



TESIS DE DOCTORADO

MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS DE ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MADERA

Roberto Diego Martínez López

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROFORESTAL PROGRAMA
DE DOCTORADO EN INGENIERÍA PARA EL DESARROLLO RURAL
Y CIVIL
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE LUGO

LUGO
2016





TESIS DE DOCTORADO

MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS DE ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MADERA

Fdo.
Roberto Diego Martínez López

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROFORESTAL PROGRAMA
DE DOCTORADO EN INGENIERÍA PARA EL DESARROLLO RURAL
Y CIVIL
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE LUGO

LUGO
2016



El **Dr. Ignacio Bobadilla Maldonado**, Profesor Titular de Universidad, del Departamento Ingeniería Forestal de la Universidad Politécnica de Madrid y el **Dr. Manuel Guaita Fernández**, Catedrático de Universidad del Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Santiago de Compostela, informan:

Que la memoria titulada “**Métodos no destructivos de estimación de la densidad de la madera**”, presentada por el MSc. Ingeniero Técnico Forestal **D. Roberto Diego Martínez López** para optar al grado de Doctor, fue realizado bajo nuestra dirección y tutorización. Considerando que el trabajo está finalizado, y es materia de tesis, autorizamos su presentación.

VºBº
El director de la tesis

VºBº
El tutor de la tesis

Dr. Ignacio Bobadilla Maldonado

Dr. Manuel Guaita Fernández

El doctorando

Roberto Diego Martínez López
Lugo, 2016



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de figuras	7
Índice de tablas	15
Tabla de abreviaturas	19
Agradecimientos	23
Resumen	25
Abstract	25
1. Introducción	27
2. Objetivos	29
3. Objectives	31
4. Antecedentes	33
4.1 Métodos no destructivos	33
4.2 Propuestas de adaptación de nomenclatura	35
4.3 Métodos de ensayo no destructivos puntuales para estimación de la densidad.....	35
4.4 Método de arranque de tornillo.....	36
4.5 Penetrómetro - Pilodyn 6J Forest	38
4.6 Esclerómetro - Esclerómetro Schmidt	39
4.7 Resistógrafo	40
4.8 Resistencia a la penetración constante de una varilla	41
4.9 Extracción de probetas testigo	43
4.9.1 Barrena Pressler	43
4.9.2 Sistema de barrena desarrollado por Kasal	44
4.9.3 Barrena del “Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Academy of Sciences of the Czech Republic”	44
4.9.4 Extracción mediante broca de corona	45
4.10 Inspección con taladradora	46

5. Desarrollo tecnológico previo.....	47
5.1 Desarrollo del Extractor de Muestras de Madera o Extractor de Virutas	47
5.1.1 Funcionamiento del dispositivo.....	48
5.1.2 Diseño y desarrollo de prototipos.....	48
5.1.3 Prototipo industrial	54
5.2 Desarrollo de la Cámara de Humectación.....	55
5.2.1 Descripción del dispositivo	56
5.2.2 Protocolo de uso	58
6. Materiales y Equipos	59
6.1 Medios y Equipos.....	59
6.1.1 Financiación de la investigación	59
6.1.2 Equipo humano.....	60
6.1.3 Equipamiento <i>Ad hoc</i>	60
6.1.3.1 Extractor de Virutas eléctrico	60
6.1.3.2 Extractor de Virutas a batería.....	60
6.1.3.3 Cámara de humectación.....	60
6.1.4 Equipamiento comercial.....	61
6.1.5 Utillaje.....	65
6.2 Material de ensayo	67
6.2.1 Primera fase: estudio de las variables condicionantes del prototipo	67
6.2.2 Segunda fase: estimación de la densidad en cuatro especies de coníferas	67
6.2.3 Tercera fase: estimación de la densidad en 10 especies de coníferas y frondosas ..	68
6.2.4 Cuarta fase: estimación de la humedad y la densidad corregida al 12% H.....	69
6.2.5 Quinta fase: detección e identificación de patologías bióticas en la madera	70
7. Métodos.....	71
7.1 Método general.....	71

7.2	Métodos específicos.....	72
7.2.1	Primera fase: estudio de las variables condicionantes del prototipo.....	72
7.2.1.1	Dispositivo para taladrar.....	72
7.2.1.2	Elección de la broca.....	72
7.2.1.3	Sistema de recogida y almacenaje de las virutas.....	74
7.2.2	Segunda fase: estimación de la densidad en cuatro especies de coníferas con Extractor de Virutas (estudio preliminar).....	74
7.2.2.1	Marcado de posición de muestreo	75
7.2.2.2	Ensayo de extracción de virutas	75
7.2.3	Tercera fase: Estimación de la densidad en 10 especies con Extractor de Virutas, probetas testigo, penetrómetro y arranque de tornillo	75
7.2.3.1	Marcado de posición de muestreo	76
7.2.3.2	Ensayo de extracción de virutas	77
7.2.3.3	Ensayo de extracción de probetas testigo.....	78
7.2.3.4	Ensayo de resistencia a la penetración de una varilla (Pilodyn).....	78
7.2.3.5	Método de arranque de tornillo (MAT).....	78
7.2.4	Cuarta fase: Estimación de la humedad y densidad corregida al 12% H en tres especies con el Extractor de Virutas.....	79
7.2.4.1	Marcado de posición de muestreo	79
7.2.4.2	Estabilización a la humedad de consigna H_c	80
7.2.4.3	Ensayo de extracción de virutas	83
7.2.5	Quinta fase: detección e identificación de patologías bióticas en madera.....	83
7.3	Métodos estadísticos.....	83
7.3.1	Comprobación de la normalidad (ajuste de datos no censurados).....	84
7.3.2	Test ANOVA	84
7.3.3	Propuesta de los modelos de regresión	85
8.	Resultados	87

8.1	Primera fase: Estudio del funcionamiento y los insumos del Extractor de Virutas	87
8.1.1	Dispositivo para taladrar.....	87
8.1.2	Elección de la broca.....	87
8.1.3	Sistema de recogida y almacenaje de las virutas.....	89
8.2	Segunda fase: Estimación de la densidad de cuatro especies de coníferas con el prototipo 3 (estudio preliminar).....	89
8.3	Tercera fase: Estimación de la densidad de la madera en 10 especies con los prototipos 4 y 5 y comparación con métodos tradicionales.....	96
8.3.1	Densidades de las probetas por especies	97
8.3.2	Estimación de la densidad en 10 especies con el método de arranque de tornillos. 99	
8.3.3	Estimación de la densidad en 10 especies con penetrómetro	106
8.3.4	Estimación de la densidad en 10 especies con probetas testigo	113
8.3.5	Estimación de la densidad en 10 especies con el extractor eléctrico	119
8.3.6	Estimación de la densidad en 10 especies con el extractor a batería.....	125
8.3.7	Modelo de equivalencia de PVB en PVE.....	128
8.3.8	Comparación de modelos	129
8.4	Cuarta fase: estimación de la humedad y la densidad corregida al 12% H en tres especies con los prototipos 4 y 5	130
8.4.1	Estabilización a la humedad de consigna H_c	131
8.4.2	Estadísticos obtenidos en los ensayos realizados	133
8.4.2.1	Diferencias entre grupos de H_c	135
8.4.3	Estimación del contenido de humedad	138
8.4.4	Estimación directa de la densidad corregida al 12% H	143
8.4.4.1	Modelo para el prototipo eléctrico	145
8.4.4.2	Modelo para el prototipo a baterías.....	146
8.5	Quinta fase: Identificación de patologías bióticas en madera mediante el uso del Extractor de Virutas.....	147

8.5.1	Características del material extraído por los prototipos en maderas con y sin ataque de xilófagos.....	150
8.5.1.1	Madera sana.....	150
8.5.1.2	Insectos de ciclo larvario (carcomas, cerambícidos y curculiónidos).....	150
8.5.1.3	Termes subterráneos.....	150
8.5.1.4	Pudriciones.....	150
9.	Conclusiones.....	161
9.1	Conclusiones generales.....	161
9.2	Conclusiones específicas por fase.....	161
9.2.1	Primera fase: Estudio de las variables condicionantes del prototipo.....	161
9.2.2	Segunda fase: Estimación de la densidad en cuatro especies de coníferas con extractor de virutas (estudio preliminar).....	162
9.2.3	Tercera fase: Estimación de la densidad en 10 especies con extractor de virutas, probetas testigo, penetrómetro y arranque de tornillo.....	162
9.2.4	Cuarta fase: Estimación de la humedad y densidad corregida al 12% H en tres especies con el Extractor de Virutas.....	164
9.2.5	Quinta fase: Identificación de patologías bióticas en madera.....	165
10.	Conclusions.....	167
10.1	General conclusions.....	167
10.2	Specific conclusions.....	167
10.2.1	Stage one: study of prototype determinant factors.....	167
10.2.2	Stage two: estimation of density of four conifer species with prototype 3.....	168
10.2.3	Stage three: estimation of the density of 10 species using the “Wood extractor”, hollow drill, penetration tester and screw withdrawal device.....	168
10.2.4	Stage four: moisture content and density at 12% of moisture content estimation with the wood extractor (prototype 4 and 5).....	170
10.2.5	Stage five: the identification of biological pathologies.....	170
	Futuras líneas de investigación.....	171
	Referencias.....	173

Anexos	181
Anexo I: leyenda de tablas de datos	181
Anexo II: tablas de datos de los ensayos de la segunda fase.....	184
Anexo III: tablas de datos de los ensayos de la tercera fase.....	193
Anexo IV: tablas de datos de los ensayos de la cuarta fase.....	207



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Glosario de técnicas no destructivas más comúnmente utilizadas en inspección de elementos de madera (Llana 2016).....	34
Figura 2: Dispositivo de arranque de tornillo.....	37
Figura 3: Pilodyn 6J Forest.....	38
Figura 4: Ensayo con esclerómetro en posición horizontal en dirección tangencial con la pieza de madera sujeta con la prensa hidráulica (Soriano <i>et al.</i> 2015).....	40
Figura 5: Resistógrafo	40
Figura 6: Vista axonométrica y lateral del dispositivo (Tippner <i>et al.</i> 2011).....	42
Figura 7: Diferentes tipos de fijación del dispositivo de introducción de varilla. De izquierda a derecha: con correa, con cadena y mediante tirafondos (Kloiber <i>et al.</i> 2012b).....	43
Figura 8: Sistema de extracción de probeta testigo y barrena (Kasal & Tannert 2011).....	44
Figura 9: Extracción de probeta testigo radial con la barrena diseñada por el “Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Academy of Sciences of the Czech Republic” (Kloiber & Kotlínová 2006).....	45
Figura 10: Broca de corona de 22 mm de diámetro y probetas testigo extraídas con la misma (Montón 2012).....	45
Figura 11: Diagrama del Extractor de muestras para cuantificación de microorganismos en la madera extraído de US Patent Number: 5,078,553 (Dutkiewicz <i>et al.</i> 2012).....	46
Figura 12: Primer prototipo. En esta imagen se observa el primer prototipo elaborado de forma manual y acoplado a una taladradora convencional. Por otro lado se observan los elementos móviles: arriba el cartucho que acoge el filtro; localizada bajo el taladro, la bolsa de recogida de la muestra de virutas	49
Figura 13: Segundo prototipo. La imagen recoge los componentes móviles (cartucho y filtro) y se puede apreciar los cambios en los materiales usados para su construcción.....	49

Figura 14: Tercer prototipo. Se aprecia el desarrollo en la técnica de fabricación que caracteriza a este modelo como totalmente funcional	50
Figura 15: Vista lateral del dispositivo extractor de muestras acoplado a una taladradora eléctrica. Las flechas indican el flujo del aire (Martínez & Bobadilla 2013).....	51
Figura 16: Corte longitudinal del dispositivo extractor de muestras acoplado a una taladradora eléctrica. Las flechas indican el flujo del aire (Martínez & Bobadilla 2013).....	51
Figura 17: Vista lateral del dispositivo extrayendo una muestra. Las flechas indican el flujo del aire (Martínez & Bobadilla 2013).....	52
Figura 18: Cuarto prototipo. Se aprecia el cambio de colocación de la toma de aire del dispositivo mejorando su ergonomía	53
Figura 19: Quinto prototipo	54
Figura 20: Vistas de la tobera de aspiración o ciclón	54
Figura 21: Prototipos impresos en FDM.....	55
Figura 22: Ábaco de Kollman (Vignote, 2006)	56
Figura 23: Esquema de la cámara de humectación. A: tapa, B: ventilador, C: probeta de madera, D: soporte, E: cubeta y F: deflector	57
Figura 24: Detalle de la ubicación de la probeta sobre los soportes. A: recubrimiento alveolar, B: deflector, C: probeta de madera, D: cubeta y E: soporte	57
Figura 25: Evolución de la humedad de probetas de diferentes especies de madera dentro de la cámara de humectación (humedad relativa del aire: saturada; temperatura: de 17 a 20 °C)	58
Figura 26: Filtro de té tamaños S (A) y XS (B).....	64
Figura 27: Serrucho japonés	64
Figura 28: Estación de trabajo con probeta de cedro en posición.....	65
Figura 29: Guía de extracción de probetas testigo (modelo 3D)	65
Figura 30: Palanca de extracción del penetrómetro	66
Figura 31: Plantilla de corte.....	66
Figura 32: Soporte de ensayo.....	67
Figura 33: Brocas utilizadas en el estudio (A: de tres puntas, B: salomónica, C: de pala y D: para acero).....	73
Figura 34: Probetas radial y tangencial. Dimensiones especificadas en milímetros	75

Figura 35: Representación de las vistas de una probeta tangencial donde se muestran la ubicación de los diferentes ensayos así como el alcance de los mismos. a) Extracción de viruta con el dispositivo eléctrico; b) Extracción de viruta con el dispositivo portátil; c) Zona de ensayo de penetración y extracción de tornillos; d) Extracción de probetas testigo	77
Figura 36: Probeta tangencial para la estimación de la densidad, a) Ubicación de los diferentes ensayos; b) Proyección de los ensayos en el interior de la probeta.....	77
Figura 37: Probeta para la estimación de la humedad, a) Ubicación de los diferentes ensayos; b) Proyección de los taladros en el interior de la probeta, en la imagen se aprecia la diferencia de profundidad de los taladros realizados	80
Figura 38: Esquema del proceso de obtención de humedad de consigna.....	82
Figura 39: Muestras de madera taladradas para la comprobación del rendimiento de extracción de las brocas A y C. Detalle del resto de serrín no extraído por la broca.....	88
Figura 40: Diagrama de cajas y bigotes de la densidad de las virutas de los tres orificios (DV1, DV2 y DV3) perforados en cada muestra y sus valores medios	91
Figura 41: Diagrama de cajas y bigotes de la densidad de las virutas (DVM) en dirección radial y tangencial.....	92
Figura 42: Diagrama de caja y bigotes de los valores de densidad de las probetas y las virutas. DVM se refiere a la densidad media de las tres extracciones	92
Figura 43: Detalle del fallo en el corte de la broca que sufren las fibras de madera (corte longitudinal del orificio teñido con safranina)	93
Figura 44: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según DVM	94
Figura 45: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para DVM (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad).....	95
Figura 46: Grafico del modelo de regresión utilizando la media del peso del filtro y las virutas de los tres orificios (PV123) como estimador	95
Figura 47: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PV (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad).....	96
Figura 48: Comparación de la densidad teórica y la densidad real obtenida por especies.....	98
Figura 49: Diagrama de cajas y bigotes comparando MAT en dirección radial y tangencial para el conjunto de las 10 especies.....	100

Figura 50: Diagrama de cajas y bigotes comparando MAT_M (en kN) para cada una de las especies	101
Figura 51: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según MAT_M	102
Figura 52: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para MAT_M (normalidad); B: Gráfico de número de fila vs residuos t-Student de la regresión lineal (independencia).....	102
Figura 53: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según MAT_M	103
Figura 54: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para MAT_M (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)	104
Figura 55: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según MAT	105
Figura 56: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para MAT (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)	105
Figura 57: Diagrama de cajas y bigotes comparando PN en dirección radial y tangencial para el conjunto de las 10 especies	107
Figura 58: Diagrama de cajas y bigotes comparando PN_M (mm) para cada una de las especies	108
Figura 59: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PN_M	109
Figura 60: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PN_M (normalidad); B: Gráfico de número de fila vs residuos t-Student de la regresión lineal (independencia).....	109
Figura 61: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PN_M	110
Figura 62: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PN_M (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)	111
Figura 63: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PN	112
Figura 64: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PN (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)	112
Figura 65: Diagrama de cajas y bigotes comparando DPT en dirección radial y tangencial para el conjunto de las 10 especies	115
Figura 66: Diagrama de cajas y bigotes comparando DPT_M para las 10 especies.....	116

Figura 67: Diagrama de cajas y bigotes para Den. Probeta y densidad de probeta testigo media (DPT_M), en kg/m^3	116
Figura 68: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PPT_M	117
Figura 69: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PPT_M (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad).....	117
Figura 70: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PPT	118
Figura 71: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PPT (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad).....	119
Figura 72: Diagrama de cajas y bigotes comparando PVE en dirección radial y tangencial para el conjunto de las 10 especies. PVE_R : Peso de las virutas extraídas en dirección radial; PVE_T : Peso de las virutas extraídas en dirección tangencial.....	121
Figura 73: Diagrama de cajas y bigotes comparando PVE_M de las 10 especies	122
Figura 74: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PVE_M	123
Figura 75: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PVE_M (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad).....	123
Figura 77: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PVE (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad).....	124
Figura 78: Diagrama de cajas y bigotes de PVB para las 10 especies	126
Figura 79: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PVB.....	127
Figura 80: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PVB (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad).....	128
Figura 81: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PVB.....	129
Figura 82: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PVB (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad).....	129
Figura 83: Gráfica de la evolución de la humedad en función del tiempo de las probetas para $H_C = 25$ de Cedro	132

Figura 84: Gráfica de la evolución de la humedad en función del tiempo de las probetas para $H_C = 25$ de Laricio.....	132
Figura 85: Gráfica de la evolución de la humedad en función del tiempo de las probetas para $H_C = 25$ de Elondo.....	133
Figura 86: Diagrama de cajas y bigotes comparando H_P , H_E y H_B (%) para el conjunto de las tres especies	139
Figura 87: Líneas de tendencia de H_P , H_E y H_B (%) en función de H_C para el conjunto de las tres especies	140
Figura 88: Gráfico del modelo de regresión lineal de humedad de la probeta según PVE0 y PVEH	141
Figura 89: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)	141
Figura 90: Gráfico del modelo de regresión lineal de humedad de la probeta según PVE0 y PVEH	142
Figura 91: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)	143
Figura 92: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta corregida al 12% H según PVE0 y PVEH	145
Figura 93: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)	146
Figura 94: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta corregida al 12% H según PVB0 y PVBH.....	146
Figura 95: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)	147
Figura 96: Imágenes características de las muestras extraídas de pino silvestre, sin patología	152
Figura 97: Imágenes características de las muestras extraídas de roble sin patología.....	153
Figura 98: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de pino atacada por anóbidos	154
Figura 99: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de roble atacada por anóbidos	155

Figura 100: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de pino atacada por cerambícidos.....	156
Figura 101: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de pino atacada por curculiónidos	157
Figura 102: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de pino atacada por termes subterráneos	158
Figura 103: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de pino atacada por pudrición parda.....	159
Figura 104: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de pino atacada por pudrición blanca	160





ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Probetas utilizadas para la estimación de la densidad en cuatro especies de coníferas	68
Tabla 2: Origen de las probetas utilizadas para la estimación de densidad.....	68
Tabla 3: Probetas utilizadas para la estimación de la densidad en 10 especies.....	69
Tabla 4: Probetas utilizadas para la estimación de la humedad y la densidad corregida	70
Tabla 5: Origen de las probetas utilizadas en la estimación de la humedad y la densidad corregida al 12% H.....	70
Tabla 6: Probetas utilizadas para la detección e identificación de Patologías en la madera	70
Tabla 7: Etapas de perforación en el método de extracción de virutas según tipo de madera .	78
Tabla 8: Ejemplo de proceso de obtención de H_c para una probeta de Cedro rojo de cada grupo de humedad	81
Tabla 9: Resultados del análisis visual de la rugosidad del orificio.....	88
Tabla 10: Valores medios de las densidades de las probetas, la densidad de las virutas y el peso de las virutas.....	90
Tabla 11: Contenido de humedad medio de las probetas y las virutas.....	90
Tabla 12: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para densidad de la virutas en el primer orificio (DV1), en el segundo (DV2), el tercero (DV3) y la media de los tres (DVM).....	91
Tabla 13: Estadísticos para la densidad de las diferentes especies.....	97
Tabla 14: Pruebas de múltiple rangos para densidad de las probetas por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD.....	98
Tabla 15: Valores medios de la resistencia al arranque de tornillos (MAT) en dirección radial y tangencial y el valor medios de ambas direcciones.....	99

Tabla 16: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para resistencia al arranque de tornillos (MAT) en dirección radial, tangencial y el valor media de ambas por especies (95%; P-valor>0,05 →Normal)	100
Tabla 17: Pruebas de Múltiple Rangos para MAT _M por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD	101
Tabla 18: Valores medios de resistencia a la penetración (PN) en dirección radial y tangencial en el valor medio de ambas direcciones	106
Tabla 19: Normalidad de las muestras por especies para la profundidad de penetración (PN) (Prueba Kolmogorov-Smirnov 95%; P-valor>0,05 →Normal).....	106
Tabla 20: Pruebas de Múltiple Rangos para PN _M por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD	108
Tabla 21: Datos anómalos eliminados para DPT	113
Tabla 22: Valores medios y coeficientes de variación de la densidad de las probetas, densidad de la probeta testigo en dirección radial (DPT _R), tangencial (DPT _T) y la media de ambos valores (DPT _M)	114
Tabla 23: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para DPT _R , DPT _T y DPT _M	114
Tabla 24: Pruebas de Múltiples Rangos para DPT _M por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD	115
Tabla 25: Datos anómalos no considerados.....	119
Tabla 26: Valores medios y coeficientes de variación del peso del filtro lleno de virutas extraído con el prototipo 4 en dirección radial, tangencial y media de ambas direcciones	120
Tabla 27: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para PVE _R , PVE _T y PVE _M	120
Tabla 28: Pruebas de Múltiple Rangos para PVE _M por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD	121
Tabla 29: Datos anómalos en las medidas de PVB (eliminados)	125
Tabla 30: Valores medios y coeficientes de variación del peso del filtro lleno de virutas extraída con el prototipo 5 (PVB) sin tener en cuenta la dirección de extracción.....	125
Tabla 31: Normalidad de las muestras de PVB por especies.....	126
Tabla 32: Pruebas de Múltiple Rangos para PVB por Cód. Método: 95,0 porcentaje LSD..	127
Tabla 33: Comparación de los diferentes métodos y modelos de estimación de densidad hallados en el conjunto de las 10 especies	130

Tabla 34: Valores medios y coeficientes de variación de la humedad de las probetas estabilizadas a diferentes humedades de consigna (H_C).....	131
Tabla 35: Valores medios y coeficientes de variación de las diferentes variables para el cedro	133
Tabla 36: Valores medios y coeficientes de variación de las diferentes variables para el laricio	134
Tabla 37: Valores medios y coeficientes de variación de las diferentes variables para el elondo	134
Tabla 38: Valores medios y coeficientes de variación de las diferentes variables para el conjunto de las tres especies.....	134
Tabla 39: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov de las diferentes variables para el cedro (95%; P-valor>0,05 →Normal).....	135
Tabla 40: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov de las diferentes variables para el laricio (95%; P-valor>0,05 →Normal).....	135
Tabla 41: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov de las diferentes variables para el elondo (95%; P-valor>0,05 →Normal).....	135
Tabla 42: Estudio de las diferencias entre grupos de H_C según especies.....	136
Tabla 43: Estudio de las diferencias entre humedades de las probetas según especies.....	136
Tabla 44: Estudio de las diferencias entre grupos de H_C para PVEH según especies.....	136
Tabla 45: Estudio de las diferencias entre grupos de H_C para PVE0 según especies.....	137
Tabla 46: Estudio de las diferencias entre grupos de H_C para PVBH según especies.....	137
Tabla 47: Estudio de las diferencias entre grupos de H_C para PVB0 según especies.....	137
Tabla 48: Estudio de las diferencias entre especies para las diferentes variables.....	137
Tabla 49: Media de los valores de las humedades obtenidas de las probetas (H_P), las virutas extraídas con el prototipo 4 (H_E) y extraídas con el prototipo 5(H_B) y sus coeficientes de variación para cada especie y H_C	138
Tabla 50: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov de las diferentes humedades (95%; P-valor>0,05 →Normal).....	139
Tabla 51: Pruebas de Múltiple Rangos para H_P , H_E y H_B . Método: 95,0 porcentaje LSD..	139
Tabla 52: Media de las densidades de las probetas medidas y corregidas al 12% H según dos Normas por especie y H_C	144

Tabla 53: Resultados del estudio de maderas con patología..... 149



TABLA DE ABREVIATURAS

ρ : densidad estimada de la pieza (kg/m^3).

ρ_{12} : densidad de la pieza a estimar corregida al 12% de contenido de humedad (kg/m^3).

ρ_H : densidad de la pieza a la humedad H (kg/m^3).

ρ_{H_2O} : densidad del agua (10^3 kg/m^3).

ρ_x : densidad del elemento x.

DPT_M : media de la densidad de la probeta testigo radial y tangencial (kg/m^3).

DPT_R : densidad de la probeta testigo en dirección radial (kg/m^3).

DPT_T : densidad de la probeta testigo en dirección tangencial (kg/m^3).

DV1: densidad de las virutas extraídas en el primer orificio con el prototipo 3 (kg/m^3).

DV2: densidad de las virutas extraídas en el segundo orificio con el prototipo 3 (kg/m^3).

DV3: densidad de las virutas extraídas en el tercer orificio con el prototipo 3 (kg/m^3).

DVM: media de la densidad de las virutas extraídas con el prototipo 3 (kg/m^3).

H: contenido de humedad de la pieza (%).

H_B : contenido de humedad de las virutas extraídas con el prototipo 5 o a baterías (%).

H_C : contenido de humedad consigna (%).

H_E : contenido de humedad de las virutas extraídas con el prototipo 4 o eléctrico (%).

H_P : contenido de humedad de las probetas (%).

H_t : media del contenido de humedad de las tres probetas testigo (%).

HEH: humedad de equilibrio higroscópico de la madera (%).

HR: humedad relativa del aire (%).

M_x : masa del elemento x .

MAT: fuerza necesaria para arrancar el tirafondo sin tener en cuenta la dirección de ensayo (kN).

MAT_M: media de la fuerza necesaria para arrancar el tirafondo, entre el valor en dirección radial y en dirección tangencial (kN).

MAT_R: fuerza necesaria para arrancar el tirafondo en dirección radial (kN).

MAT_T: fuerza necesaria para arrancar el tirafondo en dirección tangencial (kN).

PN: penetración de la varilla sin tener en cuenta la dirección de ensayo (mm).

PN_M: media de la penetración de la varilla, entre el valor en dirección radial y en dirección tangencial (mm).

PN_R: penetración de la varilla en dirección radial (mm).

PN_T: penetración de la varilla en dirección tangencial (mm).

PPT: peso de la probeta testigo sin tener en cuenta la dirección de ensayo (g).

PPT_M: media del peso de las probetas testigo radial y tangencial (g).

PV123: media del peso de los filtros llenos de virutas extraídas con el prototipo 3 (g).

PVB: peso del filtro lleno de virutas extraídas sin tener en cuenta la dirección de ensayo con el prototipo 5 o a baterías (g).

PVB0: peso del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 5 o a baterías secadas en estufa (g).

PVBH: peso del filtro lleno de virutas húmedas extraídas con el prototipo 5 o a baterías (g).

PVE: peso del filtro lleno de virutas extraídas sin tener en cuenta la dirección de ensayo con el prototipo 4 o eléctrico (g).

PVE_M: media de los pesos de los filtros llenos de virutas extraídas en dirección radial y tangencial con el prototipo 4 (g).

PVE_R: peso del filtro lleno de virutas extraídas en dirección radial con el prototipo 4 o eléctrico (g).

PVE_T: La media del peso del filtro lleno de virutas extraídas en dirección tangencial con el prototipo 4 o eléctrico (g).

PVE0: peso del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 4 o eléctrico secadas en estufa (g).

PVEH: peso del filtro lleno de virutas húmedas extraídas con el prototipo 4 o eléctrico (g).

V_x : volumen del elemento x.

Z: variables cualitativas que hacen referencia a la especie de madera (Z1: cedro rojo, Z2: chopo, Z3: pino radiata, Z4: pino pinaster, Z5: pino silvestre, Z6: pino laricio, Z7: castaño, Z8: roble y Z9: iroko).

P_{hx} : peso húmedo de la probeta x (g).

P_{Hc} : peso de la probeta a la humedad de consigna H_C (g).





AGRADECIMIENTOS

Los que me conocen saben que yo soy de hablar mucho y escribir poco, y poco queda ya por decir. Aun así y a riesgo de dejarme a alguien en el tintero:

A SARA, por tantas y tantas razones. No encuentro palabras para expresar todo lo bueno que has hecho en mi vida. No estaría acá sin vos y esto no hubiera sido posible. GRACIAS AMOR.

A mis Padres y hermano por su apoyo incondicional y su fomento de mi criterio personal. Sin ustedes no sería quien soy.

A Ignacio Bobadilla, por apoyarme en cada idea o locura que tengo. Además de dirigirme en esta etapa, has sido mentor, consejero espiritual, amigo.... Muchas gracias por todos esos momentos. Espero que en el futuro podamos seguir investigando juntos.

A todos los miembros de la UD de Cálculo de Estructuras: Guillermo, Miguel y en especial a su Catedrático Francisco Arriaga. Aunque costó al principio, logré convencerlos y con vuestro soporte el proyecto evolucionó a esta Tesis. A Manuel Guaita por su confianza y colaboración.

A Eva Hermoso y los demás miembros del laboratorio de maderas del CIFOR-INIA por su apoyo.

A Raquel Gonçalves por inestimable soporte, su crítica y por supuesto, por los tres meses de estancia en su país.

A Geoffrey Daniel por brindarme los medios y equipos del Laboratorio del Department of Forest Products de la SLU en Uppsala, Suecia.

A Javi, Sergio y Rubén por participar en la investigación.

A Dani por su soporte y consejo en la etapa de redacción y maquetación.

Es difícil incluir en tan pocas palabras a todos aquellos que me han ayudado y apoyado. A todos los que han sufrido mis monólogos sobre ideas e invenciones. A todos los que han aportado una palabra de ánimo y aliento. GRACIAS. Esta fase ya se ha acabado, pero es solo el principio.....Ahora toca inventar otro.

Mil gracias a todos



RESUMEN

El presente estudio científico-tecnológico muestra el desarrollo de un nuevo método no destructivo de estimación de la densidad *in situ* de piezas de madera y su comparación con métodos actuales. El dispositivo desarrollado (“Extractor de virutas”) permite extraer y almacenar las virutas resultantes del taladrado para posteriormente estimar la densidad de la madera, su humedad y detectar daños de origen biótico. El estudio recoge el proceso de evolución y optimización del dispositivo y los ensayos realizados en probetas de 10 especies de madera utilizadas en construcción. El nuevo dispositivo y método de estimación de la densidad local ha demostrado su utilidad y conveniencia, ya que permite además, estimar la humedad de la pieza ensayada ($R^2 = 0,86$), así como la densidad corregida al 12% H ($R^2 = 0,99$) y detectar e identificar patologías de origen biótico.

PALABRAS CLAVE: Métodos no destructivos, madera estructural, densidad puntual, patologías bióticas, prototipo.

ABSTRACT

This scientific-technological study describes the development of a new non-destructive method for *in situ* wood density estimation, comparing it with current methods. The “Wood extractor” device makes it possible to collect drilling residue to then estimate wood density and moisture content and detect biological damage. This study covers the evolution and optimization of the device as well as the tests performed on samples of 10 wood species commonly used as structural material. The usefulness and convenience of the new device and local density estimation method is demonstrated, with a determination coefficient of 0.86 for moisture content and 0.99 for direct wood density at 12% of moisture content (for wood below the fibre saturation point).

KEYWORDS: drill, density estimation, probing, non-destructive technique, semi-destructive technique.



1. INTRODUCCIÓN

Con el afán de conservar nuestro patrimonio es necesario conocer el estado de las diferentes partes que lo conforman. En la evaluación de estructuras de madera existentes es donde las técnicas no destructivas juegan un rol primordial. Estos métodos permiten conocer las características físico-mecánicas que definen el estado actual de dichos elementos. A este respecto la densidad es una de las propiedades de los materiales más importantes, y se usa con frecuencia para la caracterización de las propiedades mecánicas de la madera. Un amplio espectro de métodos no destructivos, algunos de ellos basados en esta propiedad, se utilizan para caracterizar los elementos de madera en evaluación de estructuras existentes (Ross and Pellerin 1994, Ross *et al.* 1998; Cai *et al.* 2002; Brashaw *et al.* 2005).

Para caracterizar la madera, los especialistas normalmente combinan diversos métodos con el objetivo de obtener el módulo de elasticidad dinámico (Pellerin *et al.* 2002, Bucur 2006, Bobadilla *et al.* 2007). Estas técnicas tienen diversas aplicaciones y son utilizadas *in situ* en la evaluación de estructuras de madera (Arriaga *et al.* 1992, 2013, Esteban *et al.* 2009). El módulo de elasticidad dinámico se puede calcular fácilmente mediante la velocidad de transmisión de ondas obtenida mediante la medición de los tiempos de transmisión o frecuencia de vibración, combinándola con la estimación de la densidad local obtenida a través de equipos no destructivos puntuales.

Sin embargo, la relación estadística entre la densidad y estas mediciones puntuales es limitada. Los métodos sencillos y accesibles presentan medias-bajas correlaciones y por el contrario, los métodos con altas correlaciones requieren tiempos de aplicación dilatados, son más complejos y tienen un coste mayor. De esta forma, diferentes estudios demuestran valores ligeramente bajos de los coeficientes de determinación, siendo estos entre 0,5 y 0,6 para los métodos de arranque de tornillo y resistencia a la penetración (Bobadilla *et al.* 2007, Montón 2012), y entre 0,7 y 0,8 para la esclerometría (Soriano *et al.* 2015). Con el objetivo de obtener resultados estadísticos más fiables se utilizan equipos más complejos y de mayor coste como el resistógrafo. Los ensayos con este método obtienen coeficientes de determinación entre 0,8 y 0,9 (Mariño *et al.* 2002; Acuña *et al.* 2011).

