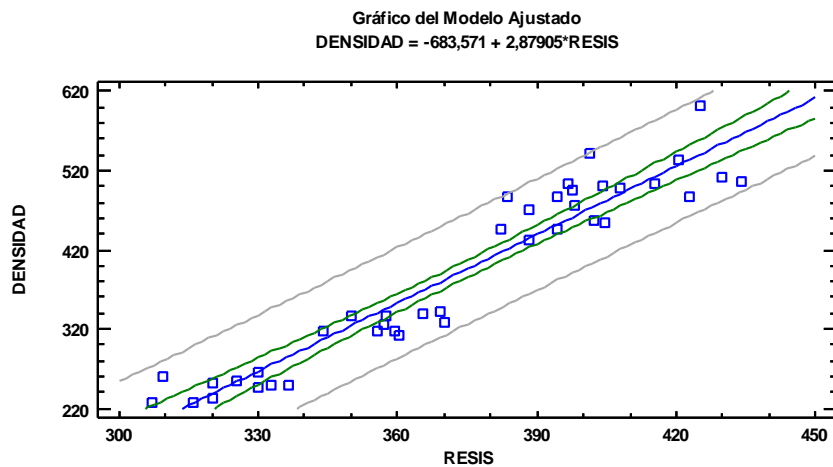


Figura 30. Gráfico del modelo de regresión lineal de la densidad según RESIS media.

Se realizó la prueba de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor (0,992) es mayor que 0,05, no se puede rechazar la idea de que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

Por tanto, el modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, como se aprecia en la Figura 31.

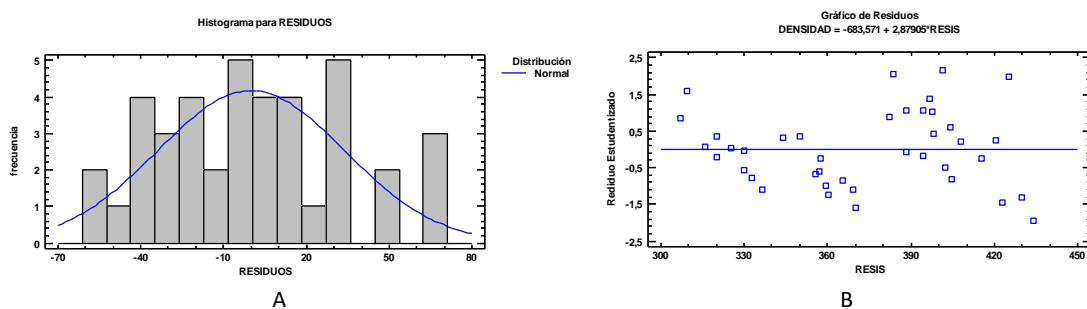


Figura 31. A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para RESIS media; B: Gráfico de residuos de la regresión lineal del modelo para RESIS media.

Se comprobó mediante los análisis, que **el resistógrafo no funciona correctamente para maderas de densidades altas**. Un ejemplo de esta comprobación fue la probeta EL09. Al realizar el ensayo en la dirección radial, se observó que el resistógrafo no alcanzaba la profundidad fijada y que nada más empezar, este volvía a su posición inicial. Tras varios intentos, se optó por un cambio de la aguja, pero el fallo se repetía. Se realizaron los ensayos con la siguiente pieza sin ninguna complicación. Por ello, se dedujo que en la pieza EL09, debe haber una zona en la que el resistógrafo llega a su máxima potencia y automáticamente, anula la perforación.

Al realizar el ensayo desde la cara posterior, con un resultado satisfactorio, se observó que el impedimento era una capa de resina, porque la broca se extrajo impregnada de esta.