La estimación de la densidad de la madera se puede realizar a través de la extracción de cilindros de madera de pequeño tamaño, lo que recibe el nombre de probeta testigo. En este caso, existen buenas correlaciones estadísticas en la estimación con coeficientes de determinación de 0,80 a 0,88 (Kloiber 2006, Montón 2012, Íñiguez *et al.* 2015). Este método local permite a su vez el análisis del contenido de humedad y la especie a la que pertenece la muestra. La principal limitación en estos casos suele radicar en el daño causado al extraer la muestra. Por otro lado, el taladrado convencional es utilizado para determinar las condiciones

de la pieza y las posibles patologías. Esto se puede realizar a través de la observación detallada del residuo extraído y de la resistencia al taladrado que presente cada pieza. Se puede concluir por tanto que la técnica del taladrado es ampliamente utilizada para la evaluación de estructuras de madera existentes, que además presenta cualidades ventajosas en cuanto al coste y a la técnica de uso.

La experiencia profesional y práctica en el uso de estas técnicas revela los principales obstáculos de los equipos existentes para su utilización en análisis de campo. En la evaluación *in situ* de estructuras de madera existentes, las condiciones de trabajo suelen ser complejas, lo que limita el uso de determinados equipos. Los trabajos de campo son muy variados y en ocasiones con condiciones precarias: suelen tener difícil acceso, en espacios confinados con limitaciones de movimiento, pueden ser trabajos en altura o sobre superficies no transitables, donde hay condiciones de temperatura extrema, falta de iluminación o incluso acceso eléctrico limitado. A esto se suma un posible riesgo biológico (producido por el palomino y el hongo *Aspergillus* sp. entre otros) que requieren un equipo de protección biológica, el cual añade limitación de movimiento y pérdida de confort.

De esta experiencia surge la necesidad de desarrollar un sistema (equipo y método) que combine la ligereza, sencillez, facilidad de utilización, rapidez y volumen, con una alta fiabilidad y eficacia y que aporte la mayor cantidad de información posible con el menor número de medidas. Para ello se llevó a cabo un estudio en detalle de los pros y contras de los métodos convencionales, analizando las limitaciones de cada equipo y considerando las necesidades propias para la evaluación *in situ*.

Considerando la versatilidad de la taladradora, y las buenas correlaciones obtenidas por el método de la probeta testigo, se planteó la posibilidad de extraer el volumen de madera en forma de virutas, haciendo posible así reducir el tamaño del orificio dejado en la madera.

En este punto la cuestión fue *¿es posible estimar la densidad de elementos de madera de una manera fiable, simple y económica mediante el uso de un taladro convencional?* Dadas estas condiciones y considerando las necesidades detectadas, se diseñó un primer prototipo con un sistema de “recogida y almacenaje” de las virutas producidas durante el proceso, para comprobar que la idea era viable. Una vez comprobada, la evolución de este sistema dio lugar al “Extractor de Muestras de Madera mediante Taladrado” (Martínez y Bobadilla, 2013), de aquí en adelante Extractor de Virutas. Este sistema se acopla a una taladradora convencional, permite fijar un volumen de extracción constante y recoger la totalidad de las virutas generadas durante el taladrado en un filtro monouso.

Esta Tesis doctoral recoge el desarrollo de la metodología aplicada y la evolución del prototipo. Realiza una comparación con métodos convencionales a través de los modelos de estimación. Finalmente se recoge un análisis de las virutas que permite detectar e identificar patologías bióticas en la madera.

2. OBJETIVOS

Los objetivos principales de esta Tesis son:

- Definir el método de ensayo no destructivo asociado al nuevo dispositivo Extractor de Virutas que permita la estimación de la densidad de la madera *in situ*.
- Obtener la precisión del método de ensayo definido y compararlo con métodos actuales.
- Estimar con la nueva técnica definida el contenido de humedad de la madera, siempre que esta se encuentre por debajo del punto de saturación de la fibra.
- Estimar directamente la densidad de la madera corregida al 12% H. con la nueva técnica diseñada siempre que el contenido de humedad de esta se encuentre por debajo del punto de saturación de la fibra.

Como objetivo secundario se aborda la detección e identificación de agentes bióticos patógenos presentes en la madera mediante la técnica definida.



3. OBJETIVES

The main aims of this thesis are:

- To describe a new non-destructive methodology using the new “Wood extractor” device for *in situ* wood density estimation.
- To determine the accuracy of this method and compare it with current ones.
- To estimate wood moisture content below the fibre saturation point with the new technique.
- To directly estimate wood density at 12% of moisture content with the new technique for wood below the fibre saturation point.

As a secondary objective, the detection and identification of biotic pathogens presented in the wood is addressed with the new defined technique.





4. ANTECEDENTES

En este capítulo se presenta el estudio bibliográfico y la descripción de las técnicas utilizadas en este estudio. En este apartado no se incluyen los conocimientos básicos del material, como la definición de madera y sus anomalías o las diferentes formas de expresar densidad de la madera, para evitar hacer demasiado extenso el documento. De esta manera este capítulo se centra en las técnicas actuales de estimación *in situ* de la densidad mediante métodos de ensayo mecánicos no destructivos.

4.1 MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Se consideran métodos no destructivos aquellos que permitan realizar ensayos sobre un material sin alterar de forma significativa las propiedades o características principales que definen su uso final. La necesidad de obtener información de forma rápida, con un buen nivel de fiabilidad y que conlleve un daño reducido a las estructuras hacen de estos métodos una excelente alternativa que permite a su vez mantener la integridad del material y su valor durante y después del proceso de diagnosis e inspección.

La evaluación *in situ* de estructuras existentes ha sido descrita por numerosos autores (Ross *et al.* 1998; Arriaga 2002, Tampone *et al.* 2002 y Esteban *et al.* 2009). Los expertos apuntan a la necesidad de llevar a cabo una inspección visual inicial de los elementos a evaluar (Arriaga *et al.* 2002). A pesar de que este análisis proporciona información relevante sobre las características originales de los elementos, es superficial y requiere un análisis en profundidad que ponga de manifiesto los posibles daños que afectan a las propiedades de los elementos estructurales. Las técnicas de inspección no destructivas son variadas, y ofrecen una información esencial sobre el estado de las características que definen los elementos estructurales de madera, clave para conocer la capacidad de respuesta del material a largo plazo. La combinación de estos métodos con un análisis posterior en laboratorio aumenta la fiabilidad y mejora los resultados obtenidos (Feio 2006).

De acuerdo con Feio (2006) las técnicas y equipos de evaluación no destructiva han experimentado un incremento de la precisión de los métodos durante las últimas décadas. En la figura 1 se aprecia el compendio de técnicas no destructivas utilizadas por el grupo de investigación “Construcción con Madera” de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) para la evaluación de estructuras existentes.

Los ensayos no destructivos pueden clasificarse en dos grupos: ensayos globales y puntuales. Como su nombre indica, los métodos globales evalúan el comportamiento de la totalidad del elemento a ensayar, como por ejemplo los métodos acústicos y de vibraciones.

En cambio los métodos locales solo obtienen resultados de la zona ensayada, sin obtener información del resto de la pieza. En este último caso destacan el penetrómetro y el resistógrafo. Estos, juegan un importante papel como ayuda o soporte a las inspecciones visuales de estructuras existentes. Dentro de los métodos puntuales algunos autores denominan como métodos de ensayo semi destructivos aquellos que producen algún daño físico a la pieza ensayada (Kasal 2003, Kloibe & Kotlínová 2006, Kasal & Tannert 2011 e Íñiguez *et al.* 2015).



TIMBER CONSTRUCTION
RESEARCH GROUP
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
gi.consmadera@upm.es



POLITÉCNICA

NON-DESTRUCTIVE TESTING GLOSSARY												
Technique group		Technique		Portable device								
English	Spanish	English	Spanish	English	Spanish	Commercial device						
Probing	Puntual	Penetration resistance	Resistencia a la penetración	Penetration tester	Penetrómetro	Pilodyn 6J Forest (Proceq, Switzerland) Woodpecker Wood Integrity Tester (Profound, Netherlands)						
		Pullout resistance	Arranque de tornillo	Screw withdrawal device	Máquina de arranque de tornillo (MAT)	Screw Withdrawal Resistance Meter (SWRM) (Fakopp, Hungary)						
Drilling		Drill resistance	Resistencia al taladro	Resistograph	Resistógrafo	IML Resi F400-S (IML, Germany/USA) Resistograph Rinntech (Rinntech, Germany)						
		Chips drill extraction	Extracción de viruta	Wood extractor	Extractor de viruta	RML Wood Extractor (GICM, Spain)						
Coring		Core drilling	Barrenado	Pressler drill	Barrena forestal Pressler	Core drill (Pressler, Germany)						
Coring		Core drilling	Extracción de testigo	Hollow drill	Barrena hueca	Commercial hollow drill						
Acousto-ultrasonics	Acústica ultrasónica	Ultrasound waves	Ultrasonidos	Ultrasound waves device	Equipo de ultrasonidos	Steinkamp BP-V/BP-7 (UltraTest, Germany) Sylvatest Duo/Trio (CBS-CBT, France/Switzerland) USLab (Agricef, Brazil)						
						Acoustic transmission	Acústica	Sonic stress waves	Ondas sónicas de impacto	Sonic stress waves device	Equipo de ondas sónicas de impacto	Microsecond Timer (Fakopp, Hungary) Hitman Director ST300 (Fibre-gen, New Zealand) IML Micro Hammer (IML, Germany/USA)
												ArboSonic 3D (Fakopp, Hungary) Arbotom (Rinntech, Germany) Picus sonic Tomograph (Argus, Germany)
Vibration	Vibración	Longitudinal/transverse vibration	Vibraciones inducidas	Vibration device	Equipo de vibraciones inducidas	Portable Lumber Grader (PLG) (Fakopp, Hungary) Timber Grader MTG 960 (Brookhuis, Netherlands) Hitman HM200 (Fibre-gen, New Zealand) Model 340 Transverse Vibration E-Computer (Metriguard, USA)						
						Moisture measure	Humedad	Electrical resistance	Medición resistiva de humedad	Electrical resistance moisture meter	Xilohigrómetro de resistencia	Gann Hydromette RTU 600 (Gann, Germany)
Capacitance	Medición capacitiva de humedad	Capacitance moisture meter	Xilohigrómetro capacitivo	FMW moisture detector (Brookhuis, Netherlands)								

Timber Construction Website: <http://www2.montes.upm.es/Dptos/DptoConstruccion/cestruct/>

Figura 1: Glosario de técnicas no destructivas más comúnmente utilizadas en inspección de elementos de madera (Llana 2016)

4.2 PROPUESTAS DE ADAPTACIÓN DE NOMENCLATURA

La línea que divide los métodos no destructivos y los semidestructivos no es siempre clara. La técnica utilizada y el tipo y valor de la pieza a evaluar son factores que hacen que esta clasificación resulte hasta cierto punto artificial y poco precisa. Debido a esto, métodos clasificados como no destructivos o semidestructivos pueden considerarse destructivos bajo determinadas circunstancias. Por ejemplo, extraer un pequeño cilindro de un elemento de madera de gran escuadría, el cual solo cumple una función estructural, satisface la definición de no destructivo tanto en cuanto esta extracción no afecte al uso final ni al valor del elemento estructural. Por el contrario, la evaluación de una pieza policromada de elevado valor estético, cultural o artístico mediante transductores de ultrasonido que requieran el uso de gel para aumentar el contacto (a priori clasificado como un método no destructivo), puede considerarse destructivo ya que afecta al acabado superficial de la pieza.

En este punto la cuestión se centra en qué nomenclatura se puede utilizar para reducir la artificialidad de esta clasificación, que en determinados casos puede resultar arbitraria o incluso subjetiva. Para responder esta pregunta, se propone acercarse a un campo más experimentado que puede interpretarse como el campo de referencia para el desarrollo de los métodos no destructivos: las técnicas médicas. De esta forma, las pruebas de diagnóstico médico se plantean como una analogía a esta cuestión. En el diagnóstico médico, las pruebas son no destructivas, aunque algunas requieren la extracción de muestras del cuerpo (como por ejemplo las biopsias), tal y como ocurre en la técnica en la que se centra la presente tesis. Estas pruebas se clasifican como invasivas o no invasivas dependiendo de si producen o no algún trauma (Venes 2008). Por ello, se propone seguir la nomenclatura utilizada para catalogar las técnicas de inspección en madera de forma similar a los ensayos médicos. Así, los ensayos se clasificarían como:

Ensayos invasivos: Todos aquellos ensayos en los que al realizarlos se produce algún daño en el material ensayado (como los ensayos de resistencia a la penetración, resistencia al arranque de tornillos, probeta testigo, etc.).

Ensayos no invasivos: Todos aquellos ensayos en los que al realizarlos no se produce ningún daño en el material ensayado (como por ejemplo la tomografía, los rayos X o el espectro infrarrojo entre otros).

Con esta propuesta, la clasificación de los ensayos depende únicamente de la forma de aplicación de la técnica y de su influencia relativa al elemento. De esta forma, la medición del tiempo de vuelo de una onda ultrasónica puede considerarse como un ensayo invasivo si se utilizan transductores que requieran la realización de un taladrado previo. Por ello, en esta Tesis se utiliza la nomenclatura propuesta, descartando la utilización de la denominación de “métodos semidestructivos”.

4.3 MÉTODOS DE ENSAYO NO DESTRUCTIVOS PUNTUALES PARA ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD

La densidad posee una importancia clave en la evaluación y caracterización del comportamiento mecánico y físico de la madera. La densidad se correlaciona con las

propiedades de resistencia y su valor está determinado por la proporción entre la pared celular y el lumen de la célula, que a su vez es función de la proporción relativa de los diferentes tipos de células presentes en las maderas de coníferas y frondosas (Galligan 1964).

De acuerdo con lo descrito al inicio del capítulo, los métodos de ensayo no destructivos disponibles para estimar la densidad se pueden clasificar en dos categorías generales: estimación de la densidad global y estimación de la densidad local. La obtención de la densidad global se limita a dimensionar y pesar las piezas, con excepción de algunos métodos de absorción de radiación sobre una sección transversal específica (Galligan 1964). Para la estimación de la densidad local existen métodos físicos (radiación nuclear, radiación infrarroja, propiedades dieléctricas, microondas, etc.) y métodos mecánicos (resistencia a la penetración, resistencia al arranque, resistencia al taladrado, extracción de muestras en forma de cilindro). Todos los métodos de ensayo locales se pueden aplicar a muestras de gran tamaño mediante técnicas de integración (Galligan 1964).

Los métodos mecánicos de estimación son técnicas que brindan valores puntuales, aportando el valor local de la densidad. Sin embargo la densidad de la madera puede tener una importante variabilidad intraespecífica, así como a lo largo de una misma pieza. Si se quieren realizar estimaciones globales de la densidad de un elemento estructural, es recomendable realizar múltiples ensayos a lo largo de su longitud con el fin de obtener valores más representativos (Bobadilla *et al.* 2007).

En este apartado se detallan los métodos no destructivos mecánicos de estimación de la densidad local de la madera más utilizados y con aplicación en la evaluación de estructuras existentes.

4.4 MÉTODO DE ARRANQUE DE TORNILLO

El método de arranque de tornillo se basa en la medición de la fuerza necesaria para arrancar un tornillo previamente introducido en la madera, que se correlaciona con la propiedad a analizar. Como se aprecia en la figura 2, el dispositivo consiste en un puente que soporta un husillo en cuyo extremo inferior se encuentran una célula de carga y un utillaje que permite la sujeción del tornillo. En la parte superior del puente se encuentra una tuerca con dos palancas opuestas, que al girar permiten accionar el husillo y extraer el tornillo. La célula de carga mide la fuerza de extracción, que se registra en una unidad de procesamiento.

Antes de realizar este ensayo es necesario establecer tres variables: la elección del tornillo tirafondo (diámetro, tipo de punta y rosca), la profundidad de penetración del tornillo y la velocidad de extracción o de giro de las palancas.

Esta técnica se emplea en la inspección de estructuras de madera existentes, relacionando la fuerza de extracción del tornillo con la densidad de la madera (Divos 1994, Divos & Tanaka 1997, Casado *et al.* 2005, Basterra *et al.* 2006 y 2009, Arriaga *et al.* 2009 y 2013 y Divos 2011).



Figura 2: Dispositivo de arranque de tornillo

El uso de este dispositivo se centra en maderas de densidad baja a media ($400\text{-}700\text{ kg/m}^3$), ya que para densidades altas la fuerza que necesita realizar el operario es tan alta que resulta poco práctica o inviable. En ensayos realizados sobre madera de coníferas, diferentes autores relacionaron la fuerza de extracción media de una medida en dirección radial y otra tangencial con la densidad. Los coeficientes de determinación obtenidos en estos ensayos son de 0,48 a 0,50 (Bobadilla *et al.* 2007b), 0,66 (Iñiguez 2007) y 0,53 (Montón 2012), no existiendo diferencias estadísticamente significativas entre ensayos radiales y tangenciales (Bobadilla *et al.* 2007b, Iñiguez 2007).

Por otro lado, se ha estudiado el efecto del contenido de humedad en la estimación de la densidad de la madera (Llana *et al.* 2015 y Llana *et al.* 2016), así como el efecto de ataques xilófagos (Martínez *et al.* 2015). También se han realizado ensayos correlacionando las propiedades mecánicas de tableros derivados de la madera con la fuerza de extracción, obteniendo mejores resultados que para la madera maciza (Bobadilla *et al.* 2011).

Este método se puede considerar como poco invasivo ya que el orificio producido es pequeño (de 3 a 6 mm), dependiendo del diámetro del tornillo y la posible rotura de fibras producidas por el esfuerzo de tracción del tornillo. En caso de que la pieza a ensayar tenga acabado superficial a conservar, este ensayo pasa a considerarse como destructivo.

Para finalizar, las ventajas de este método son su sencillez, robustez y coste del equipo. Por otro lado, sus principales inconvenientes están relacionados con el diseño del dispositivo en sí mismo. Debido a su peso y volumen, realizar ensayos *in situ* puede resultar dificultoso o imposible. Por su parte, la base no tiene ningún elemento de sujeción a la madera, por lo que requiere la sujeción con una mano mientras que con la otra, se gira el husillo. Por otro lado, la palanca que acciona el husillo tractor es muy corta. Esto provoca que el movimiento de extracción no sea uniforme y continuo, al tener que realizar giros de 180 grados por vez. Todo esto provoca que las medidas sean dependientes de la posición en que se efectúan y del operario que las realiza.

La dificultad en el acceso a las zonas de inspección y las posiciones en las que se realizan ensayos *in situ* afecta directamente a la practicidad de este método. De esta forma, cuanto más difícil es el acceso o más precaria la posición del operario, mayor es la dificultad de uso de este método, llegando incluso a resultar imposible. Otra desventaja es que solo permite ensayar los primeros 20 o 30 mm del material.

4.5 PENETRÓMETRO - PILODYN 6J FOREST

Este dispositivo consiste en un resorte que dispara una aguja de acero con una energía de 6 J dentro de la madera y registra la profundidad de penetración mediante una escala localizada en una ventana lateral, figura 3. La profundidad de penetración está intrínsecamente relacionada con la dureza superficial y la densidad de la madera (Hoffmeyer 1978).



Figura 3: Pilodyn 6J Forest

Se podría considerar un método poco invasivo ya que produce un orificio de 2,5 mm de diámetro y una profundidad que varía de los 5 a los 20 mm dependiendo de la resistencia a la penetración de la madera (Bobadilla *et al.* 2007b). En caso de que la pieza a ensayar tenga acabado superficial a conservar, este ensayo pasaría a considerarse como destructivo.

Desde finales de la década de 1970 este dispositivo ha sido ampliamente utilizado para estimar la densidad básica de árboles en pie, así como para realizar selección de clones y selección de ejemplares para claras obteniendo buenas correlaciones estadísticas (Cown 1978, Micko *et al.* 1982, Notivol 1992, Lopez 1995, Greaves *et al.* 1996, Watt *et al.* 1996, Raymond & McDonald 1998, Silva *et al.* 2000, López & Staffieri 2002 y Wu *et al.* 2010). Otro de sus primeros usos fue la evaluación del estado de los postes de madera usados en tendidos eléctricos (Wilson 1981).

En estudios sobre la estimación de la densidad de madera aserrada de coníferas se obtuvieron coeficientes de determinación de 0,31 a 0,59 utilizando la media aritmética de los valores de penetración obtenidos en dirección radial y tangencial (Bobadilla *et al.* 2007a, 2007b, Iñiguez 2007 y Montón 2012). Los autores de estos estudios demostraron que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de penetración en dirección radial y tangencial. Görlacher (1987) realizó ensayos en piezas acondicionadas de *Picea abies* (L.) con el Pilodyn 6J, relacionando la profundidad de penetración con la

densidad de las piezas. Obtuvo coeficientes de correlación de 0,81 para el valor medio de cuatro medidas y de 0,91 para el valor medio de 16 medidas de penetración.

Al igual que con el arranque de tornillos, se ha estudiado el efecto del contenido de humedad en la estimación de la densidad de la madera (Smith *et al.* 1986, Llana *et al.* 2015 y Llana *et al.* 2016), así como el efecto de ataques xilófagos (Niemz *et al.* 1998, Giuriani *et al.* 2013 y Martínez *et al.* 2015). De la misma manera, se ha utilizado para la evaluación de estructuras existentes con la finalidad principal de determinar la densidad (Iñiguez *et al.* 2008, Esteban *et al.* 2009 y 2010 y Arriaga *et al.* 2009 y 2013). También se ha estudiado el efecto del envejecimiento físico y biológico en tableros derivados de la madera con muy buenas correlaciones (Bobadilla *et al.* 2009).

Para finalizar, la principal ventaja del instrumento radica en su portabilidad y facilidad de uso. Entre los inconvenientes se encuentran la dificultad de lectura del resultado y la pequeña superficie ensayada que hace que el resultado sea muy variable, junto con el carácter tan superficial del ensayo.

4.6 ESCLERÓMETRO - ESCLERÓMETRO SCHMIDT

El esclerómetro es un dispositivo de medición empleado para la determinación de la resistencia a compresión en hormigón o para evaluar la uniformidad del hormigón *in situ*, delinear zonas de hormigón deteriorado o de baja calidad o estimar el desarrollo de resistencias *in situ*, figura 4.

Este método mide la dureza superficial a través de un valor adimensional “R” o índice de rebote. Su funcionamiento consiste en disparar una masa metálica por medio de un resorte de energía conocida y medir el rebote. Cuanto más rígida sea la superficie menor pérdida de energía por deformación y mayor el rebote. Es un método que requiere de un operario muy experimentado para obtener valores fiables. Es no invasivo, pero en el caso de que la pieza a ensayar tenga acabado superficial a conservar este ensayo es desaconsejable ya que produce una abolladura con cada medición.

Actualmente se están llevando a cabo investigaciones en maderas tropicales relacionando el índice esclerométrico “R” con la densidad de la madera, obteniendo coeficientes de determinación del 0,70 para ensayos en dirección tangencial, 0,76 para la radial y 0,79 para la longitudinal (Soriano *et al.* 2011, 2015). El ensayo propuesto por Soriano *et al.* (2015) consiste en tomar múltiples medidas (10 valores en dirección tangencial y longitudinal y 18 en radial) en posición horizontal, eliminar los valores correspondientes al 5% superior e inferior de la distribución y obtener una media con los valores restantes. Finalmente con ese valor medio estimar la densidad. Para prevenir el movimiento de la pieza, esta es sujeta mediante una prensa hidráulica con una presión del 15% de la resistencia a compresión perpendicular a la fibra para asegurar el comportamiento elástico del material.

Los principales inconvenientes de esta técnica para el ensayo en madera *in situ* se centran en el desconocimiento de las pérdidas de energía debidas a la fijación de las piezas a ensayar, lo que se traduce en menores valores de “R”. Además de que en maderas en servicio, los

primeros milímetros de las caras expuestas son las que sufren más deterioro o las caras se encuentran con algún tipo de recubrimiento, afectando a las propiedades superficiales de la madera y posiblemente los valores de “R”. Hasta el momento estos factores no se han tenido en cuenta. El valor de rebote se ve afectado por la posición del esclerómetro por lo que los resultados solo serían aplicables si el ensayo se realiza en posición horizontal. Por otro lado el dispositivo es ligero, compacto y fácil de usar.

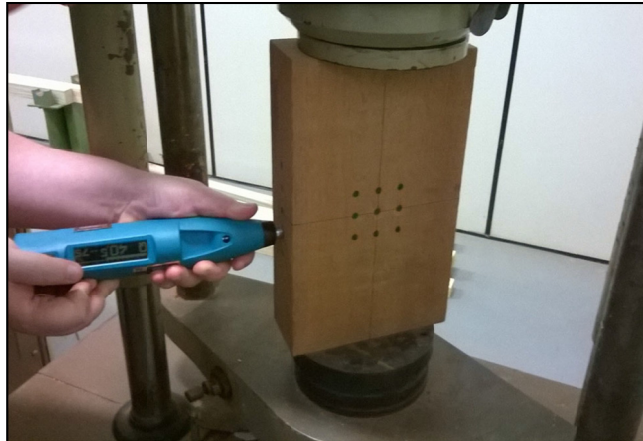


Figura 4: Ensayo con esclerómetro en posición horizontal en dirección tangencial con la pieza de madera sujeta con la prensa hidráulica (Soriano *et al.* 2015)

4.7 RESISTÓGRAFO

El resistógrafo mide la potencia necesaria para mantener constante la velocidad de giro y de penetración en la madera de una broca especial, figura 5. El equipo representa la potencia consumida frente a la profundidad alcanzada en un gráfico con una resolución de 0,1 mm en la profundidad. Esta potencia consumida se relaciona con la resistencia, la densidad y, el estado fitosanitario del material perforado. La broca está compuesta por un vástago de 1,5 mm de diámetro y una punta o cabeza cortante de 3 mm de diámetro. Este diseño reduce las pérdidas de energía por rozamiento del vástago. Los mejores valores se obtienen cuando se realiza el ensayo en dirección radial. Dentro de los métodos aquí mencionados, este es el que permite sondear a mayor profundidad en las piezas.



Figura 5: Resistógrafo

Es un método poco invasivo ya que ocasiona un orificio de 2 a 3 mm de diámetro de profundidad variable. Al igual que con otros métodos descritos, en caso de que la pieza a ensayar tenga acabado superficial a conservar este ensayo es destructivo.

Es un método ampliamente utilizado en inspección de estructuras existentes, tanto por profesionales como por la comunidad científica (Rinn 1994, Feio *et al.* 2005, Álvarez *et al.* 2005, Ramón 2007, Calderoni *et al.* 2010, Jasieńko *et al.* 2013 y Feio & Machado 2015). Cabe destacar su utilización en la inspección de estructuras de puentes de madera en EEUU (Brashaw *et al.* 2005). Una de las posibilidades más interesantes que ofrece este equipo es la inspección de la zona oculta dentro de los muros de los elementos de madera de estructuras existentes, con lo que hace posible la detección de pudriciones interiores. En esta línea, el resistógrafo ofrece información adicional sobre el tipo de patología biótica, llegando a identificar el patógeno (Martínez *et al.* 2015). Así, también es utilizado en la inspección de arbolado urbano, permitiendo la detección de daños internos (Bethge *et al.* 1996, Costello *et al.* 1999, Isik *et al.* 2003, Tseng 2004, Johnstone 2007 y Calderón *et al.* 2011).

En cuanto a la estimación de la densidad de la madera se han llevado a cabo numerosas investigaciones con muy buenas correlaciones, obteniendo valores comparables a la estimación mediante rayos X (Rinn *et al.* 1996). Mariño *et al.* (2002) realizaron ensayos en *Pinus sylvestris* L. obteniendo coeficientes de determinación del 0,85, utilizando la media ponderada de la amplitud del perfil. Acuña *et al.* (2011) obtuvieron coeficientes de determinación de 0,82 para un conjunto de tres especies de coníferas y tres de frondosas, utilizando como variable el valor medio del perfil resistográfico. Por su parte Rinn (2012) realizó ensayos en maderas con densidades comprendidas entre 350 a 850 kg/m³ también utilizando el valor medio del perfil resistográfico obteniendo coeficientes de determinación de 0,94.

La técnica del resistógrafo es muy precisa y sensible, moderadamente rápida de ejecutar y ampliamente utilizada. Sin embargo, su carácter puntual, junto con la dificultad de conocer el valor real de la densidad a partir de la salida gráfica, sumado al peso y el precio del equipo, pueden suponer su mayor limitación de uso. Con este método se obtienen correlaciones muy altas, pero a costa de una metodología de ensayo lenta y una laboriosa posproducción de los datos obtenidos. Por último resaltar que la esbeltez de la broca puede dar lugar a la desviación de su trayectoria recta, causada principalmente por cambios en la resistencia del material a ensayar.

4.8 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN CONSTANTE DE UNA VARILLA

El método consiste en medir la resistencia que ofrece la madera a la introducción de una varilla de acero a velocidad constante mediante un dispositivo diseñado al uso, figura 6. El dispositivo registra la fuerza ejercida mediante una célula de carga y mide la profundidad de penetración de la varilla en cada momento. Los datos obtenidos son almacenados automáticamente en un ordenador para su posterior procesado. La punta de la varilla tiene forma esférica de tal manera que cuando atraviesa la madera, el orificio dejado por esta es mayor que el diámetro de la varilla. Esto permite que la medida de resistencia sea referida solo a la resistencia necesaria para introducir la esfera.

Es un método poco invasivo ya que ocasiona un orificio de 2 a 3 mm de diámetro de profundidad variable. Al igual que con otros métodos descritos, este ensayo se considera destructivo en caso de que la pieza a ensayar tenga acabado superficial a conservar.

Una de las principales dificultades de esta metodología reside en la necesidad de fijar de manera solidaria el dispositivo a la pieza a analizar. Cualquier fallo en la fijación deriva en un error de lectura. En la figura 7 se muestran las tres posibles formas de fijación.

El uso del dispositivo se limita a maderas de densidad baja a media debido a su funcionamiento. En maderas de densidad media a alta, la fuerza necesaria para introducir la varilla es tan elevada que se torna impracticable. Otra dificultad a señalar es que las medidas solo pueden ser realizadas en dirección radial, lo que provoca que el método sea de difícil utilización en obra donde es muy frecuente desconocer la dirección de ensayo. Al igual que sucede con el resistógrafo este sistema presenta un proceso de ensayo lento y una laboriosa posproducción de los datos obtenidos.

Tippner *et al.* (2011) y Kloiber *et al.* (2012b) realizaron en ensayos en probetas acondicionadas de *Picea abies* (L.) Karst., *Abies alba* Mill. y *Pinus sylvestris* L. relacionando la fuerza media de penetración de la varilla con la densidad de las piezas, obteniendo valores de 0,70 a 0,78 de R^2 con un nivel de significación del 0,05. Por otro lado, Kloiber *et al.* (2012a) realizaron ensayos en madera de derribo de *Abies alba* Mill. y *Pinus sylvestris* L., también correlacionado la fuerza media de penetración de la varilla con la densidad de las piezas, obteniendo valores de 0,84 % de R^2 con un nivel de significación del 0,05.

Hasta la fecha, el método es poco extendido y su utilización está centrada en el grupo de investigación checo que desarrolló el equipo.

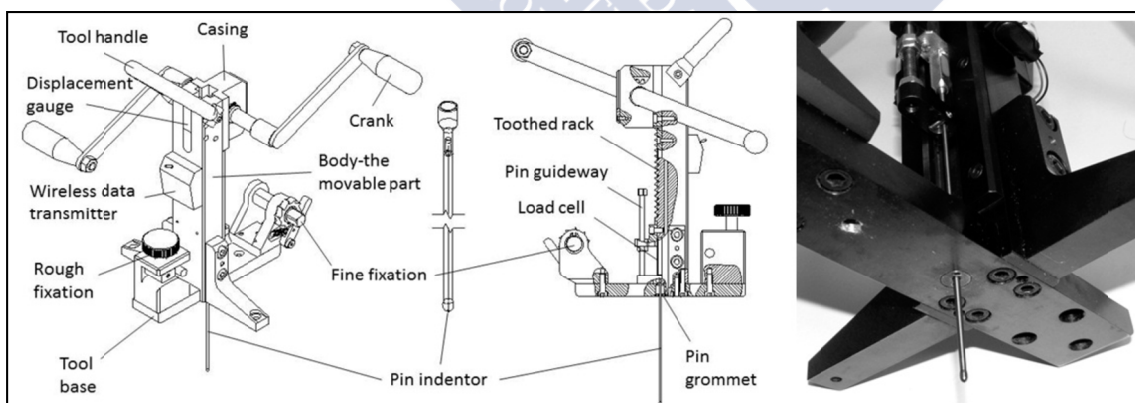


Figura 6: Vista axonométrica y lateral del dispositivo (Tippner *et al.* 2011)

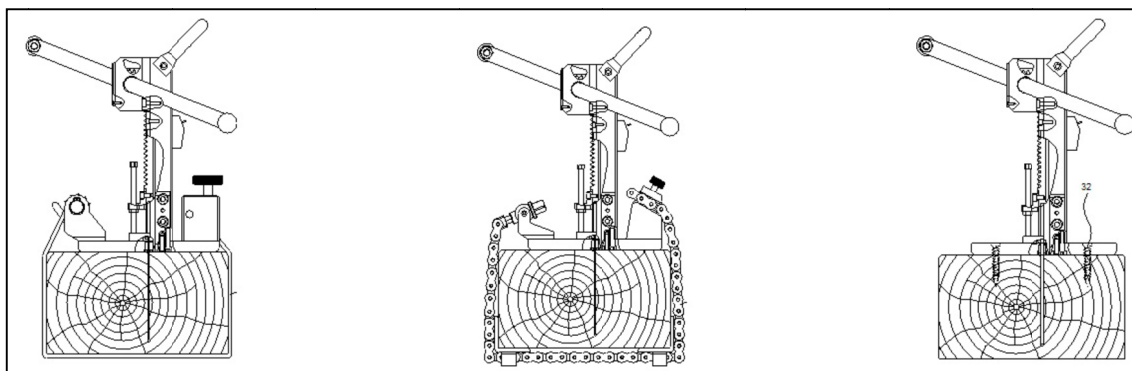


Figura 7: Diferentes tipos de fijación del dispositivo de introducción de varilla. De izquierda a derecha: con correa, con cadena y mediante tirafondos (Kloiber *et al.* 2012b)

4.9 EXTRACCIÓN DE PROBETAS TESTIGO

Se trata de una técnica que, como su nombre indica, consiste en extraer una muestra de madera cilíndrica por medio de diferentes medios mecánicos. El tipo de medio mecánico condicionará las características particulares de las probetas. Estas características son principalmente el tamaño (diámetro y longitud), el acabado superficial dejado por la herramienta, el tipo de madera del que se puede obtener la muestra (madera seca o verde) y finalmente el daño producido en la madera objeto del ensayo.

Esta técnica es utilizada para identificación de especies mediante microscopía, búsqueda de signos de pudrición, así como para inspección visual y comprobación de penetración y retención de tratamiento preventivos (Ross *et al.* 2004). Los orificios dejados por esta técnica deben taparse para evitar la penetración de humedad e insectos, para disminuir la posibilidad de pudrición o por razones estéticas en estructuras existentes con cierto valor artístico (Kasal 2003).

Es la técnica más invasiva dentro de todas las mencionadas, aunque los orificios dejados no merman la resistencia de los elementos ensayados (Kasal & Anthony 2004). En caso de que la pieza a ensayar tenga acabado superficial a conservar este ensayo es destructivo y totalmente desaconsejable.

A continuación se comentaran cuatro métodos para obtener dichas probetas testigo. El primero de ellos para madera en verde y los restantes para madera seca.

4.9.1 Barrena Pressler

La Barrena Pressler es la herramienta manual de extracción de muestras de madera en pie más utilizada. La muestra extraída en sentido radial es un cilindro de 5 mm de diámetro con el que se puede determinar la edad del árbol, el grosor de los anillos de crecimiento, diferentes características anatómicas de la madera y detectar alteraciones en el interior del tronco (Mitchell 1958). En apariencia es una herramienta sencilla pero requiere experiencia, tanto en el uso como en el mantenimiento de la misma para obtener muestras de gran calidad (Maeglin 1979). Es un método invasivo, pudiendo convertirse en un vector de patógenos entre árboles

si no se toman las medidas oportunas de desinfección de la barrena antes de cada toma de muestras.

Se ha utilizado para la estimación de la densidad básica de madera en pie (Michell & Wheeler 1959, y Maeglin 1973). Además permite un mayor análisis de factores tales como el contenido de humedad de madera y la identificación de especies en conjunción con otras técnicas (Bethge *et al.* 1996).

El principal inconveniente radica en que no es posible extraer muestras en madera seca, lo que imposibilita su uso en inspección de estructuras existentes.

4.9.2 Sistema de barrena desarrollado por Kasal

Se trata de un sistema completo que consta de una taladradora a batería modificada con un porta barrena y una barrena diseñada al efecto, figura 8. También posee un sistema de utillaje que permite fijar el dispositivo a la madera a ensayar. La probeta extraída posee 4,8 mm de diámetro y el orificio dejado en la madera ensayada es de 10 mm de diámetro. La longitud de la muestra debe tener al menos 20 mm, que corresponden con los requerimientos de la normativa europea para ensayos de compresión (Kasal 2003 y Kasal & Tannert 2011).

Esta probeta es utilizada en un ensayo de compresión paralela a la fibra para estimar las demás propiedades mecánicas de la madera. Además, para obtener directamente la densidad y humedad de la madera (Kasal 2003 y Kasal & Tannert 2011).

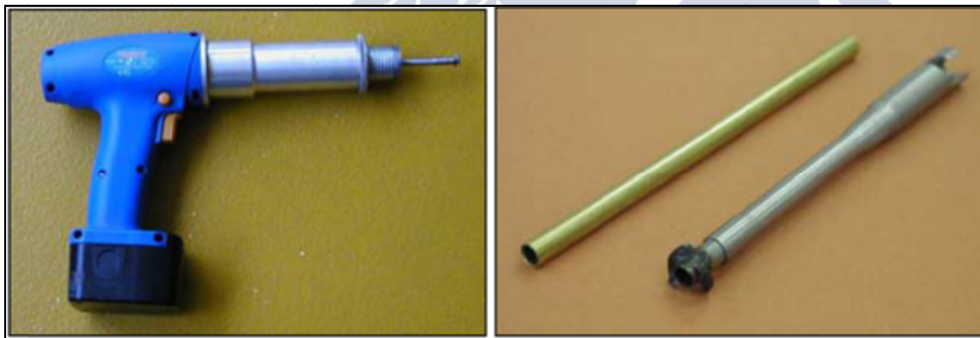


Figura 8: Sistema de extracción de probeta testigo y barrena (Kasal & Tannert 2011)

4.9.3 Barrena del “Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Academy of Sciences of the Czech Republic”

Esta barrena está diseñada por el “Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Academy of Sciences of the Czech Republic” (en español: Instituto de Mecánica Teórica y Aplicada de la Academia de Ciencias de la Republica Checa) para ser compatible con las investigaciones llevadas a cabo por Kasal (2003) y es accionada por una taladradora eléctrica convencional, figura 9. La probeta extraída con este método presenta 4,8 mm de diámetro y al menos 20 mm de longitud. El orificio dejado en la madera es de 10 a 12 mm de diámetro. Con ella se realizaron ensayos en *Picea abies* (L.) Karst. y *Abies alba* Mill. dando como resultado

coeficientes de determinación de 0,89 para pequeñas piezas de madera libre de defectos y 0,55 para piezas de madera de mayor tamaño (Kloiber & Kotlínová 2006).



Figura 9: Extracción de probeta testigo radial con la barrena diseñada por el “Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Academy of Sciences of the Czech Republic” (Kloiber & Kotlínová 2006)

4.9.4 Extracción mediante broca de corona

En este caso se utilizan brocas de corona convencionales de diferentes diámetros a las que se les ha extraído la broca helicoidal guía, figura 10. Con estas brocas convencionales cualquiera puede reproducir los experimentos sin necesidad de grandes medios. Su principal problema es el embotamiento o colmatación de las virutas extraídas causado por la dificultad de evacuación de residuos que presenta este tipo de brocas en diámetros pequeños (inferiores a 30 mm). Esto se debe a que el diseño de los dientes de corte está optimizado para cortar metal. La longitud de las probetas extraídas suele estar limitada aproximadamente a 35 o 40 mm por el diseño de la broca.



Figura 10: Broca de corona de 22 mm de diámetro y probetas testigo extraídas con la misma (Montón 2012)

Montón (2012) realizó extracciones en madera de *Pinus radiata* D. Don mediante una corona de 22 mm de diámetro exterior obteniendo unas probetas de 16 a 17 mm de diámetro, con longitudes de hasta 20 mm. Estas extracciones se realizaron en dirección perpendicular a la cara y otra al canto (radial y tangencial) para cada pieza. El resultado del estudio mostró coeficientes de determinación de 0,88 entre la media aritmética de la densidad de la probeta testigo obtenida en dirección radial y tangencial. Además cabe destacar que no se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre las densidades obtenidas en ambas direcciones.

Íñiguez *et al.* (2015) por su parte comparan los resultados de la estimación de la densidad de pino radiata utilizando dos brocas de corona diferentes. Los diámetros exteriores de broca eran de 22 y 14 mm, extrayendo probetas de 16 y 10 mm. La comparativa dio lugar a resultados similares con coeficientes de determinación de 0,80. Cabe destacar que las probetas de 10 mm de diámetro presentaron mayor densidad que la madera ensayada.

4.10 INSPECCIÓN CON TALADRADORA

El sondeo con taladradora es utilizado por algunos expertos para determinar las condiciones y posibles patologías bióticas en estructuras existentes, observando y evaluando la apariencia del residuo y evaluando la resistencia al taladrado. A través de los orificios, con ayuda de un endoscopio, se puede observar el estado del interior de las piezas en búsqueda de agentes bióticos (Arriaga *et al.* 2002). La taladradora es una máquina muy útil en la evaluación de estructuras existentes, es económica y fácil de usar.

Esta técnica es menos invasiva que la extracción de probetas testigo, pero al igual que en esta, es recomendable tapar los orificios para evitar la penetración de humedad e insectos. En caso de que la pieza a ensayar tenga acabado superficial a conservar, este ensayo es destructivo y totalmente desaconsejable.

La taladradora permite el acople de sistemas que transforman su uso de una herramienta cualitativa a una cuantitativa y repetible. A continuación se muestra un ejemplo.

Extractor de muestras para cuantificación de microorganismos en la madera

Se trata de un dispositivo compuesto por una broca especial, un sistema de guía con tope de profundidad y una cámara o recipiente de almacenamiento de las virutas extraídas, figura 11. Este sistema permite la recolección de madera en forma de virutas para su posterior análisis en busca de contaminantes microbianos. Al poder fijar la profundidad de taladrado se pueden obtener volúmenes constantes de extracción. A pesar de esto, el diseño no permite la recolección total de las virutas generadas, impidiendo su utilización para estimar densidades. Es necesario limpiar y desinfectar el dispositivo después de cada uso para evitar que las muestras se contaminen (Dutkiewicz *et al.* 2012).

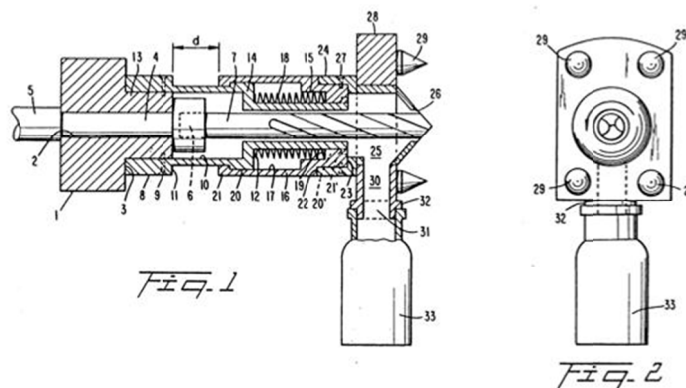


Figura 11: Diagrama del Extractor de muestras para cuantificación de microorganismos en la madera extraído de US Patent Number: 5,078,553 (Dutkiewicz *et al.* 2012)

5. DESARROLLO TECNOLÓGICO PREVIO

En este capítulo se detallan los desarrollos tecnológicos llevados a cabo para hacer posible la investigación de esta Tesis. A pesar de pertenecer a los métodos desarrollados en la investigación, este tema se expone de manera independiente por formar parte de un desarrollo previo y poseer entidad propia.

De forma resumida, este capítulo recoge los pasos que se han seguido durante todo el proceso de diseño, fabricación y optimización del equipo Extractor de Virutas que ha dado lugar a un total de cinco prototipos de los cuales tres son prototipos funcionales de laboratorio. Este proceso finaliza con el diseño y fabricación de los prototipos industriales. Para terminar el capítulo se incluye el desarrollo y protocolo de uso de la cámara de humectación.

5.1 DESARROLLO DEL EXTRACTOR DE MUESTRAS DE MADERA O EXTRACTOR DE VIRUTAS

La Tesis se centra en el estudio del comportamiento del dispositivo Extractor de Virutas y en su comparación con métodos y equipos convencionales de ensayos no destructivos.

En primer lugar se realizó un estudio de los métodos no destructivos utilizados en la actualidad para estimar la densidad de la madera, caracterizando sus ventajas y desventajas tal y como se recoge en el capítulo de Antecedentes. Analizando estos datos se concluyó que estos métodos se pueden dividir en dos grupos:

- Sencillos, rápidos y de precisión moderada ($0.3 - 0.6 R^2$) (Bobadilla *et al.* 2007 y Montón 2012).
- Complejos, de coste y tiempos de aplicación elevados, y de alta precisión ($0.8 - 0.9 R^2$) (Mariño *et al.* 2002 y Acuña *et al.* 2011).

Dado que ninguno de los actuales métodos cumplía con las especificaciones deseadas (mencionadas en el capítulo de Introducción), se optó por desarrollar un nuevo método.

La fiabilidad del sistema de extracción de probetas testigo es conocida, sin embargo este método es muy invasivo sobre la pieza examinada. En la extracción de un cilindro de 10 a 22 mm de diámetro, el orificio resultante en la pieza examinada es de 20 a 45 mm de diámetro. Por tanto la cuestión que se plantea es: ¿Por qué no sacar el volumen equivalente al cilindro de madera en forma de virutas y así el orificio resultante en la pieza sería de menor diámetro? Con esta idea se inició el proceso de diseño de un prototipo capaz de extraer y

recoger la totalidad de las virutas generadas durante el taladrado. Como requisito imprescindible, este dispositivo debía tener la capacidad de limitar la profundidad del taladrado para extraer un volumen constante de madera.

5.1.1 Funcionamiento del dispositivo

El dispositivo se acopla a una taladradora comercial y permite recoger todas las virutas que se producen durante el taladrado en un filtro de papel monouso. La técnica de uso implica fijar el diámetro de broca y la profundidad de taladrado, estableciendo así un volumen conocido de extracción. Tras el taladrado y la recogida de virutas en el filtro, se pesa la muestra descontando el peso del filtro, con la finalidad de estimar la densidad de la madera ensayada. Una vez estimada la densidad, esta se puede correlacionar con otras propiedades físico-mecánicas. Por otro lado, a través de la observación de la muestra de virutas se pueden detectar e identificar patologías de orden biótico en la madera ensayada.

5.1.2 Diseño y desarrollo de prototipos

El diseño y la fabricación de los prototipos fueron llevados a cabo por el doctorando. La fabricación fue manual utilizando técnicas de modelado y moldeo.

En cuanto a la nomenclatura de los prototipos en el proceso de desarrollo de un nuevo producto, las diferentes fases del producto se denominan: prototipo de laboratorio, prototipo industrial y producto final o comercial. El prototipo de laboratorio se caracteriza por estar diseñado únicamente para que funcione, sin prestar atención a otros factores importantes como la ergonomía o el aspecto global.

Los prototipos 1 y 2 se utilizaron para hacer comprobaciones de viabilidad, ambos son prototipos de comprobación en laboratorio. El prototipo 3 se utilizó para fijar las variables de los sistemas adicionales que se acoplan al dispositivo. Este fue el primer prototipo funcional de laboratorio. Con los prototipos 4 y 5 se llevó a cabo el estudio principal de la presente Tesis Doctoral, ambos prototipos funcionales de laboratorio. Finalmente se desarrollaron dos modelos de prototipos industriales.

PRIMER PROTOTIPO

El primer prototipo se fabricó a partir de fibra de vidrio, resina de poliéster y tubos de PVC, figura 12. Este prototipo inicial se utilizó para comprobar que el mecanismo de aspiración y encapsulado de astillas era viable.



Figura 12: Primer prototipo. En esta imagen se observa el primer prototipo elaborado de forma manual y acoplado a una taladradora convencional. Por otro lado se observan los elementos móviles: arriba el cartucho que acoge el filtro; localizada bajo el taladro, la bolsa de recogida de la muestra de virutas

SEGUNDO PROTOTIPO

El segundo prototipo se fabricó a partir de fibra de vidrio, resina de poliéster, tubos de PVC, masilla epoxi y muelles, figura 13. Se trata del primer modelo funcional de laboratorio. Este prototipo se utilizó para realizar las primeras comprobaciones sobre la validez de la técnica y la posibilidad de llevar a cabo estimación de la densidad a través del mismo.



Figura 13: Segundo prototipo. La imagen recoge los componentes móviles (cartucho y filtro) y se puede apreciar los cambios en los materiales usados para su construcción

TERCER PROTOTIPO

Este modelo fue fabricado a partir resina de poliuretano, tubos de PVC, masilla epoxi y muelles, figura 14. Este ya se constituye como un prototipo de laboratorio totalmente funcional, integrando mejoras en el sistema de aspiración, la fiabilidad y la robustez.



Figura 14: Tercer prototipo. Se aprecia el desarrollo en la técnica de fabricación que caracteriza a este modelo como totalmente funcional

Descripción del dispositivo funcional – tercer prototipo:

En este apartado se describe el dispositivo funcional (Martínez & Bobadilla 2013) de acuerdo con la numeración establecida en las figuras 15, 16 y 17 que se describen a continuación.

El dispositivo consiste en dos tubos coaxiales (1) con la broca (8), que forman un sistema telescópico (2) accionado por muelles (7). Este conjunto permite que al realizar el taladrado, el tubo de aspiración (1) esté siempre en contacto con el material a taladrar, impidiendo la pérdida de virutas. Las virutas producidas al taladrar son aspiradas por la succión generada por la turbina del sistema de refrigeración de la taladradora (9). Estas se desplazan por los tubos y se alojan en el filtro de papel (4), el cual se encuentra en un cartucho extraíble (3). Del cartucho se extrae el filtro que contiene las virutas para su pesaje y análisis. El dispositivo se sujeta a la máquina por dos puntos. El primero de ellos está en la parte trasera de la taladradora, y consiste en una estructura (5) que envuelve la toma de aire (10). Esta estructura, además la función de sujeción, canaliza el aire aspirado por la taladradora. El segundo punto de sujeción se encuentra en la parte delantera de la taladradora y consiste en una abrazadera (6) que encaja por medio de un clic en la taladradora.

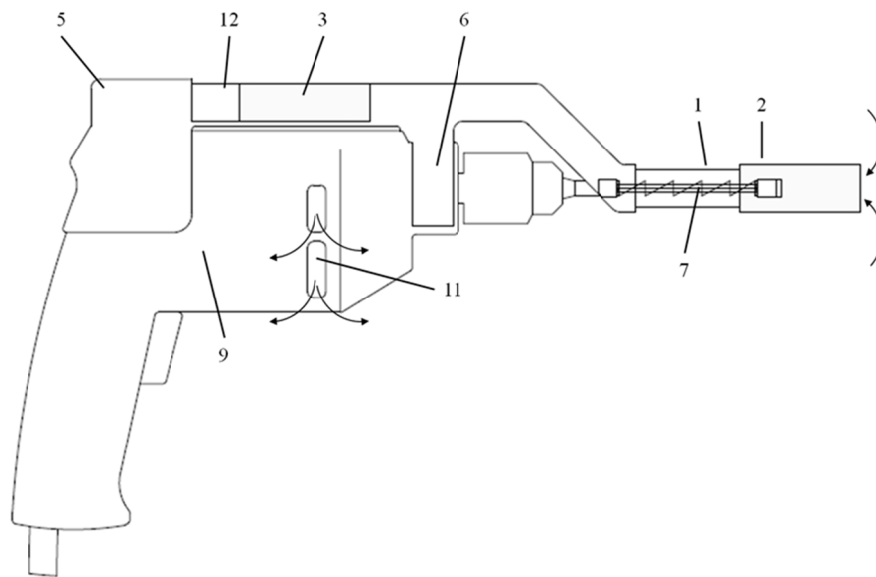


Figura 15: Vista lateral del dispositivo extractor de muestras acoplado a una taladradora eléctrica. Las flechas indican el flujo del aire (Martínez & Bobadilla 2013)

Al poner en marcha la taladradora, la turbina del interior del mismo absorbe aire a través de las tomas de aire que se encuentran sobre la empuñadura y lo expulsa a través de los orificios laterales (11). Acoplando el dispositivo a la toma de aire (10) por medio de una estructura de capuchón (5) se canaliza esta aspiración dentro del tubo coaxial hasta la zona de taladro, haciéndolo funcionar.

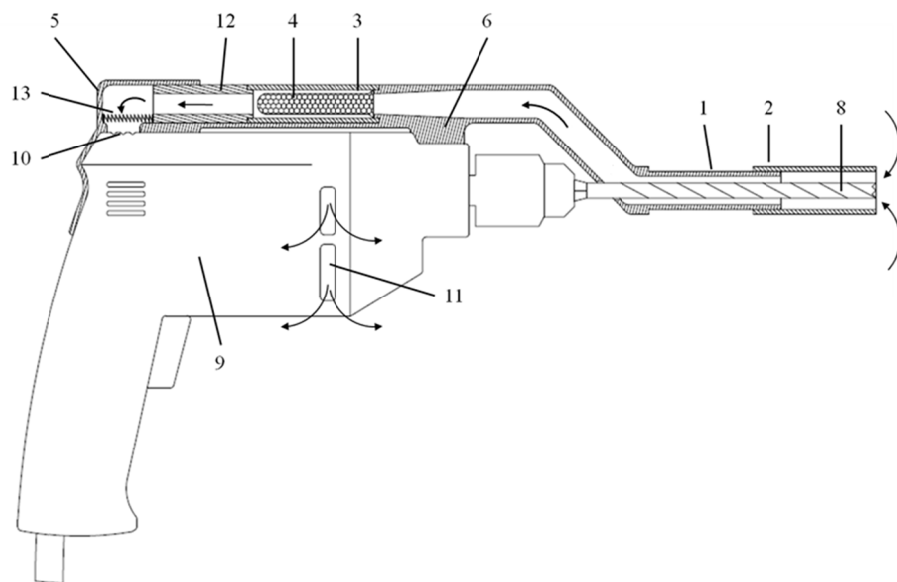


Figura 16: Corte longitudinal del dispositivo extractor de muestras acoplado a una taladradora eléctrica. Las flechas indican el flujo del aire (Martínez & Bobadilla 2013)

Antes de poner en funcionamiento el dispositivo se introduce un filtro de papel (4) dentro del cartucho (3). Este se coloca en el dispositivo y se ajusta por medio de un tubo telescópico

(12) accionado por un muelle (13). El filtro de papel (4) con forma de bolsa recoge las virutas y el polvo producido en el taladrado y deja pasar el aire aspirado. Es de un solo uso y una vez retirado del cartucho (3) sirve como almacenaje de las virutas para su análisis.

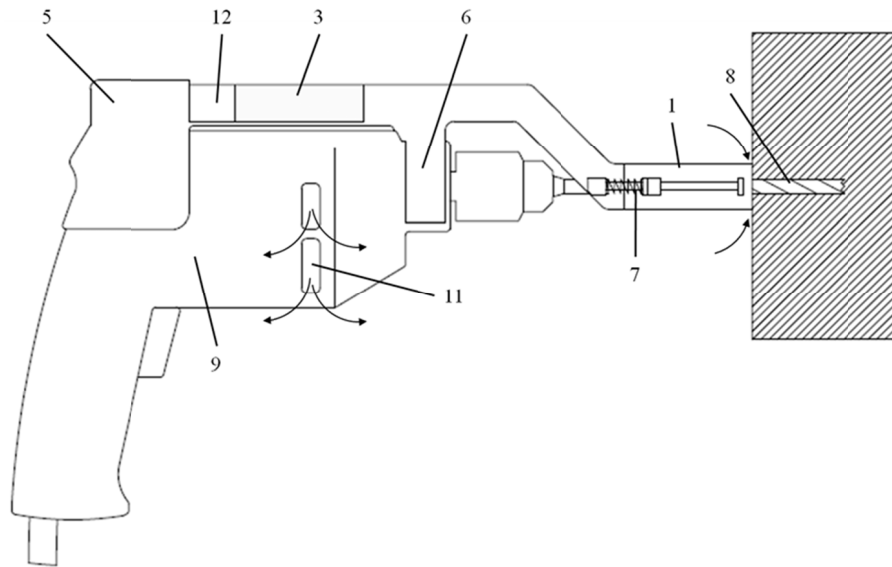


Figura 17: Vista lateral del dispositivo extrayendo una muestra. Las flechas indican el flujo del aire (Martínez & Bobadilla 2013)

Con este prototipo se fijaron las principales variables de ensayo (diámetro y profundidad del orificio, tipo de broca, modelo de taladradora, tipo de filtro monouso), se analizó el comportamiento del dispositivo y su influencia en las virutas extraídas y se confeccionó el protocolo de ensayo a seguir. Así mismo se realizaron los primeros análisis de estimación en madera de conífera (Bobadilla *et al.* 2013; Calvo, 2013).

En modelo utiliza una broca de 3 puntas de 8 mm de diámetro y 200 mm de longitud y filtros de té tamaño XS como filtros monouso (ver apartados 7.2.1 y 8.1). El valor nominal del material extraído es $\text{Ø}8 \times 50 \text{ mm}$ ($2,51 \text{ cm}^3$).

CUARTO PROTOTIPO

La experiencia obtenida durante los primeros análisis de Bobadilla *et al.* (2013) y Calvo (2013) (recogida en apartados 7.2.2 y 8.2, segunda fase), impulsó la mejora del equipo teniendo como resultado el cuarto prototipo, figura 18. Este, fue fabricado a partir resina de poliuretano, tubos de PVC, masilla epoxi y muelles. El cuarto modelo se puede definir como un prototipo de laboratorio pre-industrial. Utiliza los mismos parámetros que el prototipo 3 (broca, filtro monouso y taladradora), mejorando la ergonomía, la robustez, la capacidad de extracción y la fiabilidad. El valor nominal del material extraído es $\text{Ø}8 \times 47 \text{ mm}$ de profundidad ($2,36 \text{ cm}^3$). La mayor restricción de este prototipo radica en la necesidad de acceso a la red eléctrica para su funcionamiento.



Figura 18: Cuarto prototipo. Se aprecia el cambio de colocación de la toma de aire del dispositivo mejorando su ergonomía

QUINTO PROTOTIPO

Con el objetivo de obtener un equipo totalmente portátil y eliminar la dependencia de acceso a una fuente de alimentación externa, se desarrolló el quinto prototipo. Para ello, cuenta con un sistema de aspiración y de alimentación propio y se acopla a una taladradora a baterías. El quinto prototipo es un prototipo de laboratorio portátil, figura 19.

Este modelo fue fabricado a partir resina de poliuretano, tubos de PVC, masilla epoxi y muelles. En él se mejoró la ergonomía y la portabilidad. En este caso utiliza una broca de 3 puntas de 7 mm de diámetro y 150 mm de longitud y filtros de té tamaño S como filtros monouso. Permite profundizar más obteniendo un volumen extraído similar. El valor nominal del material extraído es $\text{Ø}7 \times 65 \text{ mm}$ ($2,50 \text{ cm}^3$).

El cartucho y el filtro requeridos para este equipo son de mayor tamaño debido al aumento del volumen aparente de la extracción que se acumula dentro del filtro. El tamaño de las virutas y la forma de las mismas con este tipo de taladradora favorecen un aumento de los espacios vacíos entre virutas. El aumento del tamaño de la viruta es debido a las bajas revoluciones de corte de la broca producidas por el taladro a batería.

En este modelo, la conducción de las virutas no se realiza por tubos axiales a la broca como ocurre en los prototipos anteriores, lo que requería un diseño específico para la boca o tobera de aspiración. Este utiliza un sistema de ciclón y la fuerza centrífuga de las virutas para evitar el riesgo de pérdidas de virutas.

Durante el taladrado, las virutas son disparadas siguiendo una trayectoria tangencial a la broca en sentido horario. El sistema de ciclón está accionado gracias a la aspiración tangencial a la tobera, el cual fuerza al aire aspirado a moverse en sentido horario. Este sistema favorece la succión de las virutas por ese movimiento, figura 20.



Figura 19: Quinto prototipo

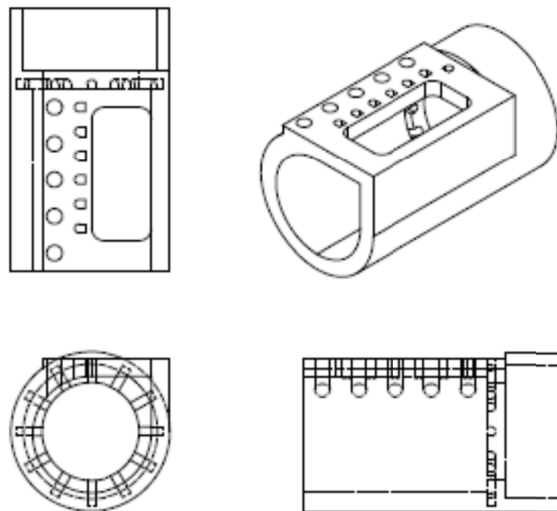


Figura 20: Vistas de la tobera de aspiración o ciclón

Como se comentó anteriormente con los prototipos 4 y 5 se llevó a cabo el estudio principal de la presente Tesis Doctoral.

5.1.3 Prototipo industrial

Se realizaron dos modelos 3D de prototipo industrial mediante Autodesk Inventor incluyendo mejoras de diseño. Se produjeron cuatro modelos utilizando impresión 3D de tipo FDM (figura 21) y SLS. Con cada una de las técnicas se fabricó un modelo eléctrico basado en los valores nominales del cuarto prototipo y otro a batería basado en los valores nominales del quinto prototipo.



Eléctrico



A baterías

Figura 21: Prototipos impresos en FDM

5.2 DESARROLLO DE LA CÁMARA DE HUMECTACIÓN

Para estimar la humedad y la densidad corregida de la madera es necesario tener un amplio rango de densidades y humedades. La primera variable se resuelve con la elección de las especies a estudiar. La segunda se antoja más compleja ya que es necesario estabilizar madera a contenidos de humedad que varían del 5 al 25%. El problema surge en la obtención de madera con humedades mayores o iguales al 15%, dado que los laboratorios a los que se tenía acceso no poseían equipamiento capaz de lograrlo.

Por esta razón se decide diseñar y fabricar un dispositivo que permita a la madera alcanzar humedades iguales o superiores a 15% H. Este dispositivo debía reunir las siguientes características:

- Valerse de la higroscopicidad de la madera.
- Crear las condiciones ambientales necesarias para que la madera alcanzara la humedad deseada. Humedad relativa del aire interior mayor o igual al 95% y temperatura ente 10 y 20° C. En estas condiciones la madera alcanza su mayor contenido de humedad por adsorción, figura 22 (Kollman, 1959).
- Impedir cualquier contacto entre la madera y el agua.

Con estas premisas se desarrolló el dispositivo y el protocolo de uso correspondiente.

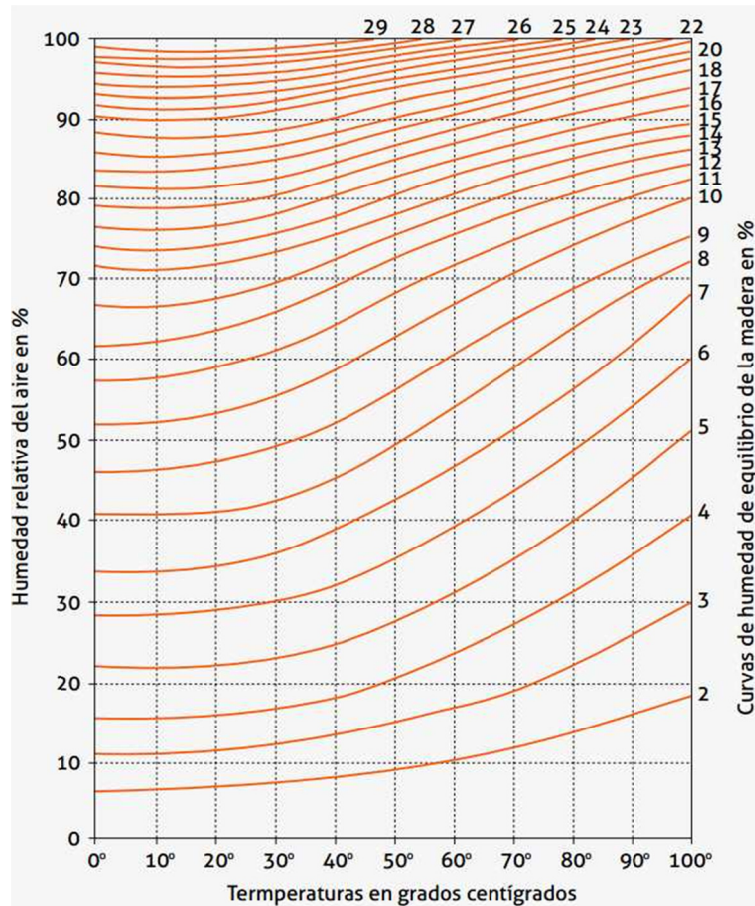


Figura 22: Ábaco de Kollman (Vignote, 2006)

5.2.1 Descripción del dispositivo

El dispositivo consiste en una cubeta de plástico con tapa estanca en cuyo interior se encuentran tres pares de soportes alzadores de tablero laminado de alta presión (HPL) donde se colocan las probetas, figura 23. Estos soportes separan a las probetas de la lámina de agua que se encuentra en el fondo de la cubeta. A su vez, sobre ellos se encuentra un recubrimiento de plástico alveolar cuya función es minimizar la superficie de contacto, maximizar la superficie de intercambio gaseoso de la probeta y evitar el acceso de humedad del HPL a la madera, figura 24.

La tapa presenta cuatro deflectores que previenen la caída del agua de condensación sobre las probetas, redirigiéndola a los espacios entre soportes. Además, estos deflectores están colocados de tal forma que al abrir la tapa descargan la condensación lejos de las probetas. Esta es una característica importante ya que en el interior de la cámara el aire se encuentra saturado y cualquier disminución de temperatura haría que se alcanzase el punto de rocío. En ningún caso se permite el aumento de humedad de la madera por medio del contacto directo con el agua.

Para acelerar el proceso y mantener homogéneas las condiciones dentro de la cámara, el dispositivo cuenta con un ventilador que incide con un pequeño ángulo sobre la lámina de

agua. Esto permite que la evaporación del agua sea más rápida a la vez que homogeneiza la humedad del aire en su interior. Este flujo de aire crea una bajada de presión atmosférica localizada, que a su vez provoca una disminución en la presión de vapor del agua lo que produce una mayor evaporación en comparación con condiciones estáticas. El ventilador cuenta con un temporizador que permite controlar la actuación del mismo de acuerdo con las necesidades, establecidas para este caso en 15 minutos cada tres horas. Finalmente, para garantizar la temperatura constante se introduce el dispositivo en la cámara de acondicionamiento a 20°C.