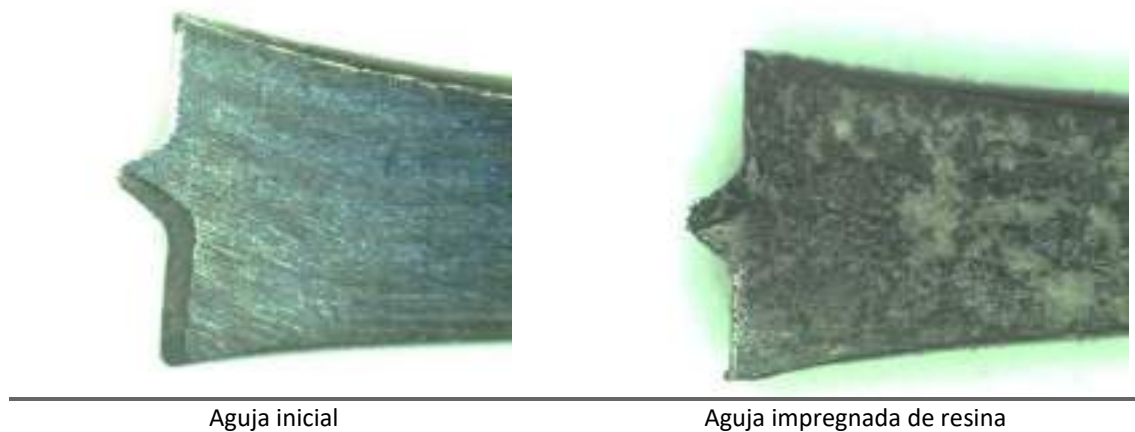
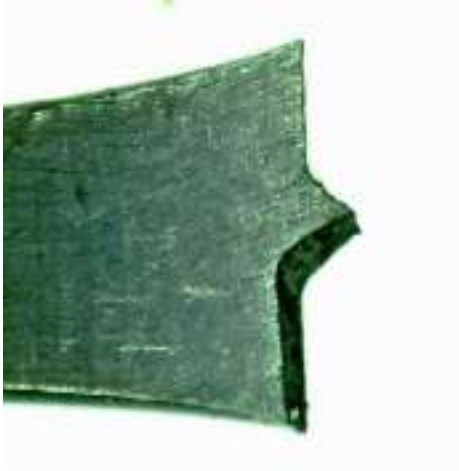


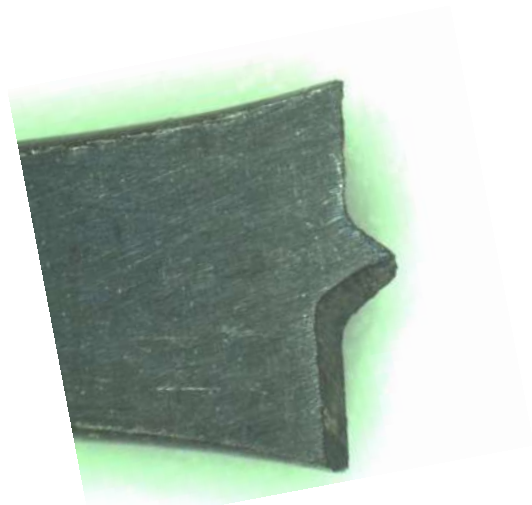
Figura 32. Comparación del estado de la aguja.

Como se puede apreciar en la Tabla 19 la aguja del resistógrafo va perdiendo su geometría y filo según se realizan los ensayos, pero en aquellos de maderas poco densas casi no supone una disminución de las características formales de la aguja.

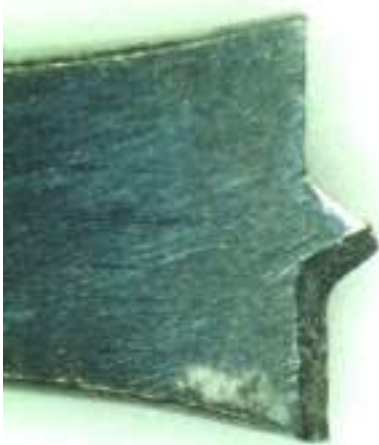
Tabla 19. Microfotografías de la aguja del resistógrafo conforme se iban realizando los ensayos.



Aguja inicial.