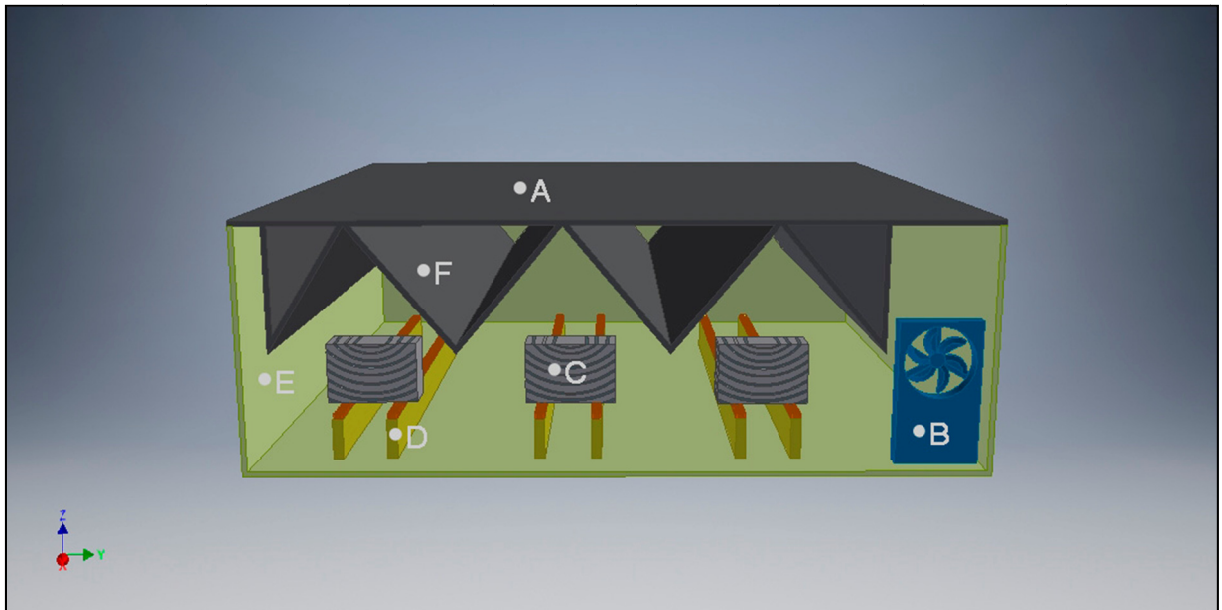


Figura 23: Esquema de la cámara de humectación. A: tapa, B: ventilador, C: probeta de madera, D: soporte, E: cubeta y F: deflector

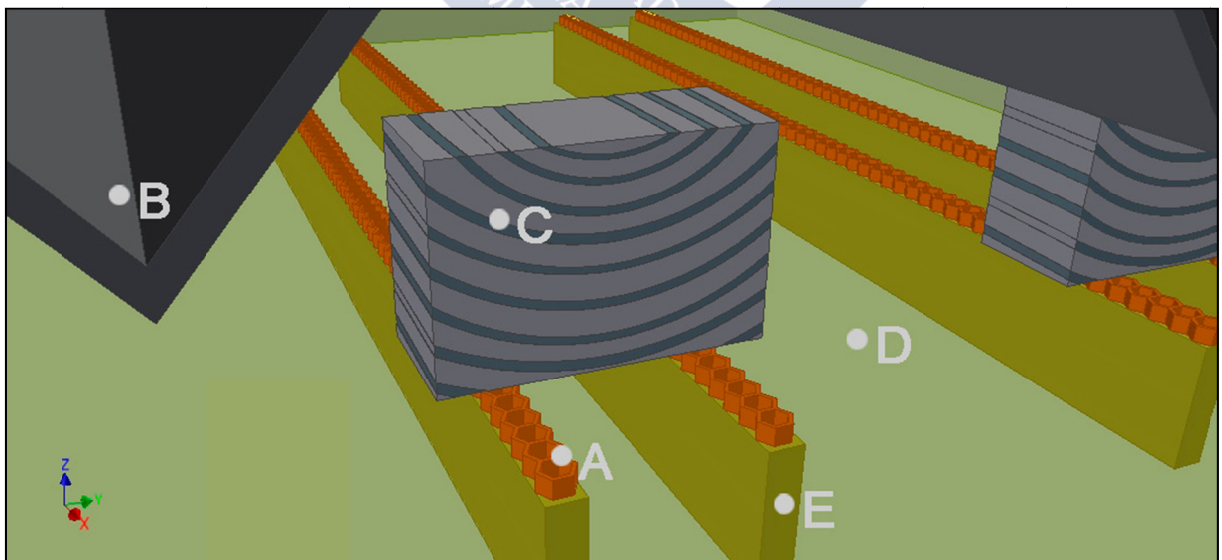


Figura 24: Detalle de la ubicación de la probeta sobre los soportes. A: recubrimiento alveolar, B: deflector, C: probeta de madera, D: cubeta y E: soporte

5.2.2 Protocolo de uso

En este apartado se describe el protocolo desarrollado específicamente para el correcto funcionamiento de la cámara de humectación.

En primer lugar se llena de agua el fondo de la cubeta hasta alcanzar 2 o 3 cm de profundidad, evitando mojar el recubrimiento alveolar de los soportes. Se colocan las probetas centradas en cada par de soportes, se conecta el ventilador y se tapa. Es necesario controlar diariamente el peso de cada probeta. En el momento en que las probetas alcanzan el peso que corresponde con la humedad deseada, se retiran de la cámara y se introducen en una bolsa Zip (estanca) con el objetivo de estabilizar su humedad. Después de una semana se vuelve a pesar cada probeta y se comprueba que no hayan perdido peso. Aquellas probetas que no hayan variado su peso, se consideran estabilizadas. En caso de pérdida de peso se vuelve a introducir en la cámara y se repite el proceso comprobando la estanqueidad de la bolsa.

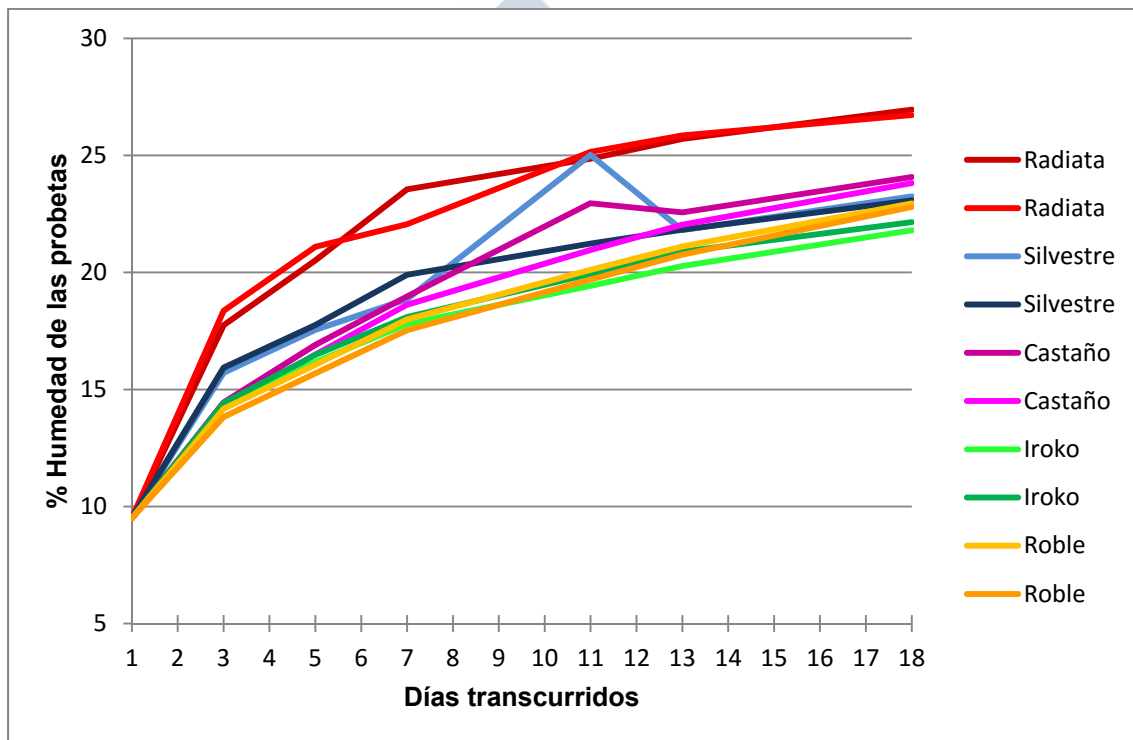


Figura 25: Evolución de la humedad de probetas de diferentes especies de madera dentro de la cámara de humectación (humedad relativa del aire: saturada; temperatura: de 17 a 20 °C)

En la figura 25 se observa la evolución de la humedad de probetas de madera en la prueba de funcionamiento del sistema. Como era de esperar las maderas más densas varían su humedad más lentamente.

6. MATERIALES Y EQUIPOS

En este capítulo se recogen los medios requeridos para la realización de la Tesis así como los materiales y equipos utilizados durante el proceso de la investigación.

6.1 MEDIOS Y EQUIPOS

Las diferentes fases de esta Tesis se desarrollaron principalmente en el Laboratorio de la Unidad Docente (UD) de Industrias de los Productos Forestales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes y Forestales y del Medio Natural (ETSIMFMN) de la UPM y el Laboratorio de Estructuras de Madera del Centro de Investigación Forestal del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (CIFOR-INIA). Por su parte, el Grupo de Investigación de la Universidad Politécnica de Madrid “Construcción con Madera” aportó medios y equipos.

Todos los equipos utilizados en el desarrollo de este estudio se encuentran calibrados conforme a los manuales de cada laboratorio y con la periodicidad requerida en cada caso.

6.1.1 Financiación de la investigación

La financiación de los gastos de la Investigación corrió a cargo de:

- Gastos de la primera, segunda y quinta fase:
 - Medios propios del doctorando.
 - U.D. de Industrias de los Productos Forestales de la ETSIMFMN de la UPM.
 - Asociación de Investigación Técnica de la Madera (AiTiM). Proy.: AiTiM-Fucovasa 2012-13. - Proy.: AiTiM-Fucovasa 2014-15.
- Gastos de la tercera y cuarta fase:
 - Medios propios del doctorando.
 - UD de Industrias de los Productos Forestales de la ETSIMFMN de la U.P.M.
 - UD de Cálculo de Estructuras. Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental. ETSIMFMN de la UPM.
 - Ministerio de Ciencia e Innovación. Plan Nacional I+D+i 2008-2011. Proy.: BIA2010-18858.
 - Ministerio de Economía y Competitividad, Programa Estatal I+D, 2013-2016, Proy.: BIA2014-55089-P.

6.1.2 Equipo humano

El autor, llevó a cabo el diseño y construcción de los dispositivos y equipamientos *Ad hoc*; diseño, control experimental y análisis de los datos de todas las fases, así como los ensayos de la primera, tercera y quinta fase. Por su parte, el doctorando contó con la colaboración de tres alumnos de la ETSIMFMN de la UPM:

- Javier Calvo López, alumno de Proyecto Fin de Carrera (PFC) de Ingeniería Técnica Forestal que realizó los ensayos de la segunda fase o estudio preliminar.
- Rubén Tajuelo Marcos, alumno de PFC de Ingeniería Técnica Forestal que realizó los ensayos de resistencia al arranque de tornillos y de profundidad de penetración de la tercera fase.
- Sergio García González, alumno de Trabajo Fin de Grado (TFG) en Ingeniería Forestal y Tesis de Máster en Ingeniería de Montes que realizó los ensayos de la cuarta fase.

6.1.3 Equipamiento *Ad hoc*

En este apartado se recoge la información relativa a los equipos desarrollados *ex professo* para esta investigación: el extractor de muestras, el extractor de muestras a batería y la cámara de humectación.

6.1.3.1 Extractor de Virutas eléctrico

Equipo desarrollado para la investigación permite extraer y almacenar un volumen de madera constante en forma de virutas en un filtro monouso. El valor nominal de la extracción del equipo es $\text{Ø}8 \times 47 \text{ mm}$ ($2,36 \text{ cm}^3$), y el peso del filtro mono uso utilizado de 0,27 g.

El diseño y desarrollo del Extractor de Virutas se recoge en el apartado 5.1.2: Diseño y desarrollo de prototipos.

6.1.3.2 Extractor de Virutas a batería

Equipo desarrollado para la investigación que permite extraer y almacenar un volumen de madera constante en forma de virutas en un filtro monouso. Este prototipo permite realizar extracciones sin necesidad de estar conectado a la red eléctrica. El valor nominal de la extracción del equipo es de: $\text{Ø}7 \times 65 \text{ mm}$ ($2,50 \text{ cm}^3$) y el peso del filtro mono uso utilizado de 0,40 g.

El diseño y desarrollo del Extractor de Virutas a batería se recoge en el apartado 5.1.2: Diseño y desarrollo de prototipos.

6.1.3.3 Cámara de humectación

Cámara estanca donde mediante aire saturado y sin contacto directo madera - agua, se eleva el contenido de humedad de las probetas de madera.

Consta de una cama de agua, soportes donde se colocan las probetas, deflectores para evitar el goteo por condensación sobre las probetas y un ventilador que permite la homogeneización del contenido de vapor de agua en el aire, además de facilitar la evaporación y por lo tanto el consiguiente estado de saturación del aire.

El diseño y desarrollo de la cámara de humectación se recoge en el apartado 5.2: Desarrollo de la cámara de humectación.

6.1.4 Equipamiento comercial

En este apartado se describen los equipos de laboratorio y material fungible utilizados durante el desarrollo de la Tesis.

Equipos de laboratorio

Aspirador: Para extraer la viruta en la prueba de elección de la broca.

Balanzas: se utilizaron tres balanzas.

Marca GIBERTINI modelo EUROPE 1700 con una capacidad de 1700 g y una precisión de 0,01g, para obtener el peso de las probetas y extracciones, la humedad de las muestras por el método de secado en estufa y para comprobar el acondicionamiento de las probetas.

Marca GIBERTINI modelo EUROPE 600 con una capacidad de 600 g y una precisión de 0,01g, para obtener el peso de las probetas y extracciones, la humedad de las muestras por el método de secado en estufa y para comprobar el acondicionamiento de las probetas.

Marca Mettler Toledo, modelo SB16001, n° inventario LM-05, rango 0-16100 g, resolución 0.01 g, para obtener el peso de las probetas y extracciones y para comprobar el acondicionamiento de las probetas. Este equipo pertenece al Laboratorio de Estructuras de Madera del CIFOR-INIA.

Calibre: Marca MITUTOYO; modelo: ABS DIGIMATIC CALIPER Series 500-153; Rango: 0 - 300 mm; Resolución: 0,01 mm; Precisión: 0,03 mm. Utilizado en el dimensionado de las piezas y orificios.

Cámaras climáticas. Se utilizaron dos cámaras diferentes.

Marca IBERCEX con unas dimensiones útiles de 2,84 x 1,77 x 2,90 m. Se utilizó para el acondicionamiento de las probetas. La temperatura y humedad relativa del interior de la cámara son de 20 ± 2 °C y de 65 ± 5 % las cuales les otorgan a las probetas una humedad cercana al 12%, que es la necesaria para la realización normalizada de los ensayos en laboratorio.

Marca FRIVOL, numero de inventario LM-10. Este equipo pertenece al Laboratorio de Estructuras de Madera del CIFOR-INIA.

Cámara fotográfica: Para dejar registro fotográfico del proceso del proyecto.

Estufa de Secado: Marca SELECTA con una capacidad de 450 x 600 x 500 mm y capaz de llegar a los 300 °C. Se utiliza para la obtención de la humedad según el método de secado en estufa (Norma UNE – EN 13183 – 1).

Equipo de Arranque de Tornillos: Marca Fakkopp Entreprise. 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.

Lupa binocular con sistema de adquisición de imágenes: Marca NIKKON modelo SMZ-10 binocular con objetivo regulable de 0,66x a 4x. Está conectado a un sistema fotográfico digital FireWire a color para análisis y documentación marca LEICA modelo DFC 420 de 5.0 Mpixel, que a su vez está conectado a un ordenador para conseguir las fotografías en formato digital. Para realizar el análisis visual de elección de la broca, las probetas testigo y el estudio de los restos y detritos para la identificación de la patología de la madera.

Luz fría incidente: Marca SCHOTT modelo KL1500LCD. Utilizada como fuente de luz para el análisis visual llevado a cabo con la lupa binocular.

Microscopio marca NIKON modelo OPTIPHOT-2. Cuenta con objetivos de x4, x10, x20, x40 y x100. Está conectado a una cámara de video marca MOTICAM modelo 2300 de 3.0 Mpixel y con conexión USB 2.0, que a su vez está conectado a un ordenador para conseguir las fotografías en formato digital. Se utilizó complementado a la lupa binocular.

Penetrómetro: Marca Pilodyn modelo 6J Forest. Es un dispositivo que permite aproximar la densidad superficial de la madera mediante un impacto producido por una barra circular de 2,5 mm de diámetro, accionada por un muelle que desarrolla una energía controlada (6 Julios), que se clava en la madera a una profundidad que se relaciona con la densidad. La resolución que ofrece este equipo es de 1 mm.

Taladradoras: se utilizaron dos modelos.

Marca BOSCH, modelo PSB 50. Máquina taladradora de percusión de uso convencional.

Potencia nominal absorbida: 500 W; Potencia útil: 228 W; Velocidad de giro en vacío: 3.000 rpm. Componente del sistema de taladrado de los prototipos 3 y 4.

Marca BOSCH, modelo GSB 1600RE. Máquina taladradora de percusión profesional.

Potencia nominal absorbida: 700 W; Potencia útil: 351 W; Velocidad de giro en vacío: 3.000 rpm. Con ella se realizaron los taladros para extraer las probetas testigo.

Taladradora a batería: Marca Makita, modelo HP457D. Máquina taladradora de uso convencional con batería de 18V. Componente del sistema de taladrado del prototipo 5.

Tamiz: Con 0,85 mm de luz, utilizado para separar la fracción fina de la gruesa en el análisis de la virutas.

Material fungible

Bolsas Zip: Tamaño A4 y tamaño A7 para el almacenaje y estabilización de las probetas y extracciones de viruta del estudio de Estimación de la humedad y la densidad corregida al 12% de contenido de humedad en tres especies con los prototipos 4 y 5.

Brocas:

Las brocas utilizadas en la fase 1 (apartado de 7.2.1 Métodos específicos) para los ensayos de elección de la broca más adecuada fueron:

Para madera:

- 3 puntas: Marca Punta Castillo; Ø 8 x 200 mm.
- Salomónica: Marca Lewis; Ø 8 x 200 mm.
- Plana o de pala: Marca Punta Castillo; Ø 10 x 150 mm.

Para acero: HSS, Marca Bosch; Ø 8 x 150 mm.

Para el funcionamiento de los prototipos durante las extracciones de viruta en madera:

- 3 puntas: Marca Punta Castillo; Ø 8 x 200 mm (Prototipos 3 y 4).
- 3 puntas Pen drill: Marca Fisch; Ø 7 x 150 mm (Prototipo 5).

Filtros de té: Componentes del sistema de recogida de serrín de los prototipos, figura 26.

Marca Shamila, tamaño XS. 62 x 129 mm. Utilizados en los prototipos 3 y 4.

Marca Tea shop of East West Company, tamaño S.76 x 158 mm. Utilizados en el Prototipo 5.

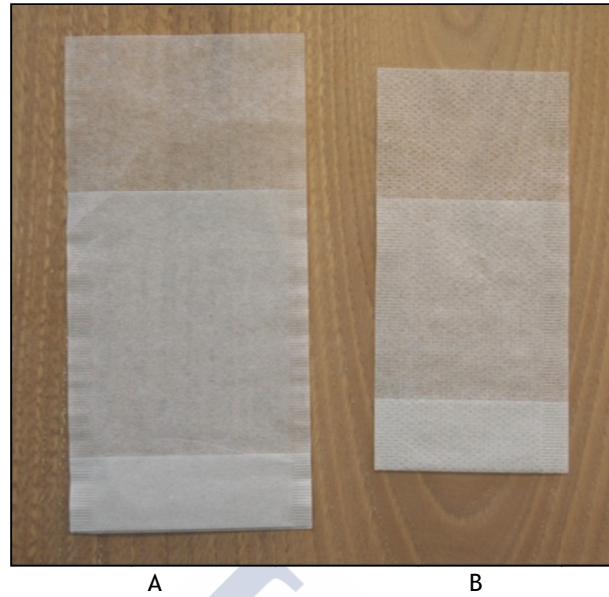


Figura 26: Filtro de té tamaños S (A) y XS (B)

Fresa sacabocados: Para la extracción de las probetas testigo. Marca CMT. Medidas nominales: 10 mm de diámetro interior, 20 mm de diámetro exterior y 150 mm de longitud.

Lima triangular: Para el afilado de la fresa sacabocado.

Serrucho japonés: Para cortar con mayor precisión las probetas testigo a una longitud fija, figura 27.



Figura 27: Serrucho japonés

Tornillos tirafondos: Marca Heco-Fix plus tipo Spax (PZD) cincado 4 x 70. Se utilizó para el ensayo de arranque de tornillo.

6.1.5 Utillaje

Estación de trabajo (*Ad hoc*): Utillaje de sujeción rápida para la realización de los ensayos de extracción de virutas y extracción de probetas testigo, figura 28. Ajustable a los tamaños de las diferentes probetas ensayadas. Permite un rápido posicionado y fijación de las piezas a ensayar otorgando estabilidad y uniformidad en la realización de los ensayos. Esta se sujeta a la mesa por medio de gatos.

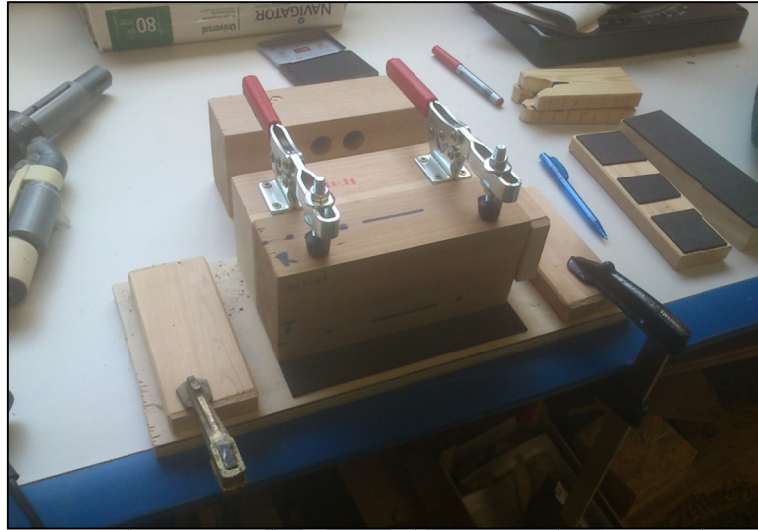


Figura 28: Estación de trabajo con probeta de cedro en posición

Gatos: Utilizados para fijar el soporte de trabajo y la estación de trabajo a la mesa.

Guía de extracción de probetas testigo (*Ad hoc*): Utillaje de madera que permite realizar la extracción de la probeta testigo sosteniendo el taladro a pulso. Permite que la fresa se introduzca en la madera sin peligro para el operario. En la base presenta una capa de goma EVA que actúa como antideslizante, figura 29.

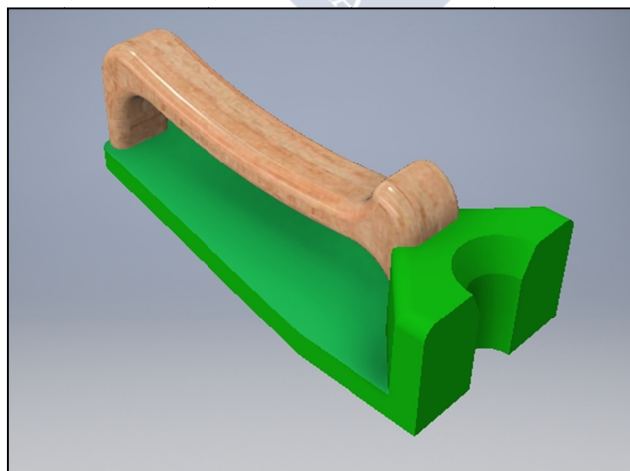


Figura 29: Guía de extracción de probetas testigo (modelo 3D)

Palanca de arranque de tornillo (*Ad hoc*): Fabricada con un tubo de cobre, permite realizar el movimiento de extracción de tornillos a velocidad constante, reduciendo la fuerza que tiene que realizar el operador. Este utillaje se complementa con el soporte de ensayo.

Palanca de extracción del penetrómetro (*Ad hoc*): Desarrollada para extraer la varilla del penetrómetro de la madera una vez realizado el ensayo de penetración. Con ella se evitan los golpes y tirones de extracción que pueden dañar a la varilla o el equipo, figura 30.



Figura 30: Palanca de extracción del penetrómetro

Plantilla de corte (*Ad hoc*): Fabricada en madera dura permite el corte de las probetas testigo a una longitud fija por medio del uso del serrucho, figura 31.



Figura 31: Plantilla de corte

Soporte de ensayo (*Ad hoc*): Utillaje de madera que sujeta la pieza de los ensayos de penetración de varilla y arranque de tornillo, figura 32. El soporte se fija a la mesa de trabajo mediante gatos. Su utilidad radica en que reduce los tiempos de ensayo a la vez que proporciona estabilidad a las piezas y equipos, reduciendo errores de equipo y humanos. En el ensayo de arranque de tornillo, evita la rotación de la pieza de madera a ensayar y el equipo. Permitiendo que el operador se centre en realizar un movimiento de extracción constante con

la ayuda de la palanca de arranque de tornillo. En el ensayo de penetración de varilla brinda estabilidad a la pieza.



Figura 32: Soporte de ensayo

6.2 MATERIAL DE ENSAYO

En este apartado se distinguen los diferentes lotes de probetas utilizados en las diferentes fases de la investigación, distinguiendo la fase en la que se ensayan. Más información sobre las fases específicas del desarrollo del proceso se recoge en el apartado 7.2 Métodos específicos.

6.2.1 Primera fase: estudio de las variables condicionantes del prototipo

El material de ensayo de la primera fase lo constituyen cuatro tipos de brocas que se ensayan sobre probetas de *Pinus radiata* D. Don, *Quercus robur* L. y *Pinus sylvestris* L.

6.2.2 Segunda fase: estimación de la densidad en cuatro especies de coníferas

Se seleccionaron las cuatro especies de coníferas más utilizadas en construcción en España. Estas probetas son las utilizadas en la segunda fase (estudio preliminar). El primer lote lo constituyen partidas sobrantes del material principal del proyecto de investigación AGL2002 - 00813, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (Plan Nacional I+D+i 2000 – 2003) y está formado por:

- 42 piezas de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), del Aserradero de Maderas El Espinar de Segovia.
- 44 piezas de pino laricio (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco), procedentes del Aserradero del Ayuntamiento de Cuenca.

El segundo lote lo constituyen partidas sobrantes del material correspondientes al proyecto de investigación AGL2004 – 01598 FOR y está formado por 44 piezas de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don), procedentes de la empresa Maderas Ipiñarri, S.L., situada en la localidad de Vergara, Guipúzcoa.

El tercer lote lo constituyen 44 piezas de Pino Gallego (*Pinus pinaster*. Ait.) procedentes del aserradero “Maderas Empalme” situado en la localidad de Cambeo-coles, Orense.

El conjunto de probetas se muestra en la tabla 1.

Tabla 1: Probetas utilizadas para la estimación de la densidad en cuatro especies de coníferas

Especie	Nombre científico	Nº de piezas	Dirección	Largo nominal (mm)	Ancho nominal (mm)	Espesor nominal (mm)
Pino Radiata	<i>Pinus radiata</i> D. Don	22	Radial	150	90	60
		22	Tangencial			
Pino Pinaster	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	22	Radial	150	90	65
		22	Tangencial			
Pino Silvestre	<i>Pinus sylvestris</i> L.	21	Radial	150	90	70
		21	Tangencial			
Pino Laricio	<i>Pinus nigra</i> J. F. Arnold	22	Radial	150	90	65
		22	Tangencial			

6.2.3 Tercera fase: estimación de la densidad en 10 especies de coníferas y frondosas

Estas probetas corresponden a las utilizadas en la tercera fase. Se seleccionaron 10 especies utilizadas en construcción con el mayor rango de densidades disponibles en España. Dentro de estas, se encuentran las especies más comunes cultivadas en España utilizadas en construcción, junto con algunas foráneas que amplían el rango de densidades del estudio. En la tabla 2 se muestra el origen de las mismas. En la tabla 3 se detallan las características de las probetas utilizadas. Cada lote de probetas está compuesto por 15 radiales y 15 tangenciales.

Tabla 2: Origen de las probetas utilizadas para la estimación de densidad

Código	Proveedor
1	Carpintería - Ebanistería Roberto Rodríguez Martín
2	Maderas Santiago Sevilla S.L
3	Maderas Santiago Sevilla S.L
4	Remanentes de Proy.: BIA2014-55089-P s
5	Maderas Santiago Sevilla S.L
6	Remanentes de Proy.: BIA2014-55089-P s
7	Maderas Santiago Sevilla S.L
8	Maderas Santiago Sevilla S.L
9	Maderas Santiago Sevilla S.L
10	Grupo Arrondo S.A.

Tabla 3: Probetas utilizadas para la estimación de la densidad en 10 especies

Especie	Nombre científico	Código	Nº de piezas	Largo nominal (mm)	Ancho nominal (mm)	Espesor nominal (mm)	Densidad comercial (kg/m ³) (Guindeo <i>et al.</i> 1997)
Cedro Rojo del Pacífico	<i>Thuja plicata</i> Donn ex D. Don	1	30	200	90	60	370
Chopo	<i>Populus L. Sp.</i>	2	30	200	100	75	440
Pino Radiata	<i>Pinus radiata</i> D. Don	3	30	200	95	60	500
Pino Pinaster	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	4	30	200	90	65	540
Pino Silvestre	<i>Pinus sylvestris</i> L.	5	30	200	95	70	520
Pino Laricio	<i>Pinus nigra</i> J. F. Arnold	6	30	200	90	65	580
Castaño	<i>Castanea sativa</i> Mill.	7	30	200	100	70	590
Roble	<i>Quercus robur</i> L.	8	30	200	100	70	710
Iroko	<i>Milicia excelsa</i> (Welw.) C.C. Berg	9	30	200	100	75	650
Elondo	<i>Erythrophleum Afzel</i> ex G. Don Sp.	10	30	200	75	70	920

6.2.4 Cuarta fase: estimación de la humedad y la densidad corregida al 12% H

En la cuarta fase se requería alcanzar diferentes grados de humedad. Dado que solamente se realizarían dos ensayos por pieza, se optó por un tamaño de probeta más reducido.

Como se concluye en investigaciones anteriores que se engloban en el marco de la presente Tesis – Fase 2 (Bobadilla *et al.* 2013; Calvo 2013):

- La relación entre la densidad de la probeta y el peso de las virutas extraídas es lineal. Lo mismo ocurre entre la humedad de la probeta y la humedad de las virutas extraídas. Por esta razón se escogen tres especies de entre las 10 anteriores para realizar los modelos: La de densidad más baja, la de mayor densidad y una de densidad intermedia. De esta manera se define la recta con los extremos y se comprueba la linealidad con una especie en el centro (tablas 4 y 5).
- No existen diferencias estadísticamente significativas en la estimación de la densidad según la dirección de ensayo (radial o tangencial). Por lo tanto no se tiene en cuenta para la confección de las probetas.

Para que la velocidad de humectación o desecación de las probetas fuera mayor, estas se obtuvieron de tal manera que las testas fueran las caras con mayor superficie del prisma. Así se facilita el intercambio de vapor de agua entre el exterior y el interior de la probeta.

Tabla 4: Probetas utilizadas para la estimación de la humedad y la densidad corregida

Especie	Nombre científico	Código	Nº de piezas	Largo nominal (mm)	Ancho nominal (mm)	Espesor nominal (mm)
Cedro Rojo del Pacífico	<i>Thuja plicata</i> Donn ex D. Don	1	33	38	90	60
Pino Laricio	<i>Pinus nigra</i> J. F. Arnold	6	33	38	90	65
Elondo	<i>Erythrophleum</i> Afzel ex G. Don Sp.	10	33	38	100	70

Tabla 5: Origen de las probetas utilizadas en la estimación de la humedad y la densidad corregida al 12% H

Código	Proveedor
1	Carpintería - Ebanistería Roberto Rodríguez Martín
6	Remanentes de Proy.: BIA2014-55089-P s
10	Grupo Arrondo S.A.

6.2.5 Quinta fase: detección e identificación de patologías bióticas en la madera

Estas probetas corresponden a las utilizadas en la quinta fase. Las muestras proceden de la colección de maderas con ataques biológicos de la UD de Industrias de los Productos Forestales de la ETSIMFMN (tabla 6).

Tabla 6: Probetas utilizadas para la detección e identificación de Patologías en la madera

Muestra	Patógeno	Tipo de madera	Nº de muestras
1	Pudrición parda	Conífera	2
2	Pudrición blanca- alveolar	Conífera	2
3	Anóbidos	Conífera	2
4	Anóbidos: Xestobium	Frondosa	1
5	Curculiónidos	Conífera	1
6	Cerambícidos	Conífera	1
7	Termitas	Conífera	2

7. MÉTODOS

A continuación se recoge el método seguido en la Tesis explicando a lo largo de tres secciones: el método general, métodos específicos y por último, métodos estadísticos.

7.1 MÉTODO GENERAL

Se utiliza la nomenclatura de “método general” en este apartado para definir protocolos comunes que serán utilizados de forma transversal a lo largo de los diferentes ensayos.

Dimensionado: todas las dimensiones fueron obtenidas por medio de un calibre digital con una resolución de 0,01 mm.

Cálculo de Masa (M_x): todos los pesos fueron obtenidos por medio de balanzas electrónicas con una resolución de 0,01 g.

Cálculo de la densidad: para el cálculo de la densidad de las probetas, probetas testigo y de las virutas extraídas se utilizó la siguiente ecuación:

$$\rho_x = \frac{M_x}{V_x} \quad (1)$$

Donde ρ_x es la densidad del elemento x, M_x es la masa del elemento x y V_x es el volumen del elemento x. En el caso de las probetas testigo para calcular el volumen del cilindro se midió el diámetro del mismo siguiendo la dirección de las fibras. En el caso de las virutas extraídas el volumen utilizado es el volumen del orificio dejado por el taladrado.

Medición del contenido de humedad de las muestras: el contenido de humedad se calcula según la Norma UNE-EN:13183-1:2002. “Contenido en humedad de una pieza de madera aserrada. Determinación por el Método de Secado en Estufa”. De acuerdo con esta norma, el secado de las muestras se realiza en la estufa mediante aire caliente con circulación forzada a una temperatura de $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Acondicionamiento de las probetas: las probetas se acondicionan según Norma UNE-EN:408:2011+A1:2012. “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas”. El acondicionamiento consiste en introducir las probetas el tiempo necesario hasta obtener un peso estable. Se debe conseguir que en dos pesadas consecutivas, en un intervalo de seis

horas, la diferencia de peso sea menor al 0,1%. De esta forma, la temperatura y humedad relativa en la cámara se establecen en 20 ± 2 °C y 65 ± 5 % HR. En estas condiciones la madera alcanza aproximadamente el 12% de humedad de equilibrio necesaria para cumplir la normativa de los ensayos de laboratorio.