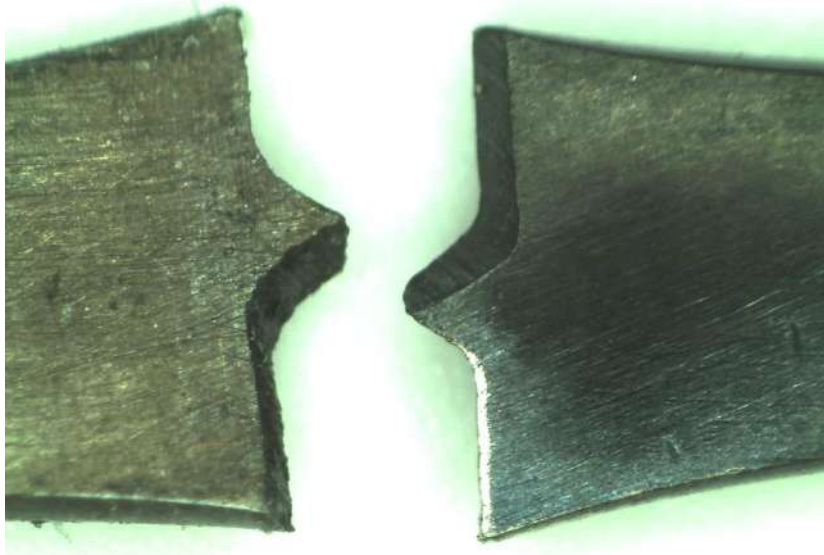
Aguja tras 10 ensayos en madera poco densa.



Aguja después de 100 ensayos (paulownia, chopo, pino radiata y pino silvestre).



Aguja después de los ensayos con el elondo.



Izq.: Aguja sin ensayos Drcha.: Aguja después de todos los ensayos.

7.7 Comparación de los modelos obtenidos

Para finalizar en la Tabla 20 se exponen los modelos de estimación de densidad para las diferentes metodologías comparando sus variables, R^2 y las ecuaciones del modelo ajustado.

Tabla 20. Comparación de los diferentes métodos y modelos de estimación de densidad obtenidos en el conjunto de las 5 especies.

Metodología	Variables independientes	Especies no utilizadas	Ecuaciones	R^2 (%)
Método de arranque de tornillos	MAT media	Elondo	$\delta = 118,121 + (138,572 \times MATm)$	96,00
Penetrómetro	PN media	Elondo	$\delta = 707,015 - (27,9183 \times PNmedia)$	63,71
Extractor de virutas	PV media	Paulownia	$\delta = (484,151 \times PVmedia) - 205,937$	98,36
Resistografía	RESIS media	Elondo	$\delta = (2,879 \times RESISmedia) - 683,571$	90,82

Donde δ es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3); MATm es la media de la fuerza necesaria para arrancar un tornillo, entre el valor de dirección radial y tangencial (kN) ; PN media es la media de la penetración de la aguja en la pieza de madera, entre el valor de dirección radial y tangencial (mm); PVmedia es la media del peso del filtro con las virutas de las dos direcciones en la pieza de madera, entre el valor de dirección radial y tangencial (g); RESIS media es la media de la energía necesaria para la penetración de la aguja en las dos direcciones de la pieza de madera, entre el valor de dirección radial y tangencial (rel).

El método con mejor R^2 es el del **extractor de virutas**, utilizando como estimador el peso del filtro lleno de virutas extraído sin tener en cuenta la dirección de ensayo. Pese a tener que eliminar la especie de densidad más baja (paulownia), es el método, junto con el resistógrafo, más fácil de utilizar en obra y que además ofrece los mejores resultados. Martínez López (2016) obtuvo en su estudio un coeficiente de 0,97, utilizando diez especies de diferentes densidades, lo que le permitía ajustar más los resultados obtenidos.

El **resistógrafo también ha dado buenos resultados**, para maderas de densidad baja-media, con un R^2 de 90,82. Sorprende la eliminación del Elondo por ser una especie muy densa, en la que se produjeron errores conforme se realizaban los estudios, dejando abierta una futura línea de investigación, que autores como Kloppenburg (2018) han estudiado obteniendo un 0,95 en el coeficiente de determinación, utilizando la especie tropical Meranti, de densidad similar al Elondo.

El método de **resistencia al arranque de tornillo obtiene también muy buenos resultados** en lo que se refiere a R^2 , pero contradictorios con los estudios anteriores que obtenían coeficientes en torno al 0,50, por lo que habría que realizar una investigación más exhaustiva para conocer el porqué de estos resultados tan favorables. Además, la necesidad de conocer la especie de madera analizada hace que sea difícil de llevar a la práctica.

En el caso del **penetrómetro** los modelos de regresión simple están limitados solo a cuatro especies con bajos R^2 haciendo que no sea muy ventajosa su utilización. El coeficiente de

determinación es mayor que los obtenidos por Iñiguez González (2007) y Martínez López (2016) pero se encuentra en un intervalo coherente con respecto a estos.

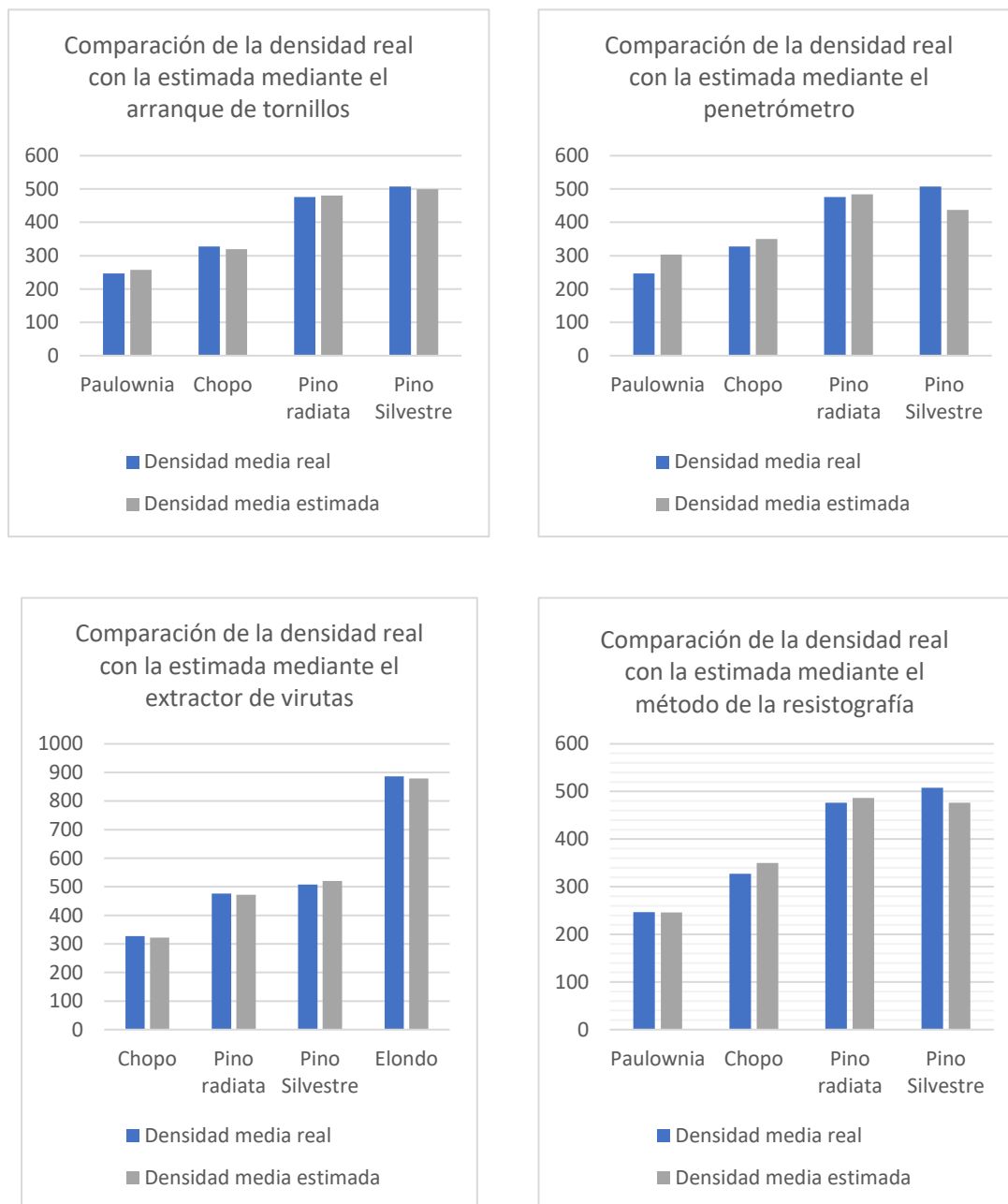


Figura 33. Comparación de la densidad real obtenida según ISO/FDIS 13061-2:2014 con la densidad estimada mediante los diferentes equipos en cada una de las especies.

En la Figura 33 se exponen los datos de la comparación entre la densidad real y la densidad estimada a través de los diferentes métodos y para cada una de las especies, excluyendo aquellas que no permitían obtener un modelo de regresión lineal. Dicha comparación revela la diferencia entre el valor medido y la estimación mediante la fórmula, se puede apreciar que existe gran similitud en los resultados de ambas.

8. Conclusiones

Una vez observado el análisis estadístico podemos asegurar que existe una relación estadísticamente significativa entre los valores medidos mediante los aparatos y la densidad real de las piezas de madera, obteniendo unos altos coeficientes de correlación, con R^2 superiores al 60,00% en la mayoría de los equipos.

Se obtuvieron las rectas de regresión para los ensayos, todas ellas **lineales**. En todos los análisis hubo que descartar una especie, paulownia o elondo, ambas por poseer densidades extremas.