7.2 MÉTODOS ESPECÍFICOS

La investigación se dividió en cinco fases, coincidentes con los principales desarrollos experimentales. La primera fase consistió en el estudio de las variables condicionantes del prototipo. En la segunda fase se llevó a cabo la estimación de la densidad en cuatro especies de coníferas con el extractor de virutas. Durante la tercera fase, se estimó la densidad de 10 especies de coníferas y frondosas mediante el extractor de virutas, extracción de probetas testigos y ensayos de resistencia a la penetración y de arranque de tornillos. La cuarta fase recoge los ensayos de estimación de la humedad y densidad corregida al 12% de contenido de humedad en tres especies de madera mediante el extractor de virutas. Finalmente en la quinta fase se llevaron a cabo ensayos de detección e identificación de patologías bióticas en la madera.

7.2.1 Primera fase: estudio de las variables condicionantes del prototipo

En esta fase se realiza un estudio para fijar las especificaciones de los componentes que se adicionan al equipo y afectan al desempeño del extractor de muestras y no están integradas en el cuerpo del dispositivo.

7.2.1.1 Dispositivo para taladrar

La elección de una u otra taladradora afecta a la velocidad de taladrado y la capacidad de aspiración de las virutas (potencia y sistema de refrigeración). Esto se realiza con el objetivo de hacer constante el funcionamiento del equipo.

7.2.1.2 Elección de la broca

Las características de esta afectan a la uniformidad de los orificios generados (volumen extraído), al tamaño de las virutas, al calor generado en la perforación (rozamiento) y a la capacidad de remoción de virutas. La selección de esta variable se realiza mediante el análisis visual del acabado superficial de los orificios dejados por las diferentes brocas y el análisis de la capacidad de evacuación de las virutas generadas durante el taladrado.

Para seleccionar el tipo y diámetro de broca más adecuado los siguientes estudios y consideraciones fueron llevados a cabo.

El orificio de un taladrado en la madera, produce una discontinuidad en las fibras similar o ligeramente superior a la generada por un nudo. Según las Normas UNE-56544:2011 y UNE-56546:2013 un nudo menor o igual a 10 mm de diámetro no se tiene en cuenta durante la clasificación visual de madera estructural. Por lo tanto si el diámetro de la broca es menor o igual a 10 mm se puede considerar que las propiedades mecánicas del elemento estructural de madera no se ven afectadas. Investigaciones sobre la influencia del diámetro y la posición de

orificios en miembros sometidos a flexión concluyen que la localización es más importante que el diámetro del orificio y recomienda que en miembros sometidos a flexión, se evite la realización de orificios en las caras que soportan esfuerzos de tracción (Falk *et al.* 2003).

Por otro lado, en tratamientos curativos de inyección en madera puesta en obra, se realizan orificios de 9,5 mm de diámetro al trespelillo cada 200 mm en toda la longitud de la pieza y se considera que sus propiedades mecánicas no merman.

Se compararon cuatro tipos de brocas convencionales (A: de tres puntas, B: salomónica, C: de pala, and D: para acero), todas de 8 mm de diámetro salvo la tercera que es de 10 mm por ser el menor valor nominal de este tipo de broca, figura 33.

Los ensayos se realizaron en pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) y roble (*Quercus robur* L.). Se analizó el orificio dejado por cada una de las brocas teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Acabado superficial del orificio de entrada.
- Acabado superficial de la pared interior del orificio.
- Acabado superficial del fondo del orificio.
- Capacidad de la broca para extraer el serrín generado.

Se entiende que un corte más limpio de la herramienta produce mejores acabados en el orificio de entrada y la pared interior y mejores resultados de taladrado con un menor desgaste y calentamiento. Además en este caso el taladro resulta más fácil y rápido de ejecutar.

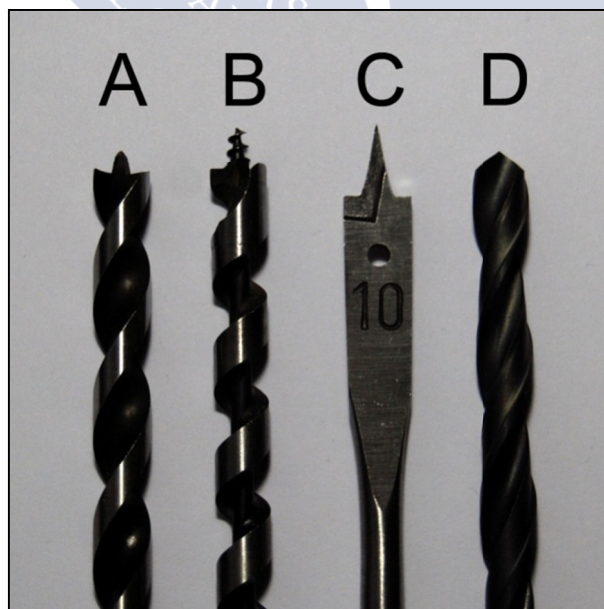


Figura 33: Brocas utilizadas en el estudio (A: de tres puntas, B: salomónica, C: de pala y D: para acero)

El análisis del acabado superficial consistió en un análisis visual de cada uno de los factores puntuando sobre una escala de 1 a 4, donde 1 es un acabado superficial pobre y 4 es un acabado superficial excelente.

Con las dos brocas con mejores puntuaciones en el análisis visual del acabado superficial de los orificios se realizó un estudio de la capacidad de extracción del serrín generado durante el taladrado. Para ello se realizaron 17 orificios de 50 mm de profundidad en una tablilla de *Pinus sylvestris* L. de 310 x 60 x 13 mm con cada una de las brocas en sentido vertical, la situación más desfavorable. Mientras se realizaba el taladrado se aspiraron las astillas expulsadas por cada broca con una aspiradora cuya boca se encontraba a 3 cm de la broca. Una vez realizado el orificio se tapaba para evitar la entrada de serrín de los demás. Realizados todos los orificios se quitaron los tapones y se comprobó el volumen de astillas no extraídas por la broca.

7.2.1.3 Sistema de recogida y almacenaje de las virutas

El sistema de recogida influye en la capacidad de aspiración (permeabilidad al aire, tamaño de poro) y en la capacidad de contener la mayor cantidad de virutas aspiradas (finos y polvo).

7.2.2 Segunda fase: estimación de la densidad en cuatro especies de coníferas con Extractor de Virutas (estudio preliminar)

Se realizó este estudio para comprobar el comportamiento del dispositivo y conocer los parámetros característicos del mismo. Se ensayaron probetas de cuatro especies de coníferas acondicionadas siguiendo el procedimiento operativo que se describe a continuación.

Procedimiento operativo:

1. Se seleccionan las probetas teniendo en cuenta que no presenten anomalías o defectos (nudos, gemas, acebolladuras, ataques de xilófagos, etc.) y que presenten la mejor orientación posible para realizar los ensayos. A continuación se numeran y se marca la posición en la cual se realizarán los ensayos. Se introducen en la cámara de acondicionamiento a $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y $65\% \pm 5\%$ HR, de tal manera que el aire fluya libremente a su alrededor.
2. Transcurridos unos días se realiza la comprobación de la estabilización de las probetas según Norma UNE-EN:408:2011. Una vez alcanzada se puede comenzar a realizar los ensayos.
3. Se extrae un lote de probetas de la cámara. Se dimensiona cada probeta con ayuda de un pie de rey digital con una resolución de 0,01 mm. Luego se pesa con una báscula digital con una resolución de 0,01 g.
4. Se realizan los ensayos de extracción de virutas con el prototipo 3.
5. Se pesan las probetas ensayadas y las virutas extraídas junto con el filtro y se obtienen sus humedades según Norma UNE-EN:13183-1:2002.
6. Se realiza el estudio estadístico de los datos obtenidos.

A continuación se detalla el procedimiento de marcado de posición de muestreo y el ensayo de extracción de virutas, ensayos específicos de este apartado para la segunda fase de estimación de la densidad en cuatro especies de coníferas.

7.2.2.1 Marcado de posición de muestreo

Los ensayos se realizan en dirección radial o tangencial (dependiendo de la probeta) sobre una misma línea de ensayo paralela a la fibra de la madera, figura 34. De esta manera todos taladros se realizan sobre la misma línea de fibras.

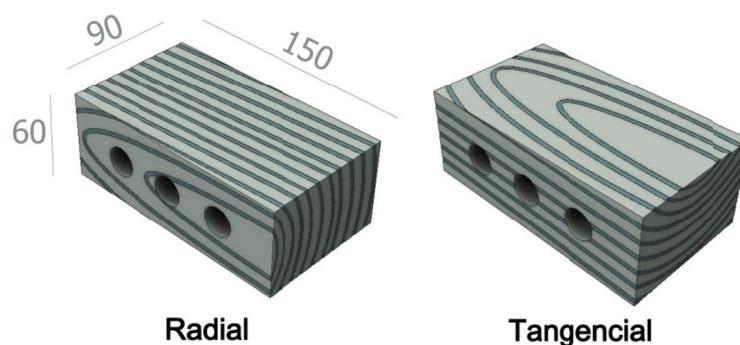


Figura 34: Probetas radial y tangencial. Dimensiones especificadas en milímetros

7.2.2.2 Ensayo de extracción de virutas

En primer lugar se lleva a cabo la preparación del equipo. Para ello se codifica el filtro de papel y se introduce en el cartucho, y se coloca el cartucho en el dispositivo. A continuación se asegura la probeta en la mesa mediante gatos, y se posiciona el aparato de tal forma que la dirección de ensayo sea perpendicular a la cara de la pieza a ensayar. Finalmente, se acciona la taladradora y se realiza la perforación.

Una vez realizado el taladro, con la taladradora aún funcionando, se coloca el dispositivo en posición vertical y se suelta el pulsador de la taladora. De esta manera, cualquier resto de serrín restante es canalizado al interior del filtro. Manteniendo esta posición vertical, se extrae el cartucho y se remueve el filtro lleno de virutas para proceder a su pesado y almacenaje.

7.2.3 Tercera fase: Estimación de la densidad en 10 especies con Extractor de Virutas, probetas testigo, penetrómetro y arranque de tornillo

Con los resultados obtenidos en la segunda fase, se diseña y realiza el estudio comparando cuatro métodos mecánicos no destructivos de estimación de la densidad sobre 10 especies de madera acondicionadas.

Procedimiento operativo:

1. Se seleccionan las probetas teniendo en cuenta que no presenten anomalías o defectos (nudos, gemas, acebolladuras, ataques de xilófagos, etc.) y que presenten la mejor orientación posible para realizar los ensayos. A continuación se procede a su numeración y se marca la posición donde se realizarán los ensayos. Se introducen en la cámara de acondicionamiento a $20^{\circ} \pm 2^{\circ}$ C y $65\% \pm 5\%$ HR. Las probetas deben colocarse de tal manera que el aire fluya libremente.
2. Transcurridos unos días se realiza la comprobación de la estabilización de las probetas según Norma UNE-EN:408:2011. Una vez alcanzada se puede comenzar a realizar los ensayos.
3. Se extrae un lote de probetas de la cámara. Se toman las dimensiones de cada probeta con ayuda de un calibre digital con una resolución de 0,01 mm. Luego se pesa con una báscula digital con una resolución de 0,01 g.
4. Finalmente se realizan los ensayos de extracción de virutas, extracción de probetas testigo, de penetración y de extracción de tornillo sobre las probetas en cada una de las direcciones. El ensayo de extracción de viruta con el equipo a batería solo se realiza en la dirección predominante de la probeta (ancho) ya que la profundidad de extracción de este dispositivo supera el espesor de algunas probetas.
5. Se realiza el estudio estadístico de los datos obtenidos.

A continuación se detalla el procedimiento de marcado de posición de muestreo, el ensayo de extracción de virutas, el ensayo de extracción de probetas testigo, el ensayo de resistencia a la penetración de una varilla y el método de arranque de tornillos. Todos estos constituyen los ensayos específicos para la tercera fase de estimación de la densidad en 10 especies de madera.

7.2.3.1 Marcado de posición de muestreo

Los ensayos se realizan en dirección radial y tangencial sobre una misma línea de ensayo paralela a la fibra de la madera. Para definir cada línea de ensayo (una radial y otra tangencial) se observa la testa de las probetas y se halla la dirección deseada. Acto seguido se prolonga esta por la cara a ensayar de forma paralela al eje de simetría longitudinal de la probeta.

En cada una de las direcciones se realizan:

- Una marca para realizar el taladro de extracción de virutas.
- Una marca para realizar la extracción de la probeta testigo.
- Una marca para realizar los ensayos de penetrómetro y arranque de tornillos.

De esta manera todos los ensayos, de una misma dirección, se realizan sobre la misma línea de fibras. En una de las dos direcciones, además se realiza una extracción de virutas mediante el dispositivo portátil, figura 35. Respecto a ambas direcciones, la ubicación de las marcas está desfasada. De esta manera se evita el riesgo de que los taladros perpendiculares se superpongan y produzcan un fallo en la medida, figura 36.

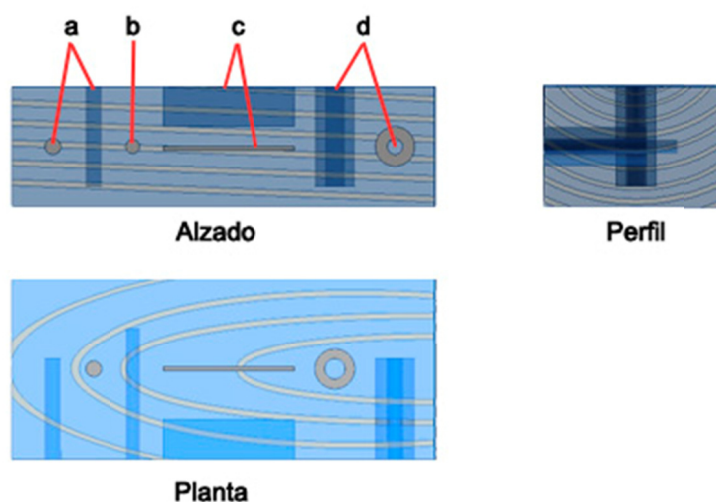


Figura 35: Representación de las vistas de una probeta tangencial donde se muestran la ubicación de los diferentes ensayos así como el alcance de los mismos. a) Extracción de viruta con el dispositivo eléctrico; b) Extracción de viruta con el dispositivo portátil; c) Zona de ensayo de penetración y extracción de tornillos; d) Extracción de probetas testigo

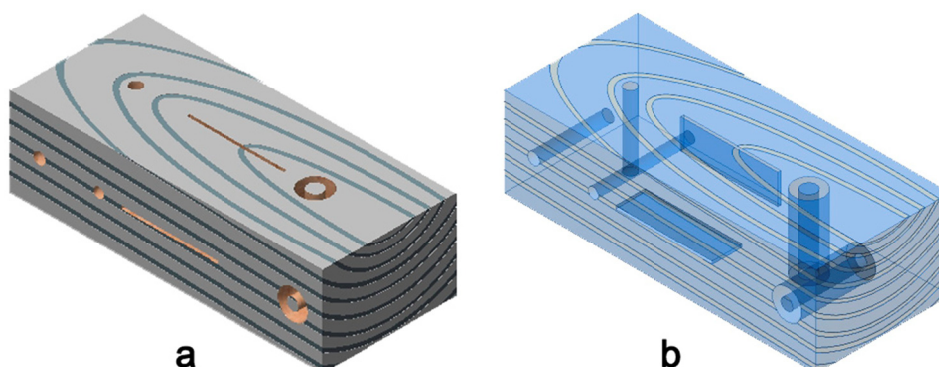


Figura 36: Probeta tangencial para la estimación de la densidad, a) Ubicación de los diferentes ensayos; b) Proyección de los ensayos en el interior de la probeta

7.2.3.2 Ensayo de extracción de virutas

Preparación del equipo: Se codifica el filtro de papel y se introduce en el cartucho. Se coloca el cartucho en el dispositivo.

Se coloca y se asegura la probeta en la estación de ensayo. Se posiciona el aparato de tal forma que la dirección de ensayo sea perpendicular a la cara de la pieza a ensayar, se acciona la taladradora y se realiza la perforación en varios tiempos o etapas según la dureza de la madera (tabla 7). Al realizar las perforaciones en etapas se evita la colmatación de la broca, el sobrecalentamiento del material y permite un mejor flujo del serrín fuera del orificio.

Una vez realizado el taladro, con la taladradora aún funcionando, se coloca el dispositivo en posición vertical y se suelta el pulsador de la taladora. De esta manera cualquier resto de serrín restante es canalizado al interior del filtro. Sin dejar esta posición se extrae el cartucho y se extrae el filtro lleno de virutas. Por último se pesa el filtro y se almacena.

Tabla 7: Etapas de perforación en el método de extracción de virutas según tipo de madera

Etapas	Madera blanda (<600 kg/m ³)	Madera dura (≥600 kg/m ³)
1	Se taladra hasta 1/2 de la profundidad total y se extrae la broca hasta un tercio de la profundidad	Se taladra hasta 1/3 de la profundidad total y se extrae la broca hasta 1/4 de la profundidad
2	Se taladra hasta alcanzar la profundidad máxima y se extrae la broca hasta aproximadamente 1/2 de la profundidad.	Se taladra hasta alcanzar 2/3 de la profundidad y se extrae la broca hasta aproximadamente 1/3 de la profundidad.
3	Se introduce la broca hasta el final y se extrae la broca.	Se taladra hasta alcanzar la profundidad máxima y se extrae la broca hasta aproximadamente 1/2 de la profundidad.
4	—	Se introduce la broca hasta el final y se extrae la broca.

7.2.3.3 Ensayo de extracción de probetas testigo

Con la probeta en la estación de ensayo, se posiciona la guía de ensayo de tal forma que el centro de la fresa coincida con la marca de la probeta. Se acciona el taladro y se introduce la fresa en la guía y se procede a taladrar. Una vez profundizados unos 10 mm, se retira la guía y se continúa la operación de taladrado hasta alcanzar 60 mm de profundidad. Se retira la fresa dejando la probeta testigo todavía adherida a la pieza. Con la ayuda de un destornillador plano se parte la base de la probeta testigo liberándola.

Este cilindro de madera presenta una longitud irregular. Para igualarlos se realiza un seccionado mediante la plantilla de corte de 50 mm y el serrucho japonés. Una vez obtenida la probeta testigo se codifica, se dimensiona, se pesa y se almacena.

7.2.3.4 Ensayo de resistencia a la penetración de una varilla (Pilodyn)

En primer lugar se coloca la probeta en el soporte de ensayo. Se carga el resorte por medio de una baqueta armando el dispositivo. A continuación se coloca el dispositivo en posición perpendicular a la cara a ensayar, procurando que los dos topes estén en contacto con la pieza y que la proyección de la aguja se encuentre lo más próxima a la marca de ensayo. Una vez en posición, se dispara y se mantiene presionado el penetrómetro contra la pieza para realizar la lectura. Finalmente se extrae la aguja por medio de la palanca de extracción.

7.2.3.5 Método de arranque de tornillo (MAT)

Se coloca la probeta en el soporte de ensayo para que no se desplace. Sobre la marca de ensayo de la probeta, se introduce el tornillo 20 mm en dirección perpendicular a la cara de

ensayo. Se sitúa el equipo sobre la probeta de tal manera que el soporte de ensayo bloquee el movimiento de giro de este. Se coloca el gancho en la cabeza del tornillo y se tara a 0 kN la consola del equipo. Se procede a la extracción del tornillo, girando el husillo del equipo a velocidad constante (giro de 180° en 5 a 10 s), con la ayuda de la palanca, hasta la extracción total del tornillo. La lectura realizada corresponde con el valor máximo de resistencia al arranque.

7.2.4 Cuarta fase: Estimación de la humedad y densidad corregida al 12% H en tres especies con el Extractor de Virutas

Se realizó un estudio en tres especies acondicionadas a cinco humedades comprendidas entre 5% y 25% H, buscando la estimación del contenido de humedad de la madera y la estimación directa de la densidad corregida al 12% H.

Procedimiento operativo:

1. Se seleccionan las probetas teniendo en cuenta que no presenten anomalías o defectos (nudos, gemas, acebolladuras, ataques de xilófagos, etc.) y que presenten la mejor orientación posible para realizar los ensayos. A continuación se codifican y se marca la posición donde se realizarán los ensayos. Se introducen en la cámara de acondicionamiento a $20^{\circ} \pm 2^{\circ}$ C y $55\% \pm 5\%$ HR, de tal manera que el aire fluya libremente. Bajo estas condiciones la madera alcanza aproximadamente el 10% H de equilibrio higroscópico.
2. Transcurridos unos días se realiza la comprobación de la estabilización de las probetas según Norma UNE-EN:408:2011.
3. Se separan en grupos, se humectan o secan hasta alcanzar la humedad de consigna y se almacenan por lotes en bolsas estancas para su estabilización.
4. Se extrae un lote de probetas. Se dimensiona cada probeta con ayuda de un calibre digital con una resolución de 0,01 mm. Luego se pesa con una báscula digital con una resolución de 0,01 g.
5. Finalmente se realizan los ensayos sobre las probetas con cada uno de los equipos (prototipos 4 y 5).
6. Se pesan las probetas ensayadas y se obtiene su humedad según Norma UNE-EN:13183-1:2002.
7. Se realiza el estudio estadístico de los datos obtenidos.

A continuación se detallan algunos aspectos del procedimiento:

7.2.4.1 Marcado de posición de muestreo

Los ensayos se realizan perpendiculares a la dirección de la fibra como se muestra en la figura 37, sin tener en cuenta si es dirección radial o tangencial.

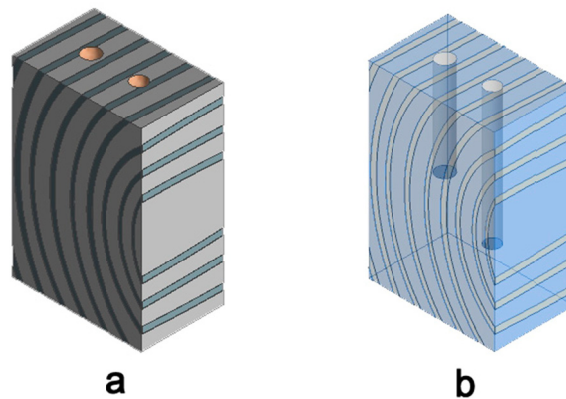


Figura 37: Probeta para la estimación de la humedad, a) Ubicación de los diferentes ensayos; b) Proyección de los taladros en el interior de la probeta, en la imagen se aprecia la diferencia de profundidad de los taladros realizados

7.2.4.2 Estabilización a la humedad de consigna H_c

Para cada especie, se colocan 33 probetas por especie en cámara a estabilizar al 10% H. Una vez estabilizadas se separan tres probetas testigo y se obtiene la media de su contenido de humedad H_t según Norma UNE-EN:13183-1:2002. Esta humedad se utiliza para calcular los pesos húmedos teóricos que deberán alcanzar las demás probetas por medio de la ecuación 2.

Se obtienen los pesos húmedos (P_H) de probetas restantes, y se organizan en cinco grupos de seis piezas cada uno. Se asigna una humedad consigna (H_C) a cada grupo. Por lo tanto se conforman los siguientes grupos: grupo 1 ($H_C = 5\%$); grupo 2 ($H_C = 10\%$); grupo 3 ($H_C = 15\%$); grupo 4 ($H_C = 20\%$); y grupo 5 ($H_C = 25\%$).

$$P_{Hc} = \frac{P_{hx}(100+H_c)}{H_t+100} \quad (2)$$

Donde P_{Hc} es el peso de la probeta x a la humedad de consigna, P_{hx} es el peso húmedo de la probeta x; H_t es la humedad media de las tres probetas testigo; H_C es la humedad de consigna de la probeta x.

Debido a que es improbable obtener el P_{Hc} exacto para cada probeta, se propone dar por alcanzada H_c cuando el P_H de la probeta sea tal que su humedad se encuentre en el intervalo de $H_c \pm 1\%$. Por lo tanto cuando $P_H \in (P_{Hc-1}; P_{Hc+1})$. Ver tabla 8.

Tabla 8: Ejemplo de proceso de obtención de H_c para una probeta de Cedro rojo de cada grupo de humedad

Grupo	H_c (%)	H_t (%)	P_H (g)	P_{H_c} (g)	$(P_{H_c-1}; P_{H_c+1})$ (g)	Proceso a acometer	Siguiente paso
1	5	10,04	72,49	69,17	(68,51 ; 69,83)	Secado	Estufa de secado
2	10		71,54	71,51	(70,86 ; 72,16)	Ya estabilizada	Almacenaje en bolsa
3	15		72,06	75,31	(74,65 ; 75,96)	Humectación	Cámara de humectación
4	20		71,84	78,34	(77,69 ; 79,00)	Humectación	Cámara de humectación
5	25		73,48	83,47	(82,80 ; 84,14)	Humectación	Cámara de humectación

Calculado $(P_{H_c-1}; P_{H_c+1})$ para cada probeta, se las separa en tres partes: las probetas que requieren perder peso para alcanzar su H_c , pertenecientes al Grupo 1; las probetas que ya se encuentran en su H_c , pertenecientes al Grupo 2; y las probetas que requieren ganar peso para alcanzar su H_c , pertenecientes a los Grupos 3, 4 y 5.

Para lograr la pérdida de peso de las probetas del Grupo 1, estas se introducen en estufa a 70°C comprobando su peso cada dos horas hasta que estas alcanzan su P_{H_c} .

En el caso de las probetas de los Grupos 3, 4 y 5, estas se introducen en la cámara de humectación hasta que adquieren el P_{H_c} correspondiente. En un principio las comprobaciones de los pesos son diarias para las probetas que corresponden al Grupo 3, llegando a ser semanales para las probetas del Grupo 5. Esto se debe a que, cuando H_c se encuentre más próximo al valor del punto de saturación de la pared celular, más lento es el proceso de adsorción del agua en la pared celular.

Una vez las probetas alcanzan H_c , se almacenan en lotes de tres con la misma H_c en bolsas Zip para su estabilización. Transcurridas unas semanas se comprueba su P_{H_c} , se da por estabilizadas y se procede a su ensayo.

Para una mejor comprensión del proceso se esquematiza en la figura 38.

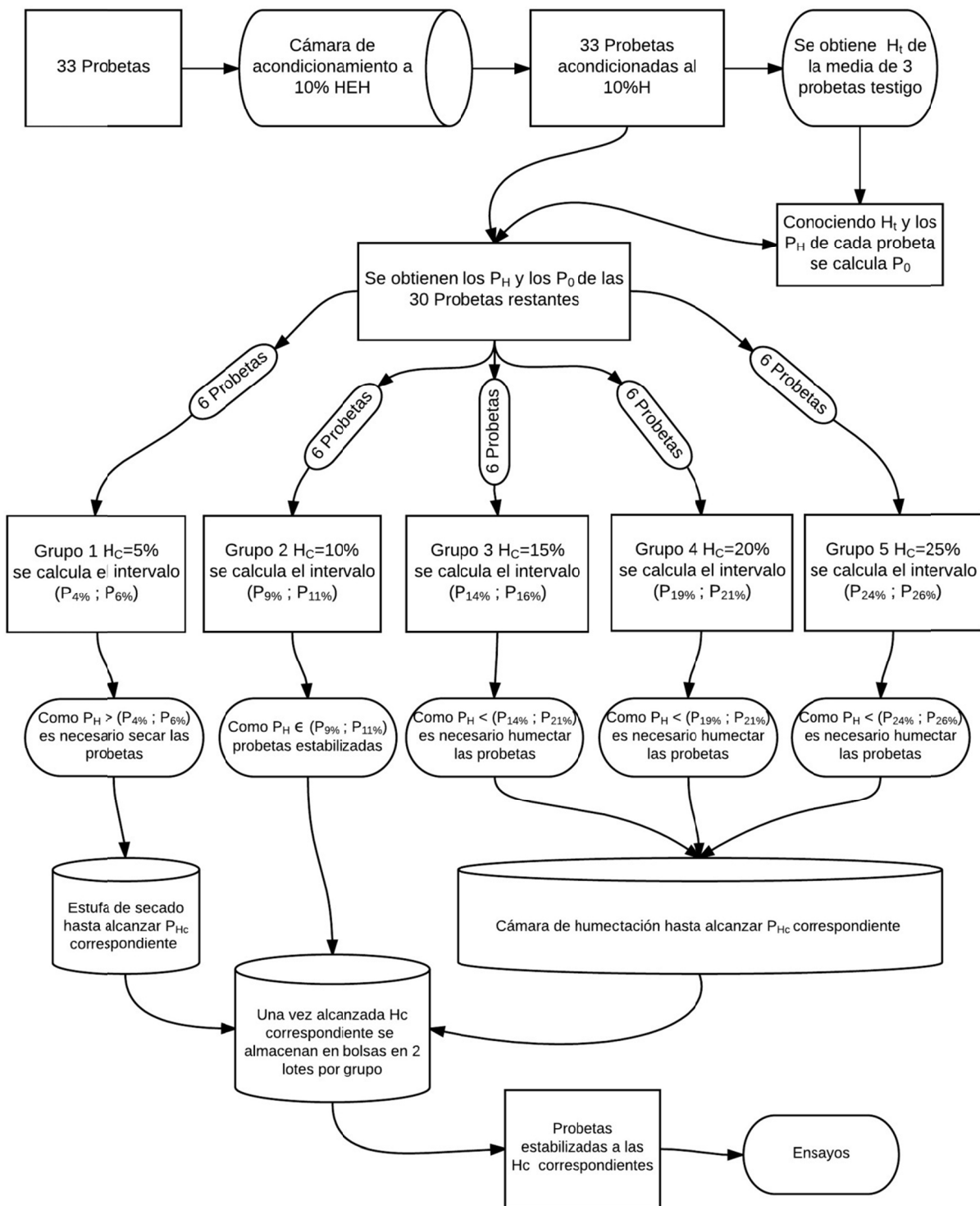


Figura 38: Esquema del proceso de obtención de humedad de consigna

7.2.4.3 Ensayo de extracción de virutas

Preparación del equipo: Se codifica el filtro de papel y se introduce en el cartucho. Se coloca el cartucho en el dispositivo.

Se coloca y se asegura la probeta en la estación de ensayo. Se posiciona el aparato de tal forma que la dirección de ensayo sea perpendicular a la cara de la pieza a ensayar, se acciona la taladradora y se realiza la perforación en varios tiempos o etapas según la dureza de la madera (tabla 7). Al realizar las perforaciones en etapas se evita la colmatación de la broca, el sobrecalentamiento del material y permite un mejor flujo del serrín fuera del orificio.

Una vez realizado el taladro, con la taladradora aún funcionando, se coloca el dispositivo en posición vertical y se suelta el pulsador de la taladora. De esta manera cualquier resto de serrín restante es canalizado al interior del filtro. Sin dejar esta posición se extrae el cartucho y se remueve el filtro lleno de virutas.

Se pesa el filtro y se introduce en una bolsa Zip pequeña. Transcurridos unos días se extrae de la bolsa y se vuelve a pesar. Finalmente se obtiene el peso seco del filtro lleno y su humedad mediante secado en estufa según Norma UNE-EN:13183-1:2002.

7.2.5 Quinta fase: detección e identificación de patologías bióticas en madera

Esta fase consiste realizar el ensayo con el Extractor de muestras en maderas que han sufrido ataques de agentes bióticos para a continuación examinar las virutas en busca de rastros dejados por los patógenos.

1. Se extraen muestras con los extractores de viruta.
2. Se pesan las bolsas y se estima la densidad mediante el modelo previamente obtenido.
3. Se separa el serrín en dos fracciones por medio de un tamiz de 0,85 mm de luz.
4. Se pesan las diferentes fracciones
5. Se observa cada fracción mediante una lupa binocular y/o microscopio óptico en busca de señales de patógenos (detritos, hifas, barro, etc.).

7.3 MÉTODOS ESTADÍSTICOS

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 tres probetas de pino pinaster retiradas por presentar un alto grado de enteamiento con un anormal valor de densidad. Otros ejemplos son las probetas testigo con nudos internos o que al extraerlas son defectuosas. En el caso del Extractor de Virutas estos datos anómalos se suelen producir por problemas de aspiración (cuando no se trabaja a toda potencia con la taladradora) o cuando la muestra posee muchas sustancias de impregnación.

Estos valores anómalos son excluidos del análisis estadístico y se exponen en una tabla antes de la presentación de los resultados de cada apartado.

Con todos los datos válidos recopilados en los estadillos de ensayo se confecciona una tabla en Microsoft Excel compatible con Statgraphics Centurion XVII.I – Versión 17.1.06 (64-bit), donde se realiza el análisis estadístico de los mismos.

El fin último de esta investigación es obtener modelos de estimación de la densidad de la madera en función de las variables analizadas. Para ello en cada una de las variables se realizan los siguientes pasos:

- Se obtienen los valores medios y sus coeficientes de variación por especie.
- Se comprueba la normalidad de los datos a través de un análisis de ajuste de distribuciones de datos no censurados. Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución normal a los datos de la variable.
- Se analiza la existencia de diferencias estadísticas significativas (Análisis de Varianza) entre los datos de partida para los diferentes niveles (especies, dirección de ensayo, etc.). Mediante la prueba de múltiples rangos (Método: 95,0 porcentaje LSD o Diferencia Mínima Significativa) se puede diferenciar visualmente si existen estas diferencias o no.
- Por último, se procede a relacionar los factores aplicando una regresión simple y/o múltiple. Al igual que anteriormente, los factores a comparar son la densidad con los diferentes datos obtenidos de las metodologías no destructivas aplicadas en la investigación.

A continuación se explican algunos de los pasos anteriores.

7.3.1 Comprobación de la normalidad (ajuste de datos no censurados)

La segunda fase del análisis estadístico consiste en la comprobación de la normalidad de todas las funciones, condición indispensable para validar los procedimientos estadísticos aplicados. Esta comprobación consiste en la aplicación de la Prueba de Kolmogorov-Smirnov, en cada una de las especies. En este caso, si el P-valor de la muestra 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.

7.3.2 Test ANOVA

Se realiza el análisis de varianza mediante el test ANOVA. Se comparan los valores medios de los factores, para los diferentes niveles de especie, para comprobar qué factores influyen en la densidad y así agruparlos en un conjunto donde no exista una diferencia estadística significativa.