El método que mejor estima la densidad de la madera, por su alto coeficiente de determinación 98,36% es, por lo tanto, el **extractor de virutas eléctrico**, pese a que no se pudo obtener un modelo lineal con la totalidad de las especies, teniendo que descartar la Paulownia. Ello es debido a su baja densidad, porque al realizar los ensayos se produce un aplastamiento de las fibras que impide extraer el volumen de material del orificio generado (Martínez López, 2016).

En el resto de los ensayos, el elondo fue la especie que hubo que eliminar para la obtención de un modelo lineal válido de estimación de la densidad, ya que es una madera tropical muy densa.

El método de **arranque de tornillo**, sin tener en cuenta la dirección del ensayo, utilizando la media de ambas direcciones, ha obtenido un coeficiente de determinación de 96,00%. Pese a su resultado, se ha optado por descartarlo como método de utilización en obra, por su complicada disposición y utilización fuera del laboratorio.

El **penetrómetro** obtuvo tres modelos lineales, uno para la dirección radial, tangencial y la media de ambas. Es considerado el peor equipo debido a sus coeficientes de determinación y a la necesidad de conocer la especie para poder analizarla con este método, por lo que hace que sea difícil de llevar a la práctica.

Por último, el **resistógrafo** ha obtenido un coeficiente de determinación del 90,82%, con una regresión lineal, teniendo que excluir el elondo, lo cual abre una línea de investigación con perspectiva de futuro.

Futuras líneas de investigación:

- Ampliar la muestra de maderas de densidades intermedias (roble), para obtener unos modelos más ajustados.
- Llevar a cabo un estudio más amplio con el resistógrafo para observar el porqué del mal funcionamiento en densidades altas.
- Estudiar el equipo extractor de virutas eléctrico en maderas con densidades bajas.