La prueba-F determinará si hay diferencias significativas entre los diferentes grupos de datos en función de las pruebas realizadas, mediante el valor-P, puesto que si este es menor a 0,05 existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de los métodos utilizados, entre un nivel y otro, con un nivel del 95% de confianza.

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

7.3.3 Propuesta de los modelos de regresión

Una vez realizados los procedimientos anteriormente mencionados, se procede con 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.



8. RESULTADOS

8.1 PRIMERA FASE: ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO Y LOS INSUMOS DEL EXTRACTOR DE VIRUTAS

Con el diseño y fabricación del Extractor de Virutas surgieron una serie de variables a definir. Estas variables condicionan al equipo y a la vez están condicionadas por este. Cualquier cambio en ellas modificaría el comportamiento del equipo. Por esta razón la elección y su descripción se encuentran en el apartado de Resultados, ya que de ellas depende el buen desempeño de los futuros ensayos.

Para el buen funcionamiento del dispositivo fue preciso fijar las siguientes variables:

- Dispositivo para taladrar (fabricante y modelo).
- Broca.
- Sistema de recogida y almacenaje de las virutas.

En este primer apartado se detalla el resultado de las variables seleccionadas, así como el estudio llevado a cabo para el proceso de selección de la broca.

8.1.1 Dispositivo para taladrar

Se optó por un taladro eléctrico convencional Marca BOSCH, modelo PSB 50. Potencia nominal absorbida 500 W; Potencia útil: 228 W; Par de giro máx. 7,5 Nm; Velocidad de giro en vacío 3.000 rpm. Se eligió este modelo por ser económico y de fácil acceso.

8.1.2 Elección de la broca

En la tabla 9 se recogen los resultados obtenidos del análisis visual del acabado superficial de los orificios dejados por las diferentes brocas.

Como consecuencia de este estudio, se procede a rechazar dos tipos de brocas, la tipo B (salomónica) y la tipo D (para acero) por obtener bajas puntuaciones.

Tabla 9: Resultados del análisis visual de la rugosidad del orificio

Tipo de broca y diámetro	Pino radiata				Roble			
	Orificio de entrada	Pared interior	Final del orificio	Total	Orificio de entrada	Pared interior	Final del orificio	Total
A (8 mm)	4	3	3	10	4	4	4	12
B (8 mm)	4	3	1	8	4	3	2	9
C (10 mm)	4	3	3	10	4	4	4	12
D (8 mm)	1	3	2	6	1	3	3	7

Con las brocas A (de tres puntas) y C (de pala) se realizó un estudio de la capacidad de extracción del serrín generado durante el taladrado. Como se puede apreciar en la figura 39, la broca de tres puntas tiene un rendimiento de extracción o desalojo de serrín muchas veces mayor a la broca plana. El peso del serrín sin desalojar de esta broca en los 17 orificios fue inferior a 0,01g y 1,98 g en el caso de la broca de pala.

Finalmente se seleccionó para el dispositivo la broca de tres puntas de 8 mm de diámetro y 200 mm de longitud.

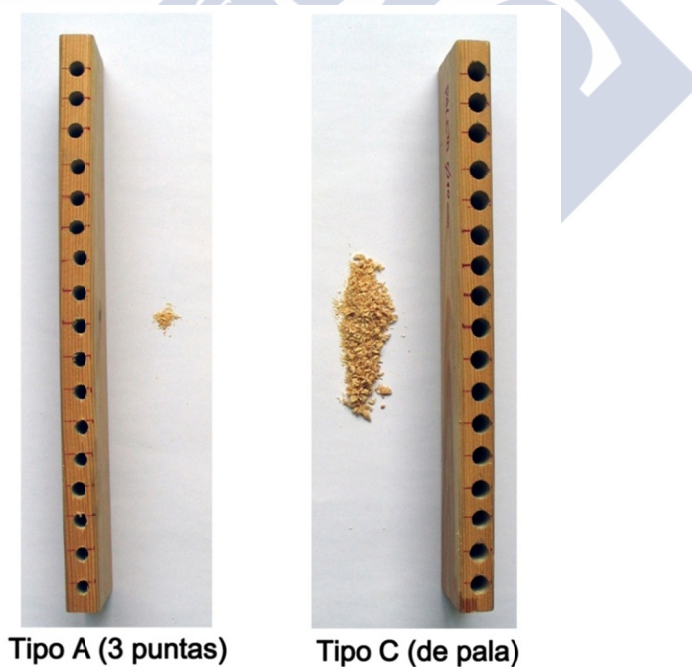


Figura 39: Muestras de madera taladradas para la comprobación del rendimiento de extracción de las brocas A y C. Detalle del resto de serrín no extraído por la broca

8.1.3 Sistema de recogida y almacenaje de las virutas

Para el sistema de recogida se requería un filtro mono uso que almacenara las virutas producidas durante el taladrado. Los filtros tienen que tener un tamaño de poro fino, a su vez ser homogéneos entre sí y de peso constante. Otros factores a tener en cuenta son la forma y la resistencia del tejido o papel, ya que debe soportar la manipulación operativa y la fuerza de succión mientras mantiene sus atributos. Finalmente tiene que servir de almacén del material extraído.

Se barajaron varias opciones, diseñar y construir filtros de telas sintéticas, filtros de papel o buscar filtros existentes. Finalmente se optó por filtros de papel (bolsa de té tamaño XS), que cumplen con los requisitos. Estos son económicos y fáciles de localizar. Están formados por una red de largas fibras de abacá (*Musa textiles* Née) recubiertas por una fina capa de plástico que le otorgan resistencia y estabilidad a los cambios de humedad (Magill 1964; Heinrich 1992; Irion & Prindle 1955).

8.2 SEGUNDA FASE: ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE CUATRO ESPECIES DE CONÍFERAS CON EL PROTOTIPO 3 (ESTUDIO PRELIMINAR)

Antes de realizar un amplio estudio de la estimación de la densidad de la madera mediante el Extractor de Virutas es necesario conocer su comportamiento y desempeño en la práctica. Por esta razón se llevó a cabo un estudio preliminar en cuatro especies de coníferas españolas.

Se realizaron tres ensayos por probeta coincidentes con la dirección principal de esta en probetas radiales y tangenciales de las diferentes especies. El ensayo consiste en extraer y coleccionar las virutas generadas en el taladrado en un filtro mono uso y calcular su densidad, para finalmente correlacionarla con la de la probeta original.

A continuación se detallan los resultados obtenidos. La media de las densidades de las probetas y de las virutas extraídas se muestra en la tabla 10.

La media del contenido de humedad de las probetas y de las virutas extraídas se muestra en la tabla 11.

Tabla 10: Valores medios de las densidades de las probetas, la densidad de las virutas y el peso de las virutas

Especie	Orientación	Densidad probetas (kg/m ³)	CV (%)	Densidad viruta (kg/m ³)	CV (%)	Peso Filtro + virutas (g)	CV (%)
Pino radiata	Radial	486,02	8,84	460,99	9,88	1,36	7,73
	Tangencial	516,02	7,08	481,85	9,00	1,41	7,14
	Ambas	501,02	8,43	471,42	9,59	1,39	7,60
Pino pinaster	Radial	495,54	8,50	469,61	5,91	1,37	4,56
	Tangencial	455,01	8,21	424,63	5,85	1,28	4,42
	Ambas	475,27	9,34	447,12	7,73	1,32	5,79
Pino silvestre	Radial	485,94	7,87	465,40	15,36	1,38	11,88
	Tangencial	488,17	8,69	464,69	9,63	1,37	7,37
	Ambas	487,00	8,17	465,07	12,80	1,37	9,90
Pino laricio	Radial	619,11	21,97	586,41	23,48	1,65	19,46
	Tangencial	612,71	12,75	589,35	14,74	1,68	11,00
	Ambas	615,91	17,80	587,88	19,35	1,66	15,57
Total para las 4 especies	Radial	520,93	17,97	494,90	19,29	1,44	15,40
	Tangencial	517,91	15,05	489,86	16,69	1,43	13,30
	Ambas	519,44	16,55	492,41	18,02	1,44	14,36

Tabla 11: Contenido de humedad medio de las probetas y las virutas

Especie	Orientación	Contenido de humedad medio de las probetas (%)	CV (%)	Contenido de humedad medio de las virutas (%)	CV (%)
Pino radiata	Radial	10,95	4,52	8,39	17,90
	Tangencial	10,76	4,13	7,64	11,67
	Ambas	10,86	4,38	8,02	15,93
Pino pinaster	Radial	13,11	2,91	9,54	6,25
	Tangencial	12,91	5,55	8,72	11,02
	Ambas	13,01	4,43	9,13	9,77
Pino silvestre	Radial	9,50	13,76	8,11	24,61
	Tangencial	9,57	18,58	7,88	18,13
	Ambas	9,53	16,04	8,00	21,64
Pino laricio	Radial	11,33	44,32	9,31	31,95
	Tangencial	9,82	8,99	9,28	26,31
	Ambas	10,58	34,41	9,29	28,92
Total para las 4 especies	Radial	11,24	25,33	8,84	22,71
	Tangencial	10,82	15,51	8,39	19,76
	Ambas	11,03	21,27	8,62	21,49

Las probetas de pino Laricio estaban compuestas por albura y duramen en proporciones variables. En esta especie la diferencia entre la densidad de la albura y el duramen es muy amplia, lo que explica el alto CV que presentan las densidades (tabla 11). De la misma manera ocurre con el contenido de humedad.

A continuación se estudió la normalidad de las densidades de las virutas extraídas para cada una de las especies en ambas direcciones. Como se observa en la tabla 12, dado que todos los P-valores son mayores que 0,05, se asume que provienen de una distribución normal con un 95% de nivel de confianza.

Tabla 12: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para densidad de la virutas en el primer orificio (DV1), en el segundo (DV2), el tercero (DV3) y la media de los tres (DVM)

Especie	DV1 (P-valor)	DV2 (P-valor)	DV3 (P-valor)	DVM (P-valor)
Radiata	0,964821	0,943809	0,917301	0,959499
Pinaster	0,618004	0,317332	0,453397	0,457252
Silvestre	0,230456	0,538933	0,0521637	0,343668
Laricio	0,423104	0,504689	0,327004	0,552388
Total para las 4 especies	0,0036	0,00077	0,00015	0,00023

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las densidades de los virutas de los tres orificios perforados en cada muestra, con un nivel de confianza de 95%, figura 40.

Gráfico Caja y Bigotes

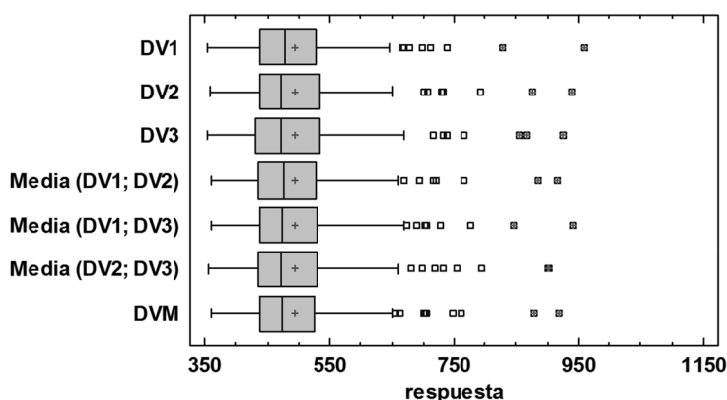


Figura 40: Diagrama de cajas y bigotes de la densidad de las virutas de los tres orificios (DV1, DV2 y DV3) perforados en cada muestra y sus valores medios

Las densidades de las virutas de los orificios tangenciales y radiales no muestran diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95%, aunque el peso de las virutas de los taladros tangenciales es ligeramente superior, figura 41.

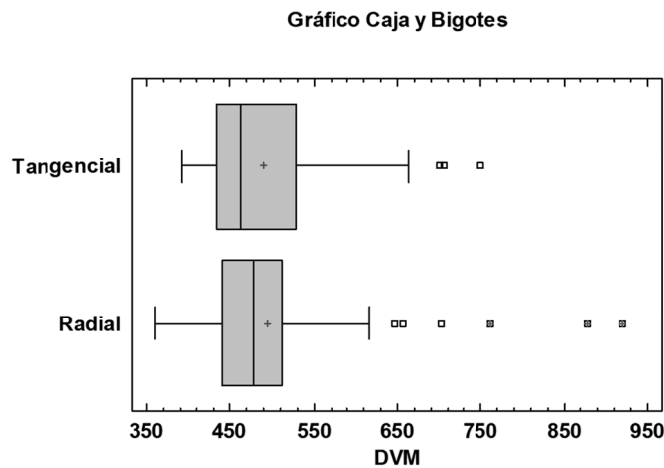


Figura 41: Diagrama de cajas y bigotes de la densidad de las virutas (DVM) en dirección radial y tangencial

Por lo tanto, se puede concluir que no hay necesidad de múltiples extracciones en una misma área de medición (150 mm). Este hecho concuerda con mediciones hechas con otros dispositivos de sondeo como el penetrómetro y el arranque de tornillos (Bobadilla *et al.*, 2007). Tampoco es necesario tener en cuenta la dirección de ensayo (radial o tangencial).

Debido a la variabilidad del parámetro estimado (densidad) dentro de la misma pieza de madera, para evaluar piezas de gran tamaño, se recomienda hacer varias mediciones en diferentes zonas de las mismas. El número de mediciones dependerá de las dimensiones totales de la pieza. Bobadilla *et al.* (2007) recomiendan para diferentes métodos, una medición por metro, y si es posible en diferentes caras.

Asimismo, se realizó un estudio de diferencias entre densidad de las probetas y densidad media de las virutas (DVM). Puesto que el P-valor (0,0046) de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de ambas variables con un nivel del 5% de significación.

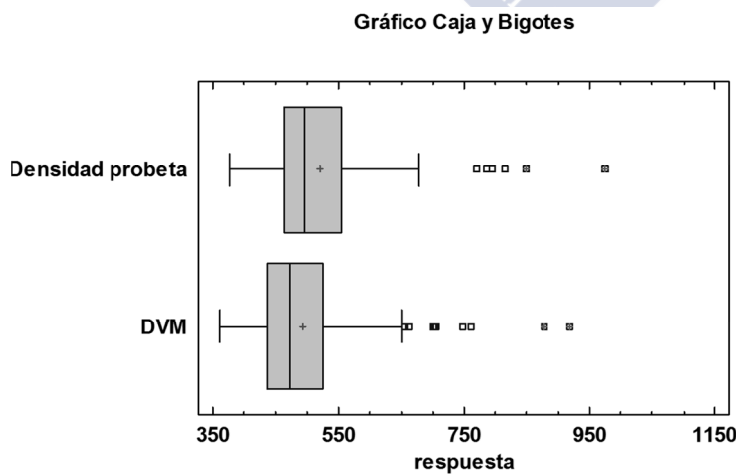


Figura 42: Diagrama de caja y bigotes de los valores de densidad de las probetas y las virutas. DVM se refiere a la densidad media de las tres extracciones

En la tabla 10 se observa que la densidad de las probetas es un 5% mayor que la de las virutas extraídas, además existen diferencias estadísticamente significativas entre ambas medidas, figura 42.

Esto se debe a tres razones:

- Existe una pérdida de material (polvo de madera) durante la extracción del material.
- Hay una pérdida de humedad de la muestra extraída, debido al aumento de la temperatura causado por la fricción de la broca, al aumento de superficie de madera expuesta y a la corriente de aire y la baja presión generada por el sistema de aspiración.
- Cuando se realiza el taladrado, la broca produce un fallo en el corte en las fibras que quedan en dirección tangencial lo que provoca que las fibras colapsen, figura 43. Por tanto el volumen de material extraído es menor al volumen del orificio generado. Esto se agrava en madera de densidad baja y con brocas desafiladas.

La media del contenido de humedad de las probetas y las muestras fue 11,03% y 8,62% respectivamente. Por lo tanto en la operación se pierde aproximadamente un 2,31% de humedad.

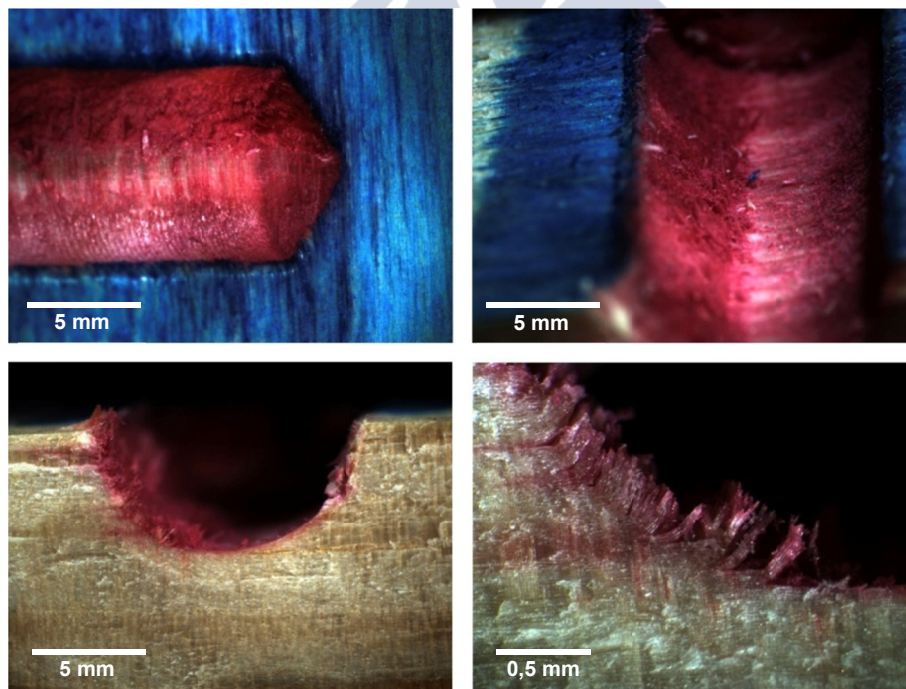


Figura 43: Detalle del fallo en el corte de la broca que sufren las fibras de madera (corte longitudinal del orificio teñido con safranina)

Debido a las diferencias estadísticamente significativas que existen entre las densidades de las probetas y las densidades de las virutas extraídas se propone utilizar esta última como estimador de la densidad de las probetas como se refleja en la ecuación 3 y la figura 44.

$$\rho = 0,871 \cdot DVM + 90,39 \quad R^2 = 80,7\% \quad (3)$$

Donde “ ρ ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3) y “DVM” es la media de la densidad de las virutas extraídas (kg/m^3).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre la densidad y DVM con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 80,7% de la variabilidad en la densidad. El coeficiente de correlación es igual a 0,90, indicando una relación fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 37,74 kg/m^3 .

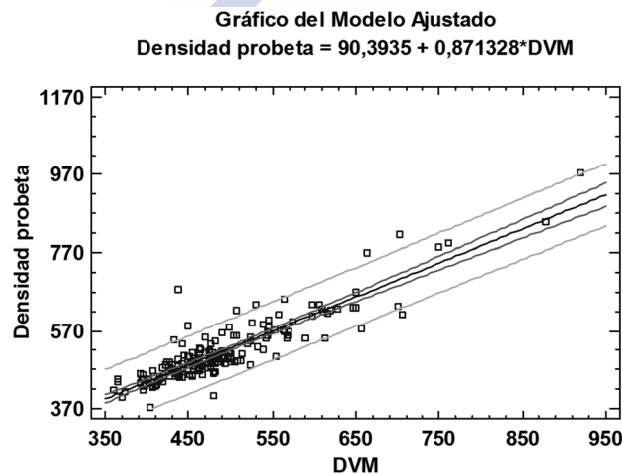


Figura 44: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según DVM

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,0589666) de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0,05, se asume que provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 45.

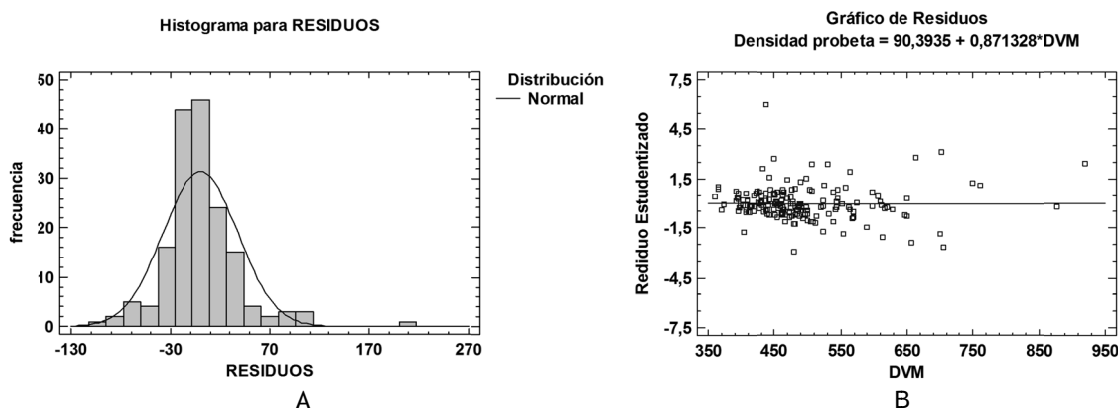


Figura 45: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para DVM (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

Con el fin de simplificar los cálculos y reducir los errores de medición, se propone el uso de otro modelo de regresión para estimar la densidad de la muestra con el peso de las virutas extraídas por la perforación, incluyendo el peso del filtro.

Si se analiza la relación estadística entre el peso promedio de las virutas (incluyendo el peso del filtro) y la densidad de las probetas, se obtiene una fuerte relación estadística entre las variables (P-valor <0,05) y el coeficiente de correlación "R" de 0,92. Por lo tanto, parece lógico establecer un modelo de regresión para estimar la densidad usando el peso de las virutas como estimador. El modelo resultante se muestra en la ecuación 4 y la figura 46.

$$\rho = 383,126 \cdot PV123 - 30,79 \quad R^2 = 84,4\% \quad (4)$$

Donde “ρ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m³) y “PV123” la media del peso de las virutas extraídas (g), incluyendo el filtro.

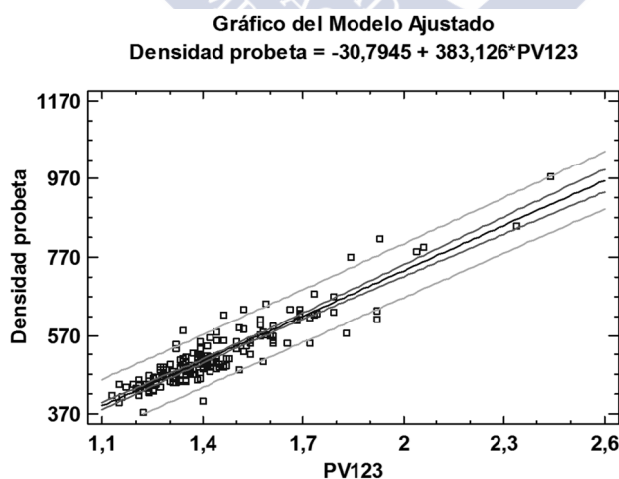


Figura 46: Grafico del modelo de regresión utilizando la media del peso del filtro y las virutas de los tres orificios (PV123) como estimador

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 84,4% de la variabilidad en densidad. El coeficiente de correlación es igual a 0,92, indicando una relación fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 33,94 kg/m³.

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,171467) de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 47.

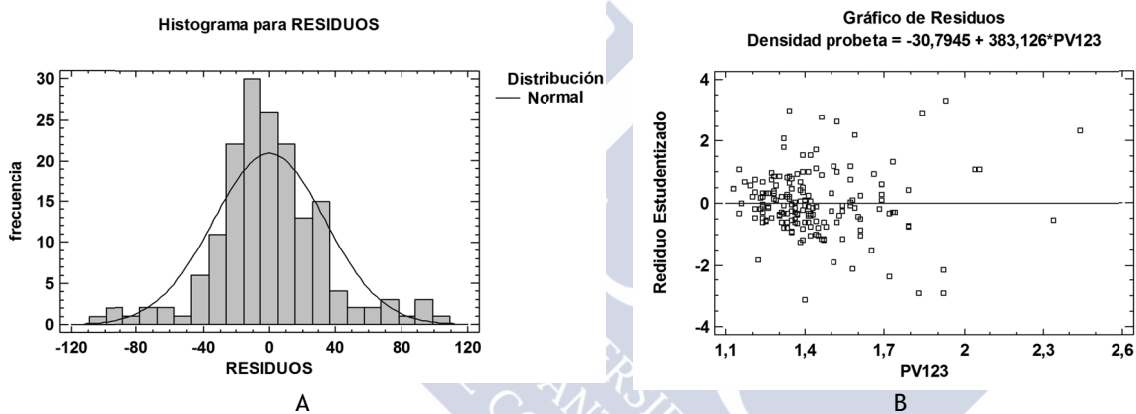


Figura 47: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PV (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

Como puede observarse, los valores de R^2 obtenidos son significativamente mayores que los obtenidos en diferentes estudios con otros métodos de sondeo como el penetrómetro o el arranque de tornillo (Bobadilla *et al.* 2007; Montón 2012). Por otro lado son del mismo orden o ligeramente más bajos que los obtenidos con el resistógrafo (Mariño *et al.* 2002; Acuña *et al.* 2011) o la extracción de probetas testigo (Montón 2012; Íñiguez *et al.* 2015).

8.3 TERCERA FASE: ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN 10 ESPECIES CON LOS PROTOTIPOS 4 Y 5 Y COMPARACIÓN CON MÉTODOS TRADICIONALES

Aquí se reflejan los resultados obtenidos en los ensayos realizados en las 10 especies de maderas utilizadas en construcción con el penetrómetro, el arranque de tornillo, extracción de probeta testigo y los prototipos 4 y 5 del Extractor de Virutas.

Los resultados se expondrán en el siguiente orden:

- Densidades de las probetas por especie.
- Estimación de la densidad en 10 especies con el arranque de tornillo.
- Estimación de la densidad en 10 especies con el penetrómetro.
- Estimación de la densidad en 10 especies con probetas testigo.
- Estimación de la densidad en 10 especies con el extractor eléctrico.
- Estimación de la densidad en 10 especies con el extractor a batería.
- Comparación de todos los modelos obtenidos.

8.3.1 Densidades de las probetas por especies

En la tabla 13 se muestran el valor medio de las densidades de las diferentes especies así como su coeficiente de variación. Las probetas 23, 24 y 27 de pino pinaster fueron retiradas por estar parcial o totalmente enteadas, lo que daría lugar a un dato de densidad anómalo.

Tabla 13: Estadísticos para la densidad de las diferentes especies

Especie	Cód.	Nº	Media (kg/m ³)	CV (%)	Mínimo (kg/m ³)	Máximo (kg/m ³)	Normalidad Kolmogorov-Smirnov	P-valor (p>0,05)
Cedro	1	30	347,35	1,69%	335,53	355,42	Si	0,0810775
Chopo	2	30	504,26	2,40%	483,01	524,23	Si	0,976516
Radiata	3	30	476,15	8,88%	376,52	540,88	Si	0,676762
Pinaster	4	27	543,18	9,57%	449,27	640,82	Si	0,419629
Silvestre	5	30	573,00	6,31%	527,45	638,23	Si	0,375042
Laricio	6	30	585,12	12,12%	438,26	712,34	Si	0,949009
Castaño	7	30	614,61	7,71%	531,29	673,21	Si	0,131644
Roble	8	30	671,59	3,45%	619,43	714,54	Si	0,904288
Iroko	9	30	617,37	4,97%	570,19	682,89	Si	0,642624
Elondo	10	30	974,89	1,17%	941,09	991,42	Si	0,2318
Total		297	591,23	27,02%	335,53	991,42	No	3,90854E-06

Como se aprecia en la tabla 13 cada grupo de probetas sigue una distribución normal con un nivel de confianza del 95%. Por otro lado, 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 diferentes densidades.

Se realizó una comparación entre las densidades comerciales de las diferentes especies extraídas de Guindeo *et al.* (1997) y las densidades reales obtenidas como se observa en la figura 48. Cabe destacar que la elevada densidad de las piezas de chopo y silvestre y la baja densidad de las piezas de iroko y roble redujo la variabilidad de la población de muestras.

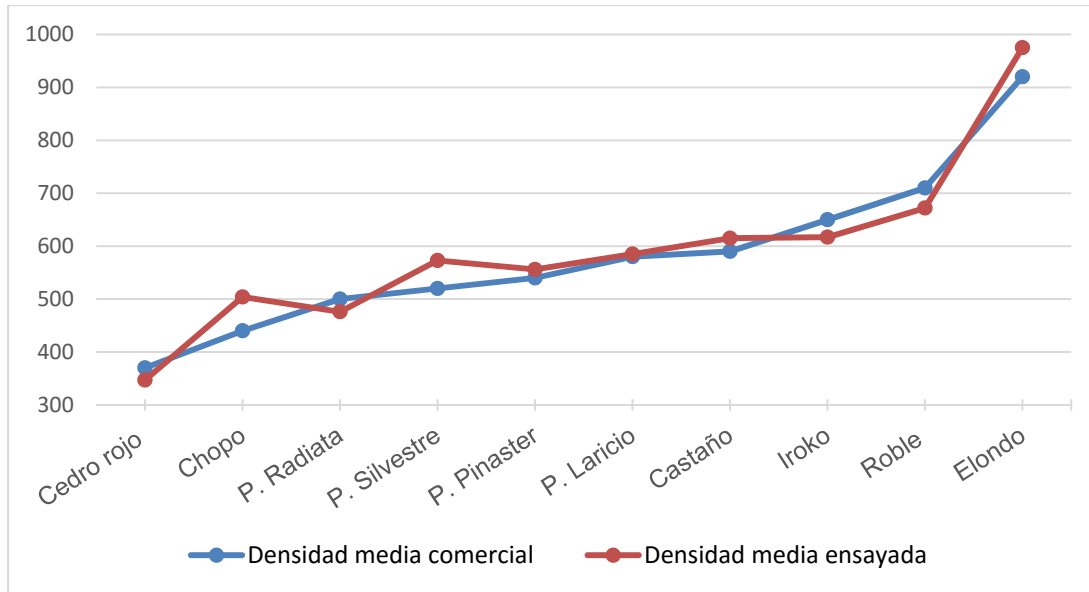


Figura 48: Comparación de la densidad teórica y la densidad real obtenida por especies

Observando la figura 48 se deduce que existen grupos de probetas con la misma densidad o muy similar. Para comprobar esta hipótesis se realizó una prueba de múltiples rangos para la densidad de las probetas por especie (Método: 95,0 porcentaje LSD). En la tabla 14 se aprecia que el total de las 10 especies puede ser agrupado en siete grupos homogéneos con un nivel de confianza del 95%. Los pinos silvestre, laricio y pinaster se podrían agrupar, al igual que el castaño y el iroko. A pesar de esto, se decide continuar el análisis sin agrupar los datos dado que los modelos de estimación se propondrán para el conjunto global de las 10 especies.

Tabla 14: Pruebas de múltiple rangos para densidad de las probetas por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD

Especie	Cód.	Casos	Media (kg/m ³)	Grupos homogéneos	Grupos
Cedro	1	30	347,35	X	a
Radiata	3	30	476,15	X	b
Chopo	2	30	504,26	X	c
Pinaster	4	27	543,18	X	d
Silvestre	5	30	573,00	X	d
Laricio	6	30	585,12	X	d
Castaño	7	30	614,61	X	e
Iroko	9	30	617,37	X	e
Roble	8	30	671,59	X	f
Elondo	10	30	974,89	X	g

8.3.2 Estimación de la densidad en 10 especies con el método de arranque de tornillos

Para la estimación de la densidad en 10 especies con el método de arranque de tornillos, se realizaron dos ensayos por probeta, coincidentes respectivamente con las direcciones radial y tangencial. El ensayo consiste en medir la fuerza necesaria para extraer un tornillo tirafondo de la probeta de madera, expresada en kilonewtons, para correlacionarla con la densidad.

En la tabla 15 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. Como se observa en la tabla 16, dado que todos los P-valores son mayores que 0,05 se asume que MAT para cada dirección y especie provienen de una distribución normal con un 95% de nivel de confianza. Al igual que con la densidad de las probetas, se puede rechazar que MAT del conjunto total de 10 especies provenga de una distribución normal al 95%.

Tabla 15: Valores medios de la resistencia al arranque de tornillos (MAT) en dirección radial y tangencial y el valor medios de ambas direcciones

Esp.	Cód.	MAT _R		MAT _T		MAT _M	
		Media (kN)	CV (%)	Media (kN)	CV (%)	Media (kN)	CV (%)
Cedro	1	0,89	10,98	0,89	9,26	0,89	6,42
Chopo	2	1,45	14,11	1,40	20,68	1,43	13,75
Radiata	3	1,79	26,32	1,84	28,06	1,81	23,54
Pinaster	4	1,71	22,45	1,78	22,41	1,75	19,85
Silvestre	5	1,49	16,66	1,25	19,70	1,37	14,77
Laricio	6	1,48	28,57	1,57	28,43	1,53	25,47
Castaño	7	1,80	28,92	1,89	25,83	1,84	24,84
Roble	8	2,07	18,89	1,98	15,09	2,02	15,44
Iroko	9	2,14	16,46	1,95	19,09	2,04	14,23
Elondo	10	3,94	15,13	3,92	11,59	3,94	11,10
10 especies		1,88	46,05	1,85	46,48	1,86	44,92

Se realizó una prueba de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones de las dos muestras, radial y tangencial para cada una de las especies. Debido a que los P-valores son mayores que 0,05, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones (radial y tangencial) para cada una de las especies con un 95,0%.

Puesto que el P-valor (0,6673) de la prueba-F del test ANOVA es mayor que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las direcciones de ensayo con un nivel del 5% de significación como se aprecia en la figura 49. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por (Bobadilla *et al.* 2007).