Bibliografía

- Acuña, L.; Basterra, A.; Casado, M^a; 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.
- Basterra, L., Acuña, L., Casado, M., Ramón-Cueto, G., & López, G. (2009). Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid). *Informes de la construcción*, 61(516), 21-36.
- Basterra, L., Casado, M., Acuña, L., & Pinazo, O. (2006). Técnicas de ensayo pseudo no destructivas en madera estructural mediante extracción de tornillos. *ReCoPar*(2), 37-59.
- Bobadilla, I., Esteban, M., Íñiguez, G., Arriaga, F., Ballarín, D., & Palacios, J. (2007). Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad. *Informes de la construcción*, 59(506), 107-116.
- Bobadilla, I., Íñiguez, G., Esteban, M., Arriaga, F., & Casas, L. (2007). Density estimation by screw withdrawal resistance and probing in structural swan coniferous timber. *Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*.
- Casado, M., Pinaza, O., Basterra, L., & Acuña, L. (2005). *Técnicas de Ensayo No Destructivas en madera estructural mediante extracción de tornillos: aplicación en viguetas de forjado*. Donostia. San Sebastián: CIDEMCO.
- Fernández Llana, D. (2016). *Influencia de factores físicos y geométricos en la clasificación estructural de la madera mediante técnicas no destructivas*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- González, I., Cerón, M., & Solís, L. (2004). Esfuerzos cortante y de tensión paralelos a la fibra de madera tropical de crecimiento rápido. *Ingeniería*, 8(1), 23-32.
- Guindeo, A., García, L., Peraza, F., Arriaga, F., Kasner, C., Medina, G., & Touza, M. (1997). *Especies de maderas para carpintería, construcción y mobiliario*. Madrid: AITIM.
- Hoffmeyer, P. (1978). The Pilodyn instrument as a non-destructive tester of the shock resistance of wood. *Proc. of the 4th Nondestructive Testing of Wood Symp.*, 47-66.
- Íñiguez González, G. (2007). *Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural*. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid.
- Kloppenburg, A. (2018). *Density determination of tropical hardwoods with the Resistograph*. Tesis doctoral. Delft University of Technology.
- Martínez López, R. D. (2016). *Métodos no destructivos de estimación de la densidad de la madera*. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior de Lugo.
- Osuna, C., Llana, D., Esteban, M., & Arriaga, F. (2019). Improving density estimation in large cross-section timber from existing structures optimizing the number of non-destructive measurements. *Construction and Building Materials*, 211, 199-206.
- Rinn, F. (2012). Basics of micro-resistance drilling for timber inspection. *Western Arborist*, 53(3), 30-36.
- Zhao, H., & Ehmann, K. (2002). Development and performance analysis of new spade bit designs. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42, 1403-1414.

Anexos

Anexo I. Leyenda de tablas de datos

L: Longitud de la probeta (mm).

b: Ancho de la probeta (mm).

a: Espesor de la probeta (mm).

MAT_R / MAT_{radial} : fuerza necesaria para arrancar el tornillo en la dirección radial (kN).

MAT_T / $MAT_{tangencial}$: fuerza necesaria para arrancar el tornillo en la dirección tangencial (kN).

PN_R / PN_{radial} : penetración de la varilla en la dirección radial (mm).

PN_T / $PN_{tangencial}$: penetración de la varilla en la dirección tangencial (mm).

PV_R / PV_{radial} : peso de las virutas extraídas en la dirección radial (g).

PV_T / $PV_{tangencial}$: peso de las virutas extraídas en la dirección tangencial (g).

Resis. R: código para el resistógrafo en la dirección radial (rel).

Resis. T: código para el resistógrafo en la dirección tangencial (rel).

Anexo II. Tabla de datos de dimensionamiento y pesado de las probetas

Nombre				Dimensiones			Peso húmedo (g)	Observaciones
Especie	Nombre científico	Numero probeta	Código	Largo (L)	Ancho (b)	Alto (a)		
Pino Silvestre	<i>Pinus sylvestris</i> L.	01	PS01	204,60	95,94	56,96	673,34	Resina, fendas
		02	PS02	200,40	94,32	60,84	579,75	Nudo, Resina
		03	PS03	200,14	94,64	60,14	554,72	
		04	PS04	166,62	94,68	60,86	451,12	Nudo
		05	PS05	200,40	95,28	59,22	611,22	Nudo
		06	PS06	202,92	94,40	59,28	562,61	Resina, fenda
		07	PS07	201,56	94,58	60,02	544,54	
		08	PS08	201,30	94,58	59,92	568,22	
		09	PS09	200,74	94,36	59,64	564,87	
		10	PS10	201,06	94,86	59,24	568,63	Nudo
Pino Radiata	<i>Pinus radiata</i> D. Don	01	PR01R	161,84	95,00	53,30	399,45	
		02	PR02	201,64	93,38	59,82	547,28	
		03	PR03	181,36	95,86	59,34	459,76	
		04	PR04	199,92	94,86	59,44	569,62	
		05	PR05	200,26	95,74	59,34	517,71	
		06	PR06R	166,98	95,26	58,20	399,93	
		07	PR07	199,94	95,88	57,80	591,95	Acebolladura
		08	PR08	197,88	95,34	58,02	559,32	
		09	PR09R	167,00	94,78	58,18	411,57	Esquina con nudo
		10	PR10	170,38	95,98	58,28	436,45	
Chopo	<i>Populus</i> L.Sp.	01	CH01	188,74	100,14	59,82	366,91	
		02	CH02	179,18	100,98	59,92	339,41	
		03	CH03	182,38	99,74	59,54	370,20	
		04	CH04	174,08	100,00	59,68	330,13	
		05	CH05	179,28	99,96	59,82	340,51	
		06	CH06	182,68	100,92	59,58	361,32	Nudo

Nombre				Dimensiones			Peso húmedo (g)	Observaciones
Especie	Nombre científico	Numero probeta	Código	Largo (L)	Ancho (b)	Alto (a)		
Chopo	<i>Populus L.Sp.</i>	07	CH07	176,54	99,82	59,70	354,83	Fallo corte
		08	CH08	177,44	100,04	59,60	359,60	
		09	CH09	173,44	100,02	59,62	348,75	
		10	CH10	179,02	100,08	59,86	340,18	
Paulownia	<i>Paulownia tomentosa</i> (Thunb.) Steud., 1841 non Baill., 1888	01	PA01	150,66	100,06	56,64	194,97	
		02	PA02	156,16	100,12	56,98	205,99	
		03	PA03	161,16	100,14	56,88	228,85	
		04	PA04	151,64	99,94	56,86	196,54	
		05	PA05	163,22	95,28	57,02	226,31	
		06	PA06	152,62	95,24	56,96	220,53	
		07	PA07	156,20	100,06	56,90	219,36	Nudo, Fenda
		08	PA08	183,70	95,14	57,08	248,83	
		09	PA09	163,58	98,18	56,90	229,14	
		10	PA10	167,70	95,24	56,86	235,37	
Elondo	<i>Erythrophleum Afzel ex G. Don Sp.</i>	01	EL01	190,96	97,92	69,56	1126,45	
		02	EL02	190,86	97,18	69,54	1147,8	
		03	EL03	189,86	97,44	69,68	1157,9	Acebolladura dirección anillos
		04	EL04	188,72	97,54	69,90	1146,88	
		05	EL05	189,86	97,52	69,96	1140,77	
		06	EL06	189,78	97,38	69,80	1158,78	acebolladura
		07	EL07	189,86	97,40	69,82	1142,79	acebolladura
		08	EL08	189,94	97,26	69,74	1141,8	
		09	EL09	189,88	97,54	69,42	1145,63	acebolladura
		10	EL10	189,02	97,46	70,00	1132,5	acebolladura