Tabla 16: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para resistencia al arranque de tornillos (MAT) en dirección radial, tangencial y el valor media de ambas por especies (95%; P-valor>0,05 →Normal)

Cód.	MAT _R (P-valor)	MAT _T (P-valor)	MAT _M (P-valor)
1	0,852457	0,987714	0,664983
2	0,926144	0,861768	0,603718
3	0,674331	0,777349	0,727663
4	0,762444	0,926311	0,55037
5	0,184832	0,55924	0,716693
6	0,534877	0,54197	0,795099
7	0,192852	0,286434	0,494359
8	0,834107	0,709607	0,853794
9	0,753882	0,779833	0,836407
10	0,984876	0,537203	0,973718
10 especies	0,0000	0,0000	0,0000

Gráfico Caja y Bigotes

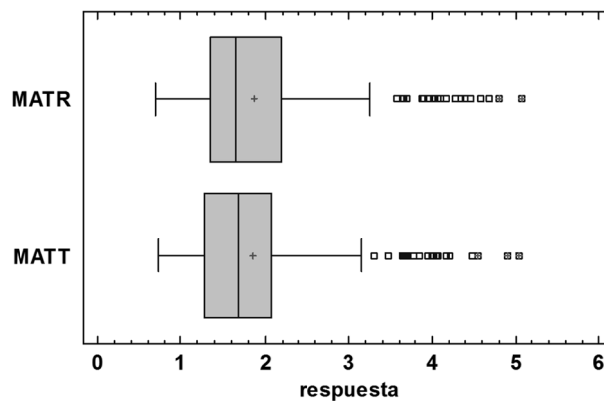


Figura 49: Diagrama de cajas y bigotes comparando MAT en dirección radial y tangencial para el conjunto de las 10 especies

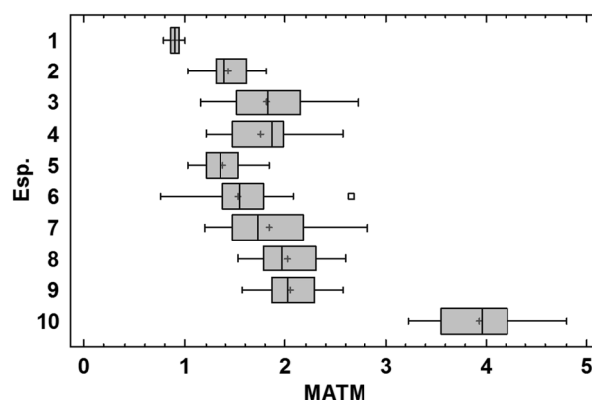
Dado que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos direcciones de ensayos, no es necesario conocer la dirección de ensayo en esta metodología. Por ello, de aquí en adelante se trabajó con la media aritmética de valores de resistencia al arranque de tornillos de las dos direcciones (MAT_M).

Por otro lado se llevó a cabo el análisis de las diferencias entre especies. Puesto que el 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 10 variables con un nivel del 5% de significación. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realiza la Prueba de Múltiples Rangos, tabla 17. Se han identificado cinco grupos homogéneos dentro de las 10 especies, figura 50.

Tabla 17: Pruebas de Múltiple Rangos para MAT_M por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD

Especie	Cód.	Media (kN)	Grupos homogéneos
Cedro	1	0,89	X
Silvestre	5	1,37	X
Chopo	2	1,43	X
Laricio	6	1,53	X
Pinaster	4	1,75	X
Radiata	3	1,81	X
Castaño	7	1,843	X
Roble	8	2,02	X
Iroko	9	2,04	X
Elondo	10	3,94	X

Gráfico Caja y Bigotes

Figura 50: Diagrama de cajas y bigotes comparando MAT_M (en kN) para cada una de las especies

No se halló ningún modelo de regresión simple que cumpliera con las hipótesis de linealidad e independencia de sus residuos para el total de las 10 especies. Para que el modelo cumpliera con todas las hipótesis fue necesario eliminar cinco especies (cedro, chopo, radiata, pinaster y elondo). Teniendo en cuenta estas condiciones y puesto que el P-valor (0,000) en la tabla ANOVA es menor 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 la figura 51.

$$\rho = 0,445,483 + 94,63 \cdot MAT_M \quad R^2 = 53,39\% \quad (5)$$

Donde “ ρ ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3); “ MAT_M ” es la media de la fuerza necesaria para arrancar el tornillo, entre el valor en dirección radial y en dirección tangencial (kN) de las siguientes especies p. silvestre, p. laricio, castaño, roble e iroko.

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica el 53,39% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El coeficiente de correlación es igual a 0,73 indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. Finalmente, el error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es $38,34 \text{ kg/m}^3$.

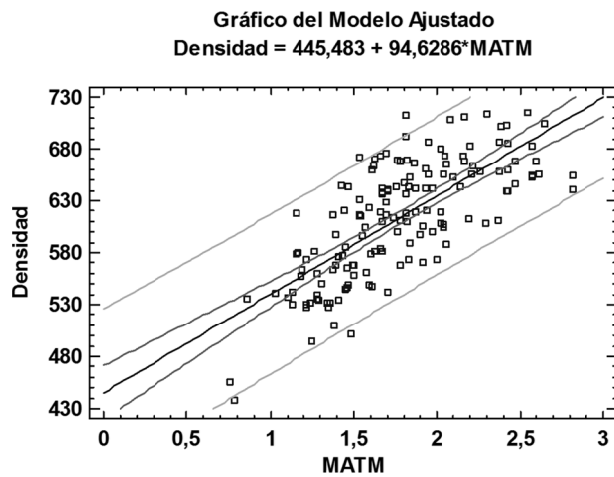


Figura 51: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según MAT_M

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño de las pruebas realizadas (0,590528) es mayor a 0,05, se asume 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, figura 52.

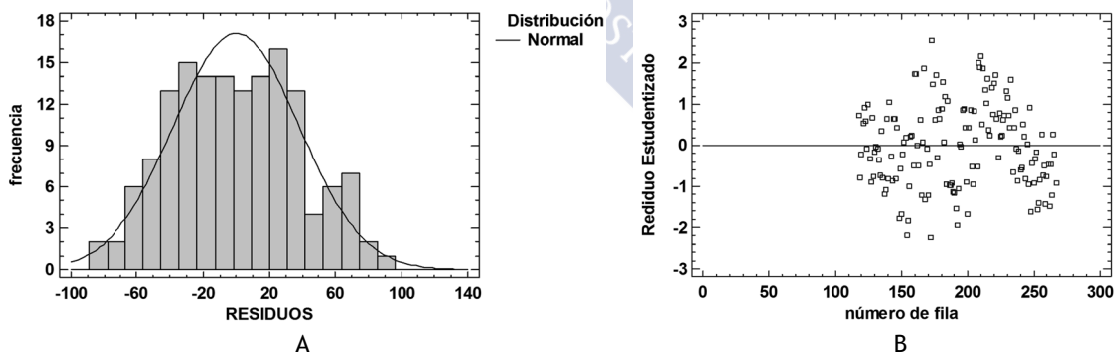


Figura 52: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para MAT_M (normalidad); B: Gráfico de número de fila vs residuos t-Student de la regresión lineal (independencia)

El modelo anterior solo se puede utilizar en cinco de las 10 especies estudiadas. Sorprende que dentro del conjunto de las cinco especies rechazadas se encuentren el chopo y dos pinos (radiata y pinaster) que han sido estudiado con anterioridad o de los cuales se han obtenido modelos de estimación (Bobadilla *et al.* 2007, Íñiguez 2007 y Montón 2012). Por otra parte en el caso del cedro y el elondo cabía esperar resultados anormales, por densidades

extremas. Para analizar estas especies (cedro y elondo) es necesario variar las condiciones de ensayo, el tamaño del tornillo y la profundidad de atornillado para que el ensayo se adecue a la características de este tipo de maderas.

Para obtener un modelo válido para el conjunto de las 10 especies, se propuso realizar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre densidad (kg/m^3) y 10 variables independientes, MAT_M , Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8 y Z9. Las Z representan variables cualitativas que hacen referencia a la especie de madera.

Puesto que el P-valor (0,000) en la tabla ANOVA es menor 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 6 y la figura 53.

$$\rho = 66,71 \cdot \text{MAT}_M - 424,583 \cdot Z1 - 303,189 \cdot Z2 - 357,334 \cdot Z3 - 285,685 \cdot Z4 - 230,938 \cdot Z5 - 229,04 \cdot Z6 - 220,7 \cdot Z7 - 175,789 \cdot Z8 - 231,344 \cdot Z9 + 712,27$$

$$R^2 = 96,29\% \quad (6)$$

Donde “ ρ ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3); “ MAT_M ” es la media de la fuerza necesaria para arrancar el tornillo, entre el valor en dirección radial y en dirección tangencial (kN); “Z1” es Cedro rojo; “Z2” es Chopo; “Z3” es Pino radiata; “Z4” es Pino pinaster; “Z5” es Pino silvestre; “Z6” es Pino laricio; “Z7” es Castaño; “Z8” es Roble y “Z9” es Iroko. Asignar un 1 a la especie elegida y un 0 a las demás.

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica el 96,29% de la variabilidad en la densidad de las probetas. Por otro lado, el estadístico R^2 ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 96,16%. Finalmente, el error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es $31,28 \text{ kg/m}^3$.

Gráfico de Den. probeta

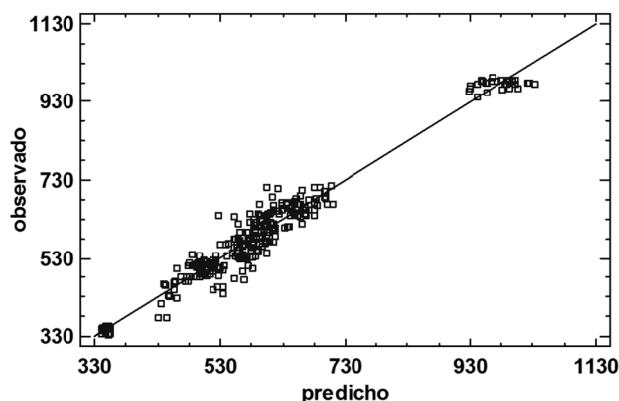


Figura 53: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según MAT_M

Para determinar si el modelo puede simplificarse se estudia el P-valor de cada una de las variables. Dado que el P-valor de las 10 variables son menores que 0,05, los 10 términos son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, no se elimina ninguna variable del modelo.

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño de las pruebas realizadas (0,28027) es mayor a 0,05, se asume 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, figura 54.

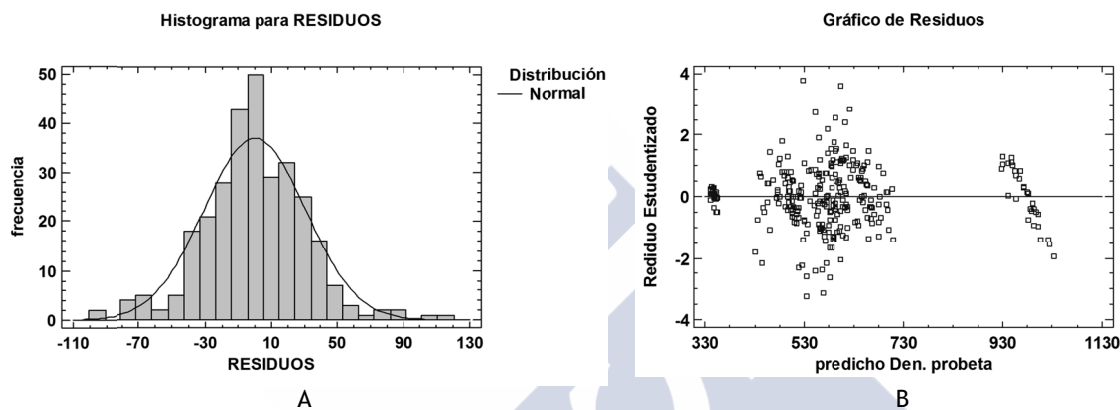


Figura 54: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para MAT_M (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

Con el modelo anterior es necesario tomar dos medidas y obtener el valor medio para introducirlo en la fórmula. Para que no sea necesario obtener la media, se propone realizar un modelo con todos los valores sin tener en cuenta su dirección. Puesto que el P-valor (0,000) en la tabla ANOVA es menor 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 7 y la figura 55.

$$\rho = 48,55 \cdot MAT - 479,862 \cdot Z1 - 348,753 \cdot Z2 - 395,866 \cdot Z3 - 325,438 \cdot Z4 - 277,474 \cdot Z5 - 272,76 \cdot Z6 - 258,728 \cdot Z7 - 210,514 \cdot Z8 - 265,706 \cdot Z9 + 783,89$$

$$R^2 = 95,78\% \quad (7)$$

Donde “ ρ ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3); “MAT” es la fuerza necesaria para arrancar el tornillo sin tener en cuenta la dirección de ensayo (kN); “Z1” es Cedro rojo; “Z2” es Chopo; “Z3” es Pino radiata; “Z4” es Pino pinaster; “Z5” es Pino silvestre; “Z6” es Pino laricio; “Z7” es Castaño; “Z8” es Roble y “Z9” es Iroko. Asignar un 1 a la especie elegida y un 0 a las demás.

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 95,78% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El estadístico R^2 ajustada, que es más apropiada para comparar

modelos con diferente número de variables independientes, es 95,71%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 33,07 kg/m³.

Para determinar si el modelo puede simplificarse se estudia el P-valor de cada una de las variables. Puesto que el P-valor de las 10 variables son menores que 0,05, los 10 términos son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, no se elimina ninguna variable del modelo.

Este modelo cuenta con menor correlación que el anterior, pero su aplicación es más sencilla al trabajar con valores de una sola medida.

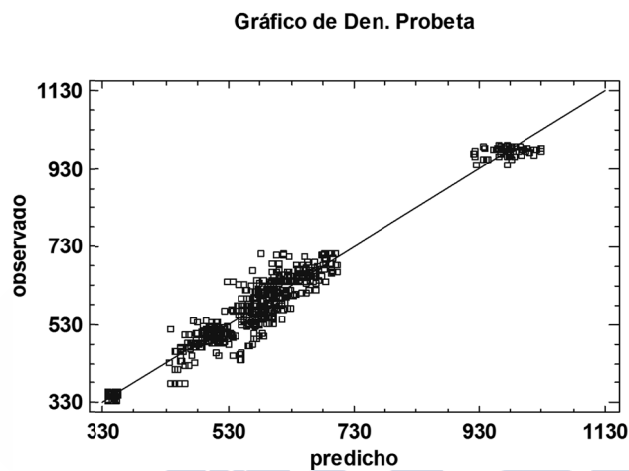


Figura 55: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según MAT

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,114376) de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

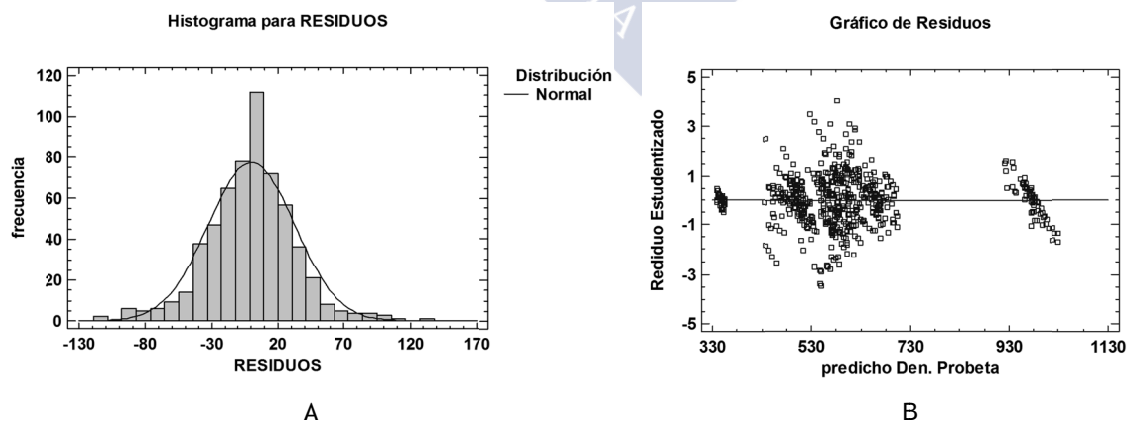


Figura 56: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para MAT (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 56.

8.3.3 Estimación de la densidad en 10 especies con penetrómetro

Se realizaron dos ensayos por probeta coincidente con las direcciones radial y tangencial. El ensayo consiste en medir la profundidad de penetración en milímetros en la madera de una varilla metálica disparada con energía constante, para correlacionarla con la densidad de la probeta.

En la tabla 18 se muestran el valor medio de las profundidades de penetración para las diferentes especies así como su coeficiente de variación.

Tabla 18: Valores medios de resistencia a la penetración (PN) en dirección radial y tangencial en el valor medio de ambas direcciones

Esp.	Cód.	PN _R		PN _T		PN _M	
		Media (mm)	CV (%)	Media (mm)	CV (%)	Media (mm)	CV (%)
Cedro	01	19,02	11,85	18,17	9,89	18,6	8,99
Chopo	02	9,20	12,57	8,63	11,97	8,9	9,78
Radiata	03	10,40	24,17	9,73	26,29	10,1	21,74
Pinaster	04	10,37	19,86	10,85	18,90	10,6	17,45
Silvestre	05	10,67	14,63	13,60	19,75	12,1	15,38
Laricio	06	9,72	20,75	11,87	19,39	10,8	16,93
Castaño	07	8,63	18,87	7,90	15,71	8,3	14,71
Roble	08	8,43	21,50	7,52	22,94	8,0	20,80
Iroko	09	7,63	11,66	8,27	15,54	7,9	10,36
Elondo	10	4,30	10,84	4,43	14,12	4,4	9,48
10 especies		9,83	40,17	10,09	40,26		10,0

Dado que las muestras de elondo e iroko no cumplen con la hipótesis de normalidad han sido descartadas de los siguientes análisis, tabla 19.

Puesto que el P-valor (0,4336) de la razón-F del test ANOVA es mayor que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos variables (radial y tangencial) con un nivel del 5% de significación. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Bobadilla *et al.* (2007).

Se realizó una prueba de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones de las dos muestras, radial y tangencial. Debido a que los P-valores son mayores que 0,05, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones (radial y tangencial) para cada una de las especies con un 95,0%, figura 57.

Tabla 19: Normalidad de las muestras por especies para la profundidad de penetración (PN) (Prueba Kolmogorov-Smirnov 95%; P-valor > 0,05 → Normal)

Cód.	PN _R (P-valor)	PN _T (P-valor)	PN _M (P-valor)
1	0,363478	0,738565	0,432774
2	0,364132	0,159493	0,51992
3	0,337448	0,0954954	0,239158
4	0,186267	0,786034	0,141781
5	0,389297	0,475787	0,417485
6	0,30293	0,471391	0,629571
7	0,510788	0,386094	0,637172
8	0,503732	0,140352	0,241678
9	0,0224884	0,162377	0,150763
10	0,000017946	0,00475913	0,0349849
10 especies	0,0000	0,0000	0,0000

Gráfico Caja y Bigotes

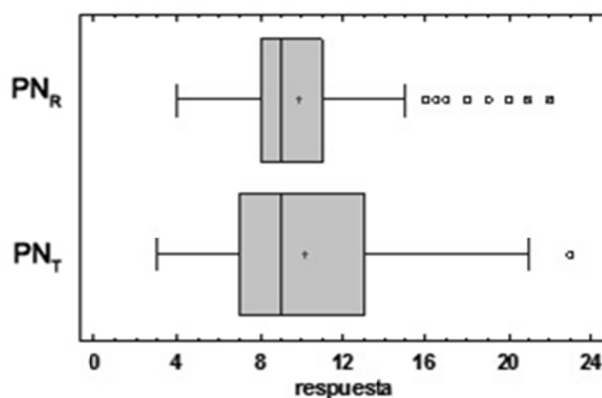


Figura 57: Diagrama de cajas y bigotes comparando PN en dirección radial y tangencial para el conjunto de las 10 especies

Dado que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos direcciones de ensayos, no es necesario conocer la dirección de ensayo en esta metodología. Por lo tanto de aquí en adelante se trabajó con la media aritmética de valores de penetración de las dos direcciones (PN_M).

Puesto que el 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 ocho variables con un nivel del 5% de significación. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realizaron Pruebas de Múltiples Rangos.

Se han identificado cinco grupos homogéneos (ver alineación de las X en columnas, tabla 20). Como se aprecia en la figura 58 (caja y bigotes para todas las especies) los valores de los

datos obtenidos para el chopo, el pino radiata y el pino pinaster son muy bajos. Para especies con esas densidades se esperaría valores más altos de penetración.

Tabla 20: Pruebas de Múltiple Rangos para PN_M por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD

Especie	Cód.	Media (mm)	Grupos homogéneos
Roble	8	7,97	X
Castaño	7	8,27	X X
Pinaster	2	8,92	X
Radiata	3	10,07	X
Chopo	4	10,61	X
Laricio	6	10,79	X
Silvestre	5	12,13	X
Cedro	1	18,59	X

Gráfico Caja y Bigotes

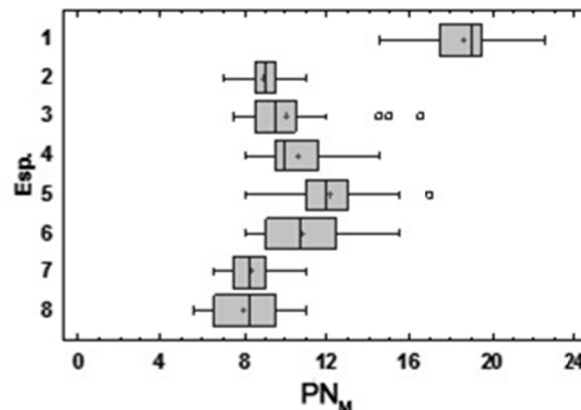


Figura 58: Diagrama de cajas y bigotes comparando PN_M (mm) para cada una de las especies

Se propone realizar un modelo de regresión que relacione PN_M con la densidad de las probetas (10 especies). Al igual que ocurrió en el caso método de arranque de tornillos, no se halló ningún modelo de regresión simple que cumpliera con las hipótesis de linealidad e independencia o normalidad de sus residuos. De la misma forma, para que el modelo cumpliera con todas la hipótesis fue necesario eliminar cinco especies (cedro, chopo, radiata, pinaster y elondo). Teniendo en cuenta estas condiciones y puesto que el P-valor (0,0000) en la tabla ANOVA es menor 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 8 y la figura 59.

$$\rho = 776,09 - 17,376 \cdot PN_M \quad R^2 = 50,77\% \quad (8)$$

Donde “ ρ ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3); “ PN_M ” es la media de la penetración de la varilla, entre el valor en dirección radial y en dirección tangencial (mm).

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 50,77% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El coeficiente de correlación es igual a 0,71 indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 39,40 kg/m³.

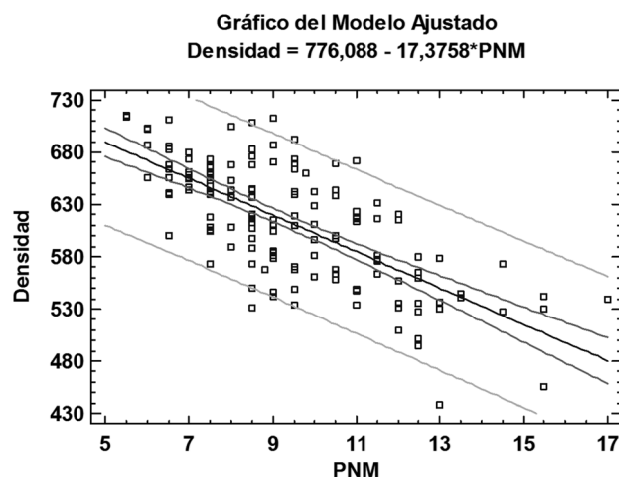


Figura 59: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PN_M

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,927925) de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 60.

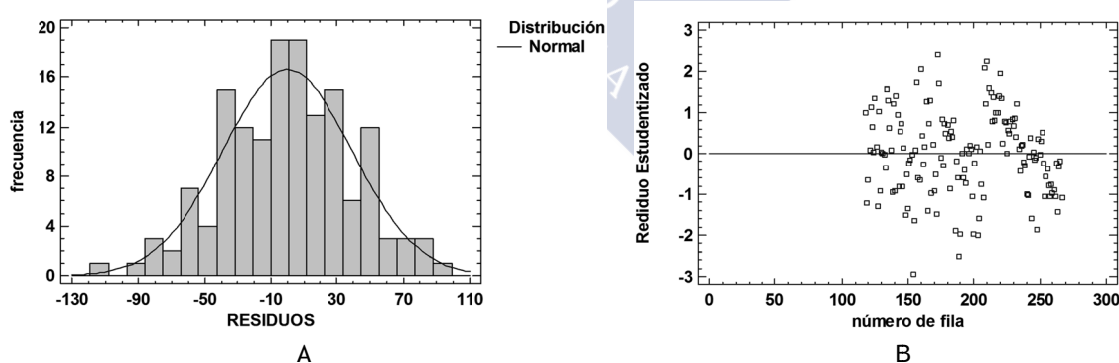


Figura 60: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PN_M (normalidad); B: Gráfico de número de fila vs residuos t-Student de la regresión lineal (independencia)

El modelo anterior solo se puede utilizar en cinco de las 10 especies estudiadas. Sorprende que al igual que con el MAT, dentro del conjunto de las cinco especies rechazadas se encuentren el chopo y dos pinos (radiata y pinaster) que han sido estudiado con anterioridad o de los cuales se han obtenido modelos de estimación (Bobadilla *et al.* 2007,

Íñiguez 2007 y Montón 2012). Al igual que en el caso anterior los valores extremos de densidad del cedro y el elondo produjeron valores anómalos. En este caso no es posible variar las condiciones de ensayo (diámetro de la varilla y energía de disparo) para que el ensayo se adecue a las características de este tipo de maderas, la opción sería elegir el modelo de Pilodyn que más se adapte a estas.

Para conseguir un modelo válido para las 10 especies, se propuso realizar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre densidad (kg/m^3) y 10 variables independientes, PN_M , Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8, Z9. Las Z representan variables cualitativas que hacen referencia a la especie de madera.

Puesto que el P-valor (0,0000) en la tabla ANOVA es menor 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 9 y la figura 61.

$$\rho = -15,07 \cdot PN_M - 413,128 \cdot Z1 - 402,048 \cdot Z2 - 412,821 \cdot Z3 - 337,584 \cdot Z4 \\ - 284,827 \cdot Z5 - 292,924 \cdot Z6 - 301,495 \cdot Z7 - 248,906 \cdot Z8 - 303,503 \\ \cdot Z9 + 1040,70$$

$$R^2 = 96,43\% \quad (9)$$

Donde “ ρ ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3); “ PN_M ” es la media de la penetración de la varilla, entre el valor en dirección radial y en dirección tangencial (mm); “Z1” es Cedro rojo; “Z2” es Chopo; “Z3” es Pino radiata; “Z4” es Pino pinaster; “Z5” es Pino silvestre; “Z6” es Pino laricio; “Z7” es Castaño; “Z8” es Roble y “Z9” es Iroko. Asignar un 1 a la especie elegida y un 0 a las demás.

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 96,43% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El estadístico R^2 ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 96,31%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es $30,69 \text{ kg/m}^3$.

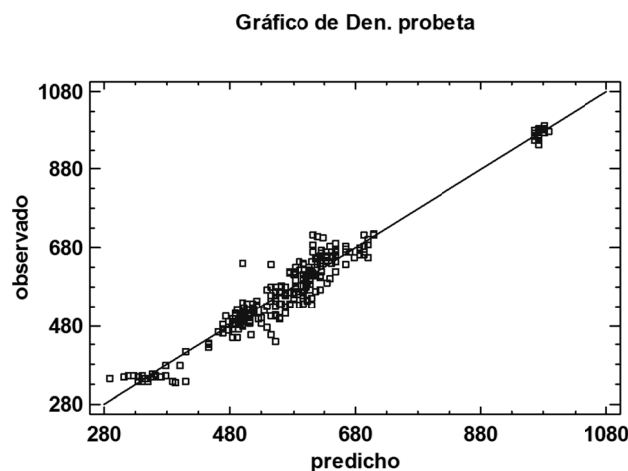


Figura 61: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PN_M

Para determinar si el modelo puede simplificarse se estudia el P-valor de cada una de las variables. Puesto que el P-valor de las 10 variables son menores que 0,05, los 10 términos son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, no se elimina ninguna variable del modelo.

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,0958043) de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza. Así, el modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 62.

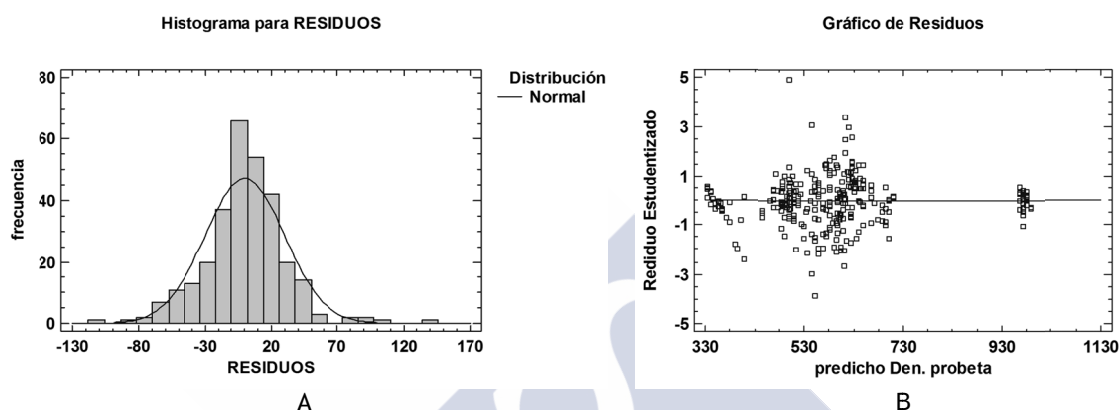


Figura 62: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PN_M (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

Con el modelo anterior es necesario tomar dos medidas y obtener el valor medio para introducirlo en la fórmula. Para que no sea necesario obtener la media, se propone realizar un modelo con todos los valores sin tener en cuenta su dirección de ensayo. Puesto que el P-valor (0,0000) en la tabla ANOVA es menor 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 10 y la figura 63.

$$\rho = -9,71 \cdot PN - 489,305 \cdot Z1 - 426,414 \cdot Z2 - 443,346 \cdot Z3 - 371,024 \cdot Z4 - 326,419 \cdot Z5 - 327,33 \cdot Z6 - 322,38 \cdot Z7 - 268,229 \cdot Z8 - 322,693 \cdot Z9 + 1017,32$$

$$R^2 = 95,71\% \quad (10)$$

Donde “ ρ ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3); “PN” es la penetración de la varilla sin tener en cuenta la dirección de ensayo (mm); “Z1” es Cedro rojo; “Z2” es Chopo; “Z3” es Pino radiata; “Z4” es Pino pinaster; “Z5” es Pino silvestre; “Z6” es Pino laricio; “Z7” es Castaño; “Z8” es Roble y “Z9” es Iroko. Asignar un 1 a la especie elegida y un 0 a las demás.

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 95,71% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El estadístico R^2 ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 95,64%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es $33,33 \text{ kg/m}^3$.

Para determinar si el modelo puede simplificarse se estudia el P-valor de cada una de las variables. Puesto que el P-valor de las 10 variables son menores que 0,05, los 10 términos son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, no se elimina ninguna variable del modelo.

Este modelo cuenta con menor correlación que el anterior, pero su aplicación es más sencilla al trabajar con valores de una sola medida.

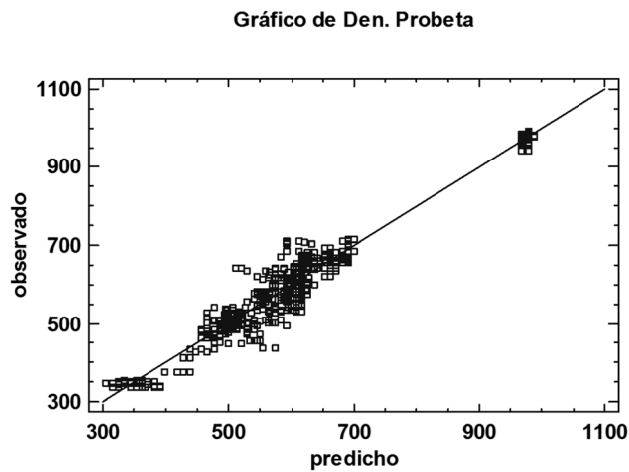


Figura 63: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PN

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,0474213) de las pruebas realizadas es menor a 0,05, se debería rechazar la idea de que los residuos provienen de una distribución normal. Pero, analizando la gráfica de la distribución de los residuos (figura 64 A) y que el P-valor es muy próximo a 0,05 se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

El modelo cumple las hipótesis de linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, pero no con la normalidad de los mismos, figura 64.

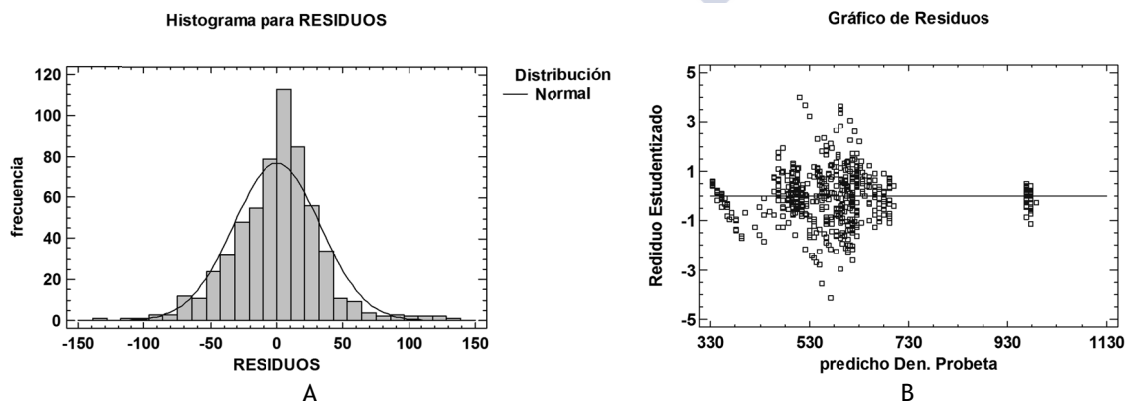


Figura 64: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PN (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

8.3.4 Estimación de la densidad en 10 especies con probetas testigo

Como se comentó en el apartado 7.2.3.3 en este caso se realizaron dos ensayos por probeta coincidente con las direcciones radial y tangencial. El ensayo consiste en extraer un cilindro de madera (probeta testigo) con una fresa para a continuación cortarlo a una longitud definida y calcular su densidad, para finalmente correlacionarla con la de la probeta original. El valor nominal extraído en cada muestra es $\varnothing 10 \times 50$ mm. El valor nominal del orificio generado en la probeta es de $\varnothing 20 \times 60$ mm.

La relación de los datos anómalos para la densidad de la probeta testigo (DPT) excluidos se muestra en la tabla 21.