Anexo III. Tabla resultados de los ensayos

Código	MAT _R	MAT _T	PN _R	PN _T	PV _R	PV _T	Resis. R	Resis. T
	kN	kN	mm	mm	g	g	Rel	Rel
PS01	2,88	3,73	8	6	1,60	1,52	435,3	414,5
PS02	2,40	3,30	10	10	1,51	1,64	413,8	416,7
PS03	2,69	2,58	11	12	1,43	1,41	387,0	401,4
PS04	2,30	2,45	8	14	1,35	1,50	384,6	392,1
PS05	3,46	2,84	6	12	1,49	1,57	394,4	408,3
PS06	2,51	2,49	8	14	1,42	1,65	388,6	406,6
PS07	2,48	2,47	6	12	1,40	1,49	388,7	407,1
PS08	2,92	2,75	6	12	1,46	1,50	402,0	413,6
PS09	2,84	2,66	8	12	1,46	1,55	393,8	414,6
PS10	2,65	2,56	6	12	1,47	1,52	386,8	406,1
PR01	2,70	2,46	8	8	1,28	1,30	387,9	379,4
PR02	2,81	2,42	6	10	1,41	1,42	421,9	423,5
PR03	2,09	1,91	6	9	1,26	1,29	383,4	405,6
PR04	3,17	1,81	6	8	1,43	1,49	404,8	463,5
PR05	2,81	2,50	6	9	1,39	1,27	402,0	407,7
PR06	2,97	2,43	7	11	1,33	1,31	391,1	385,9
PR07	3,14	3,15	6	12	1,61	1,62	414,4	426,3
PR08	3,46	2,50	4	8	1,92	1,40	405,1	454,2
PR09	2,91	2,43	6	9	1,37	1,29	387,9	376,2

Código	MAT _R	MAT _T	PN _R	PN _T	PV _R	PV _T	Resis. R	Resis. T
	kN	kN	mm	mm	g	g	Rel	Rel
PR10	2,95	1,74	8	13	1,44	1,26	401,7	403,1
CH01	1,47	1,30	10,00	10,00	1,07	1,12	354,5	359,8
CH02	1,55	1,52	12,00	16,00	1,10	1,08	359,7	361,4
CH03	1,83	1,41	8,00	15,00	1,12	1,08	357,4	380,8
CH04	1,41	1,39	14,00	12,00	1,06	1,08	348,6	369,9
CH05	1,42	1,53	16,00	14,00	1,05	1,06	349,9	338,0
CH06	1,46	1,36	12,00	12,00	1,13	1,08	359,0	381,3
CH07	1,40	1,42	10,00	16,00	1,12	1,14	349,2	351,2
CH08	1,64	1,42	8,00	12,00	1,11	1,11	360,5	370,5
CH09	1,53	1,26	13,00	16,00	1,12	1,10	352,4	362,7
CH10	1,43	1,26	12,00	18,00	1,10	1,06	352,5	358,8
PA01	0,98	0,69	14	16	0,79	0,82	303,4	310,6
PA02	0,92	0,76	12	13	0,80	0,83	312,9	327,4
PA03	1,06	1,07	14	18	0,87	0,91	322,5	343,4
PA04	0,99	0,73	16	12	0,82	0,82	318,9	313,0
PA05	1,13	1,06	10	15	0,91	0,91	320,8	330,2
PA06	1,27	1,26	16	9	0,95	0,93	330,2	330,2
PA07	1,14	0,83	12	22	0,88	0,92	333,3	326,2
PA08	1,00	0,86	16	25	0,87	0,90	333,3	339,3
PA09	1,18	0,98	12	11	0,89	0,88	319,6	321,2

Código	MAT _R	MAT _T	PN _R	PN _T	PV _R	PV _T	Resis. R	Resis. T
	kN	kN	mm	mm	g	g	Rel	Rel
PA10	1,10	1,10	16	10	0,93	0,92	299,1	320,2
EL01	4,52	3,88	6	7	2,27	2,16	667,2	708,6
EL02	4,65	4,64	6	8	2,25	2,22	689,1	654,1
EL03	4,64	4,20	6	6	2,22	2,21	690,7	695,8
EL04	4,09	4,52	6	6	2,28	2,3	705,8	674,1
EL05	3,84	4,16	6	6	2,27	2,17	683,0	725,3
EL06	4,53	4,62	5	7	2,29	2,19	716,6	708,9
EL07	4,26	4,16	5	6	2,21	2,22	698,4	686,4
EL08	4,05	4,00	5	7	2,23	2,22	680,4	672,7
EL09	4,01	4,13	6	6	2,21	2,36	732,4	798,2
EL10	4,31	4,28	5	6	2,23	2,21	687,9	702,6