Tabla 21: Datos anómalos eliminados para DPT

Dirección de ensayo	*Cód.	DPT	Den. Probeta	Defectos
Radial	214	737,39	484,59	Nudo
	425	538,43	635,26	Probeta testigo rota
	428	311,94	449,27	Probeta testigo rota
	518	692,75	573,62	Resina
	617	861,41	642,86	Resina
	702	781,08	665,15	Nudo
	718	1182,61	658,72	Nudo
	730	568,23	684,24	Probeta testigo rota
	1016	873,39	980,17	Probeta testigo rota
Tangencial	223	260,65	505,29	Probeta testigo rota
	509	759,89	599,97	Nudo
	518	766,53	573,62	Resina
	524	779,33	630,94	Resina
	615	723,75	557,21	Nudo

*Cód.: código individual de las probeta, ver Anexo III.

La media de las densidades de las probetas y de las probetas testigo se muestra en la tabla 22. Los mayores coeficientes de variación se producen en las coníferas. Presentan densidades más heterogéneas por las particularidades de este tipo de madera: nudos, resina, alta diferenciación entre albura y duramen, etc.

Como se observa en la tabla 22, el valor medio de la densidad de las probetas testigos para cada especie es mayor que el valor medio de la densidad de las probetas respectivas esto concuerda con investigaciones anteriores (Íñiguez *et al.* 2015). Esto probablemente se deba a que el tipo de fresa utilizado para extraer el cilindro de madera provoca una compactación de la pared lateral del mismo aumentando su densidad. Cuanto más pequeña es la probeta testigo mayor dificultad para evacuar las virutas.

Tabla 22: Valores medios y coeficientes de variación de la densidad de las probetas, densidad de la probeta testigo en dirección radial (DPT_R), tangencial (DPT_T) y la media de ambos valores (DPT_M)

Esp.	Densidad probetas		DPT _R		DPT _T		DPT _M	
	Media (kg/m ³)	CV (%)	Media (kg/m ³)	CV (%)	Media (kg/m ³)	CV (%)	Media (kg/m ³)	CV (%)
1	347,35	1,69	346,77	3,10	347,01	3,81	346,89	2,66
2	504,26	2,40	509,50	2,97	514,48	4,01	512,58	2,73
3	476,15	8,88	470,83	9,27	470,54	10,99	470,68	9,56
4	543,18	9,57	553,20	11,31	553,28	11,83	553,72	11,25
5	572,98	6,42	580,90	8,38	571,86	10,37	573,41	8,84
6	585,12	12,12	606,71	12,48	604,24	13,57	605,50	13,00
7	614,61	7,71	618,20	8,26	628,84	8,60	622,34	8,17
8	671,59	3,45	689,98	4,58	705,02	4,46	697,50	4,07
9	617,37	4,97	635,38	6,06	629,18	7,22	632,28	6,36
10	974,89	1,17	1000,12	2,00	997,72	1,90	998,87	1,71
Total	589,27	26,89	600,80	28,13	603,32	28,34	601,49	28,29

A continuación se estudió la normalidad de las densidades de las probetas testigo (DPT) extraídas para cada una de las especies en ambas direcciones. Como se observa en la tabla 23, dado que todos los P-valores son mayores que 0,05 se asume que provienen de una distribución normal con un 95% de nivel de confianza.

Tabla 23: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para DPT_R, DPT_T y DPT_M

Cód.	DPT _R		DPT _T		DPT _M	
	P-valor	Normalidad	P-valor	Normalidad	P-valor	Normalidad
1	0,930588	si	0,876726	si	0,917942	si
2	0,856674	si	0,997977	si	0,904681	si
3	0,896846	si	0,990357	si	0,990618	si
4	0,402597	si	0,57018	si	0,348997	si
5	0,99237	si	0,666954	si	0,792423	si
6	0,919941	si	0,964749	si	0,986423	si
7	0,84696	si	0,542815	si	0,363286	si
8	0,67317	si	0,856642	si	0,452816	si
9	0,600997	si	0,134613	si	0,374116	si
10	0,925753	si	0,939064	si	0,650763	si
10 especies	0,000344	no	0,001241	no	0,0009075	no

Se realizó una prueba de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones de las dos muestras, radial y tangencial. Debido a que el P-valor (0,981574) es mayor que 0,05, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones (radial y tangencial) con un 95,0%, figura 65. Puesto que el P-valor (0,8580) de la prueba-F del test ANOVA es mayor que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las

medias de las direcciones de ensayo con un nivel del 5% de significación como se aprecia en la figura 65. Estos resultados concuerdan con los obtenidos para una especie por *Íñiguez et al.* (2015).

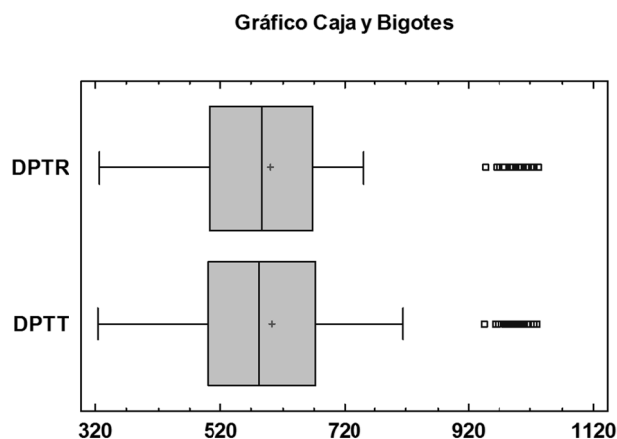


Figura 65: Diagrama de cajas y bigotes comparando DPT en dirección radial y tangencial para el conjunto de las 10 especies

Dado que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos direcciones de ensayos, no es necesario conocer la dirección de ensayo en esta metodología. Por lo tanto de aquí en adelante se trabajó con la media aritmética de la densidad de probeta testigo (DPT_M) entre los valores radial y tangencial.

Puesto que el 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 10 variables con un nivel del 5% de significación, figura 66. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realiza la Pruebas de Múltiples Rangos. Se han identificado ocho grupos homogéneos (ver alineación de las X en columnas, tabla 24).

Tabla 24: Pruebas de Múltiples Rangos para DPT_M por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD

Especie	Cód.	Media (kg/m ³)	Grupos homogéneos
Cedro	1	346,89	X
Radiata	3	470,68	X
Chopo	2	512,58	X
Pinaster	4	553,72	X
Silvestre	5	573,41	X
Laricio	6	605,50	X
Castaño	7	622,33	X X
Iroko	9	632,28	X
Roble	8	697,50	X
Elondo	10	998,87	X

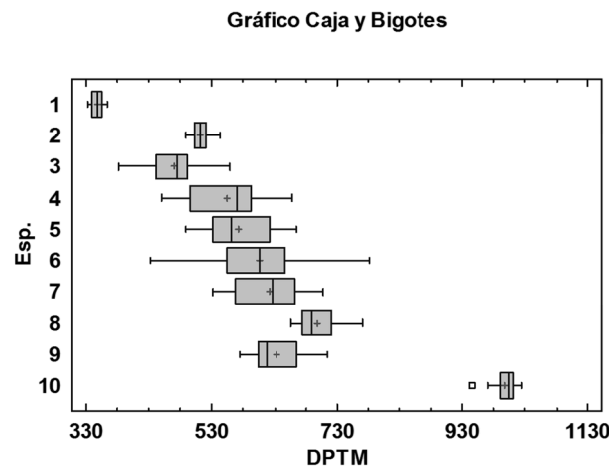


Figura 66: Diagrama de cajas y bigotes comparando DPT_M para las 10 especies

Se realizó una prueba de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones de densidad de las probetas y DPT_M . Debido a que el P-valor (0,254678) es mayor que 0,05, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones con un 95,0%. Puesto que el P-valor (0,4540) de la prueba-F del test ANOVA es mayor que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos variables con un nivel del 5% de significación como se aprecia en la figura 67.

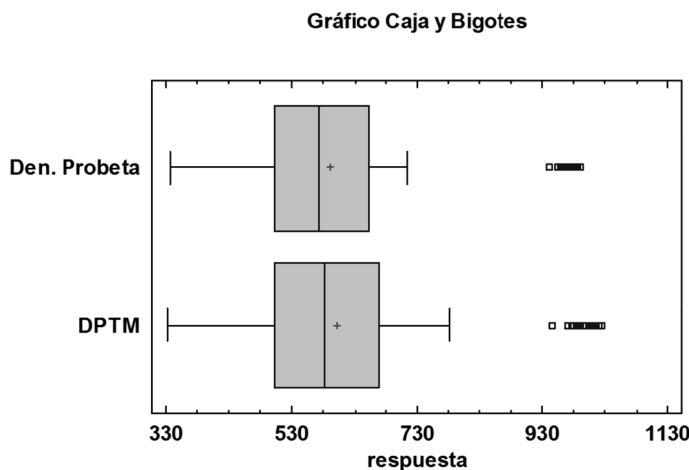


Figura 67: Diagrama de cajas y bigotes para Den. Probeta y densidad de probeta testigo media (DPT_M), en kg/m^3

Aunque no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de densidad de las probetas y DPT_M , el valor de DPT_M es ligeramente superior (1,73%). Se propone un modelo de regresión simple lineal para la estimación de la densidad de las probetas utilizando como estimador la media del peso de las probetas testigo radial y tangencial (PPT_M).

Puesto que el P-valor (0,0000) en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre la densidad y PPT_M con un nivel de confianza del 95,0%. El modelo resultante se muestra en la ecuación 11 y la figura 68.

$$\rho = 229,31 \cdot PPT_M + 41,93 \quad R^2 = 98,62\% \quad (11)$$

Donde “ ρ ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3) y “ PPT_M ” es la media del peso de las probetas testigo radial y tangencial (g).

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 98,62% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El coeficiente de correlación es igual a 0,99, indicando una relación muy fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es $18,96 \text{ kg/m}^3$.

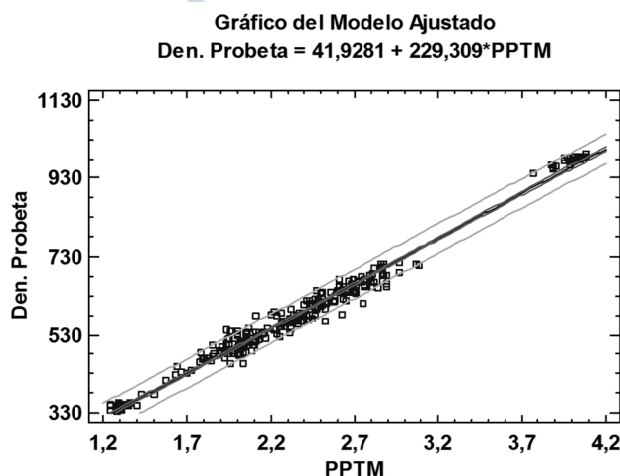


Figura 68: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PPT_M

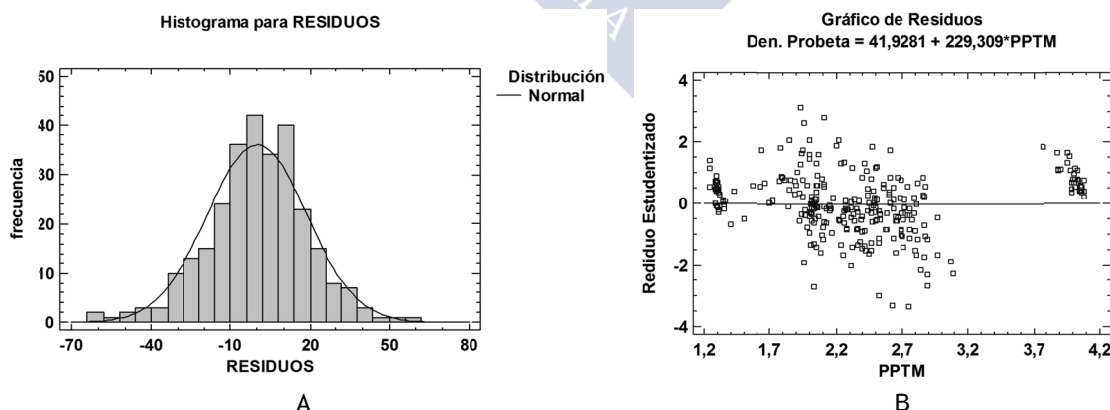


Figura 69: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PPT_M (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,336157) de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza. El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 69.

Con el modelo anterior es necesario tomar dos medidas y obtener el valor medio para introducirlo en la fórmula. Para que no sea necesario obtener la media, se propone realizar un modelo con todos los valores sin tener en cuenta su dirección. Se propone un modelo de regresión simple para la estimación de la densidad de las probetas mediante el estimador PPT.

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre la densidad y PPT con un nivel de confianza del 95,0%. El modelo resultante se muestra en la ecuación 12 y la figura 70.

$$\rho = 228,17 \cdot PPT + 45,06 \quad R^2 = 98,08\% \quad (12)$$

Donde “ ρ ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3); “PPT” es el peso de la probeta testigo sin tener en cuenta la dirección de ensayo (g).

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 98,08% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El coeficiente de correlación es igual a 0,99, indicando una relación muy fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 22,27 kg/m^3 .

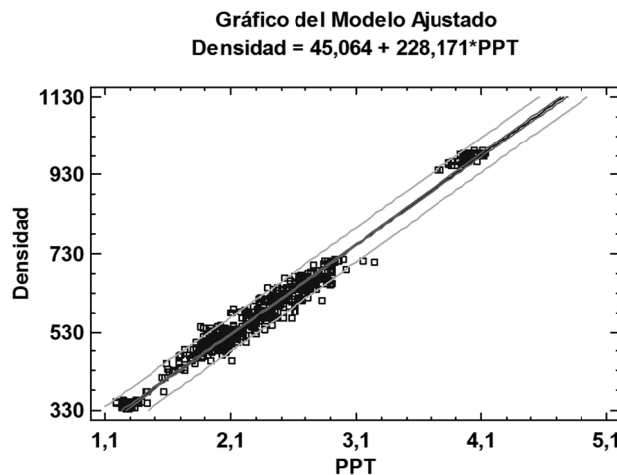


Figura 70: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PPT

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,462576) de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 71.

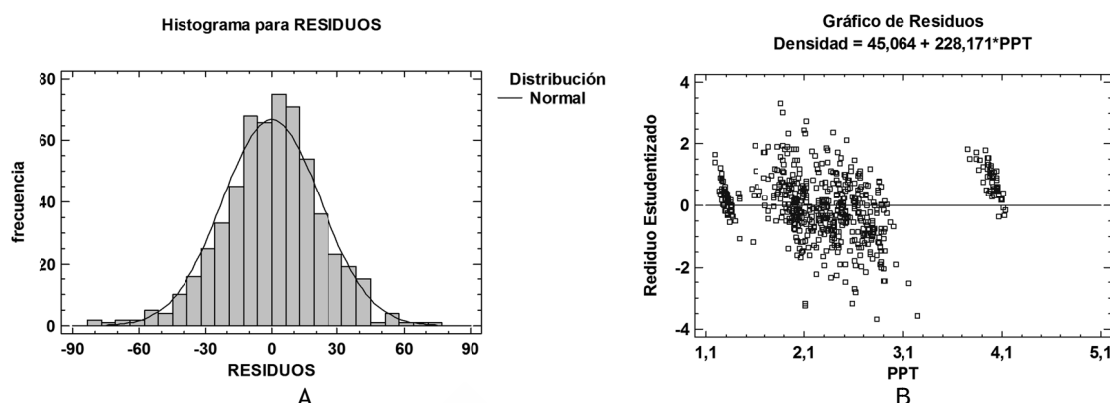


Figura 71: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PPT (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

8.3.5 Estimación de la densidad en 10 especies con el extractor eléctrico

Como se comentó en el apartado 7.2.3.2, en este caso se realizaron dos ensayos por probeta coincidente con las direcciones radial y tangencial. El ensayo consiste en extraer un cilindro de madera en forma de virutas y pesarlas para correlacionar ese peso con la densidad de la probeta original. El volumen nominal extraído en cada muestra es $\varnothing 8 \times 47$ mm.

La relación de los datos anómalos excluidos se muestra en la tabla 25. En este método en particular, el alto contenido de resina en una muestra provoca problemas en el funcionamiento del dispositivo. Esto se debe a que, con la resina se forman conglomerados de virutas que se adhieren a la broca y a las paredes internas del mismo evitando el correcto flujo del material al filtro.

Tabla 25: Datos anómalos no considerados

Dirección	*Cód.	Peso bolsa	Densidad	Problema
Radial	425	1,38	635,26	Resina
	524	1,22	630,94	Perdida serrín
Tangencial	528	1,95	578,5	Nudo
	525	1,9	542,49	Nudo
	308	1,6	482,8	Perdida serrín
	425	1,45	635,26	Resina

Cód.*: código individual de las probetas, ver Anexo III.

La media del peso del filtro lleno de virutas extraído con el prototipo 4 en dirección radial (PVE_R), tangencial (PVE_T) y media de ambas direcciones (PVE_M) se muestra en la tabla 26. Al igual que en el caso de las probetas testigo, las coníferas vuelven a ser las que presentan mayores coeficientes de variación.

Tabla 26: Valores medios y coeficientes de variación del peso del filtro lleno de virutas extraído con el prototipo 4 en dirección radial, tangencial y media de ambas direcciones

Especie	Cód.	PVE _R		PVE _T		PVE _M	
		Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)
Cedro	1	1,06	4,12	1,10	2,84	1,08	1,81
Chopo	2	1,42	2,90	1,44	4,00	1,43	2,85
Radiata	3	1,37	8,02	1,34	8,98	1,36	7,48
Pinaster	4	1,47	8,21	1,49	8,23	1,48	7,92
Silvestre	5	1,54	7,04	1,52	7,64	1,53	7,14
Laricio	6	1,61	10,96	1,60	10,52	1,61	10,51
Castaño	7	1,64	7,62	1,66	6,99	1,65	7,08
Roble	8	1,84	4,26	1,88	3,68	1,86	3,56
Iroko	9	1,59	5,01	1,56	5,29	1,57	4,66
Elondo	10	2,48	1,68	2,48	2,08	2,48	1,67
10 especies		1,60	22,97	1,61	22,71	1,61	22,77

Al igual que en la segunda fase (apartado 8.2), las piezas de pino laricio presentaban mezcla de albura y duramen, de ahí la mayor variabilidad de los valores de peso en esta especie.

A continuación se estudió la normalidad de los pesos extraídos para cada una de las especies en ambas direcciones y para la media. Como se observa en la tabla 27, dado que todos los P-valores son mayores que 0,05 se asume que provienen de una distribución normal con un 95% de nivel de confianza.

Tabla 27: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov para PVE_R, PVE_T y PVE_M

Cód.	PVE _R		PVE _T		PVE _M	
	P-valor	Normalidad	P-valor	Normalidad	P-valor	Normalidad
1	0,138675	si	0,839998	si	0,349395	si
2	0,428059	si	0,957838	si	0,71688	si
3	0,991476	si	0,957115	si	0,757418	si
4	0,684584	si	0,698549	si	0,763231	si
5	0,72668	si	0,69483	si	0,438357	si
6	0,826573	si	0,748881	si	0,881464	si
7	0,69763	si	0,455424	si	0,48005	si
8	0,623452	si	0,988254	si	0,749415	si
9	0,702004	si	0,587098	si	0,67423	si
10	0,725304	si	0,663117	si	0,863408	si
10 especies	0,00033507	no	0,0001409	no	0,00018082	no

Puesto que el P-valor (0,8124) de la razón-F del test ANOVA es mayor 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos variables con un nivel del 5% de significación, figura 72.

Se realizó una prueba de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones de las dos muestras, radial y tangencial. Debido a que el P-valor (0,899345) es mayor 0,05, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones (radial y tangencial) para cada una de las especies y para el conjunto total con un 95,0%. Corroborando los resultados obtenidos en el estudio preliminar (apartado 8.2).

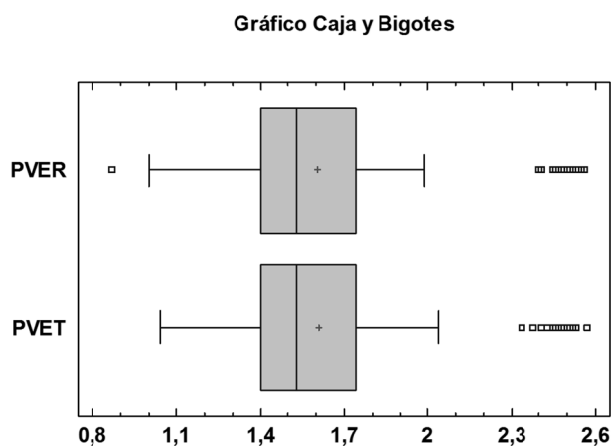


Figura 72: Diagrama de cajas y bigotes comparando PVE en dirección radial y tangencial para el conjunto de las 10 especies. PVE_R: Peso de las virutas extraídas en dirección radial; PVE_T: Peso de las virutas extraídas en dirección tangencial

Dado que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos direcciones de ensayos, no es necesario conocer la dirección de ensayo en esta metodología. Por lo tanto de aquí en adelante se trabajó con la media aritmética del peso del filtro llevo de virutas (PVE_M) entre ambas direcciones.

Tabla 28: Pruebas de Múltiple Rangos para PVE_M por especie. Método: 95,0 porcentaje LSD

Especie	Cód.	Media (g)	Grupos homogéneos
Cedro	1	1,08	X
Radiata	3	1,35	X
Chopo	2	1,43	X
Pinaster	4	1,48	X X
Silvestre	5	1,53	X X
Iroko	9	1,57	X X
Laricio	6	1,61	X X
Castaño	7	1,65	X
Roble	8	1,86	X
Elondo	10	2,48	X

En cuanto a estudio del comportamiento de las diferentes especies, puesto que el 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 10 especies con un nivel del 5% de significación, figura 73. Para determinar que medias son significativamente diferentes de otras, se realizan Pruebas de Múltiples Rangos. Se han identificado nueve grupos homogéneos (ver alineación de las X en columnas, tabla 28).

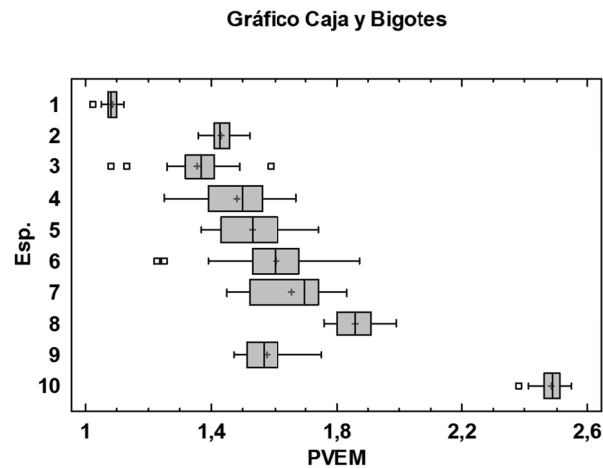


Figura 73: Diagrama de cajas y bigotes comparando PVE_M de las 10 especies

Sorprende el valor tan bajo de los pesos del iroko, después revisar los datos y las muestras no se pudo hallar una explicación para este fenómeno.

Se propone un modelo de regresión lineal simple para la estimación de la densidad de las probetas utilizando como estimador la media del peso de los filtros llenos de virutas extraídas en dirección radial y tangencial (PVE_M).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Densidad Probeta y PVE_M con un nivel de confianza del 95,0%. El modelo resultante se muestra en la ecuación 13 y la figura 74.

$$\rho = 433,37 \cdot PVE_M - 105,82 \quad R^2 = 97,38\% \quad (13)$$

Donde “ ρ ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3) y “ PVE_M ” es la media de los pesos de los filtros llenos de virutas en dirección radial y tangencial (g).

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 97,38% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El coeficiente de correlación es igual a 0,987, indicando una relación muy fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es $26,07 \text{ kg/m}^3$.

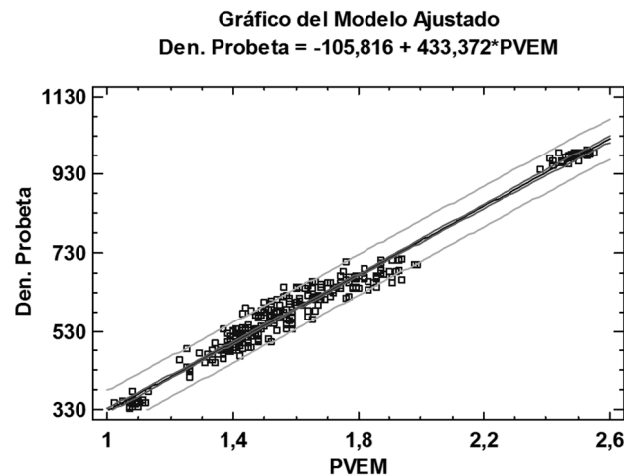


Figura 74: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PVE_M

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,285202) de las pruebas realizadas es mayor o a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 75.

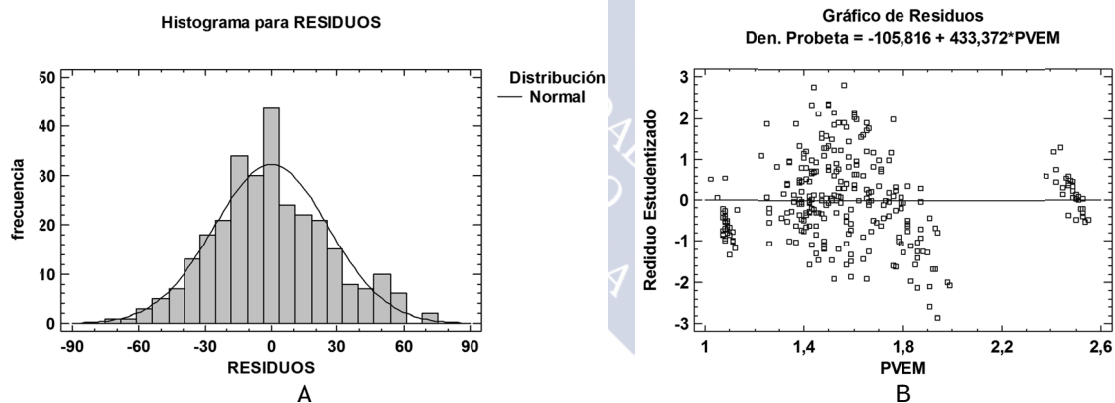


Figura 75: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PVE_M (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

Con el modelo anterior es necesario tomar dos medidas y obtener el valor medio para introducirlo en la fórmula. Para que no sea necesario obtener la media, se propone realizar un modelo con todos los valores sin tener en cuenta su dirección. El modelo resultante se muestra en la ecuación 14 y la figura 76.

$$\rho = 428,66 \cdot PVE - 97,59 \quad R^2 = 96,26\% \quad (14)$$

Donde “ρ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m³) y “PVE” es el peso del filtro lleno de virutas sin tener en cuenta la dirección de ensayo (g).

Puesto que el P-valor (0,0000) en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre densidad y PVE con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 96,26% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El coeficiente de correlación es igual a 0,98, indicando una relación muy fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 31,01 kg/m³.

Este modelo cuenta con menor correlación que el anterior, pero su aplicación es más sencilla al trabajar con valores de una sola medida.

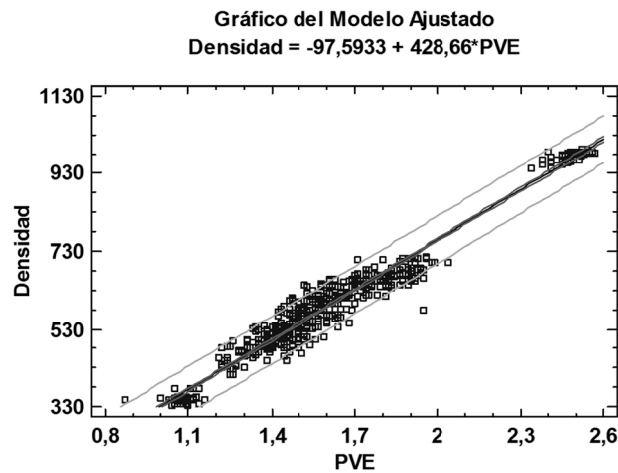


Figura 76: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PVE

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,381367) de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 77.

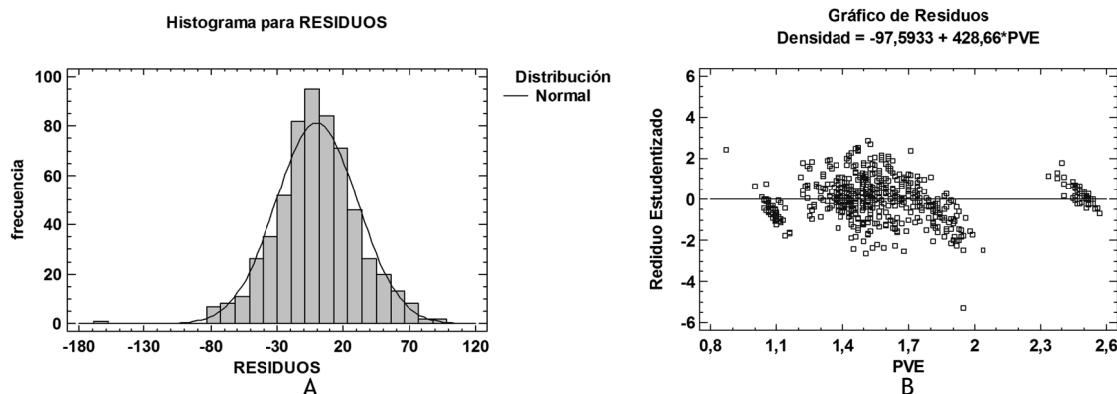


Figura 77: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PVE (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

8.3.6 Estimación de la densidad en 10 especies con el extractor a batería

Como se comentó en el apartado 7.2.3.2 en este caso solo se realizó un ensayo por probeta coincidente con la dirección dominante de la misma. Por lo tanto el análisis se llevó a cabo con el conjunto total de probetas, sin tener en cuenta su dirección. El volumen nominal extraído en cada muestra es $\varnothing 7 \times 65$ mm.

Del análisis de los datos recogidos se localizaron siete datos anómalos que fueron retirados antes de análisis desarrollado a continuación. En la tabla 29 se detallan cuáles y la razón por la que se los eliminó.

Tabla 29: Datos anómalos en las medidas de PVB (eliminados)

*Cód.	PVB (g)	Densidad probeta (kg/m ³)	Problemas
1030	2,48	953,89	Perdida de serrín
1026	2,44	962,69	Perdida de serrín
614	2,4	645,26	PVB muy alto, fallo en la medida
425	1,62	635,26	Probeta con resina
308	1,89	482,80	PVB muy alto, fallo en la medida
304	1,72	481,49	PVB muy alto, fallo en la medida

*Cód.: código individual de las probetas, ver Anexo III.

Las medias de los pesos de los filtros llenos de las virutas extraídas con el prototipo a baterías (PVB) se muestran en la tabla 30.

Tabla 30: Valores medios y coeficientes de variación del peso del filtro lleno de virutas extraída con el prototipo 5 (PVB) sin tener en cuenta la dirección de extracción

Especie	Cód.	PVB (g)	CV (%)
Cedro	1	1,16	3,40%
Chopo	2	1,52	4,64%
Radiata	3	1,48	8,09%
Pinaster	4	1,65	7,94%
Silvestre	5	1,67	6,34%
Laricio	6	1,75	10,64%
Castaño	7	1,83	9,63%
Roble	8	2,04	3,92%
Iroko	9	1,84	5,09%
Elondo	10	2,90	2,03%
10 especies		1,78	25,11%

En primer lugar se estudió la normalidad de los pesos de los filtros llenos de virutas (PVB) extraídos con el prototipo a baterías para cada una de las especies. Como se observa en

la tabla 31, dado que todos los P-valores son mayores que 0,05, se asume que provienen de una distribución normal con un 95% de nivel de confianza.

Tabla 31: Normalidad de las muestras de PVB por especies

Especie	Cód.	P-valor	Normalidad Kolmogorov-Smirnov
Cedro	1	0,886883	si
Chopo	2	0,976413	si
Radiata	3	0,996891	si
Pinaster	4	0,833652	si
Silvestre	5	0,812339	si
Laricio	6	0,316682	si
Castaño	7	0,817108	si
Roble	8	0,879706	si
Iroko	9	0,908005	si
Elondo	10	0,929831	si

Puesto que el P-valor (0,0000) de la prueba-F del test de ANOVA es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 10 variables con un nivel del 5% de significación. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realizan las Pruebas de Múltiples Rangos, tabla 32.

Gráfico Caja y Bigotes

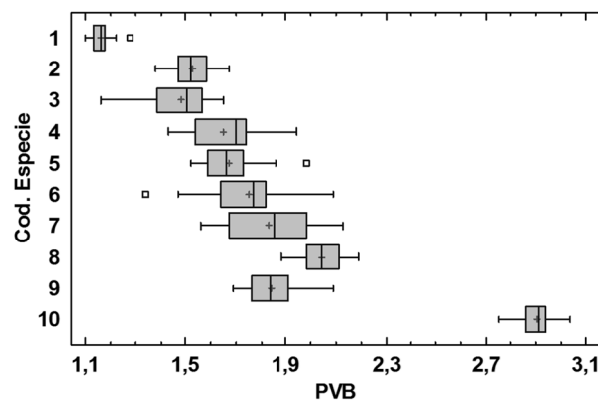


Figura 78: Diagrama de cajas y bigotes de PVB para las 10 especies

Como se aprecia en la tabla 32 y figura 78 en este caso también existen siete grupos homogéneos pero repartidos de forma diferente a la densidad.

Tabla 32: Pruebas de Múltiple Rangos para PVB por Cód. Método: 95,0 porcentaje LSD

Especie	Cód.	Media (g)	Grupos homogéneos
Cedro	1	1,16	X
Radiata	3	1,48	X
Chopo	2	1,52	X
Pinaster	4	1,65	X
Silvestre	5	1,67	X
Laricio	6	1,75	X
Castaño	7	1,83	X
Iroko	9	1,84	X
Roble	8	2,04	X
Elondo	10	2,90	X

Se propone un modelo lineal de regresión simple para la estimación de la densidad de las probetas mediante el estimador PVB. Puesto que el P-valor (0,0000) en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre la densidad y PVB con un nivel de confianza del 95,0%. El modelo resultante se muestra en la ecuación 15 y la figura 79.

$$\rho = 349,48 \cdot \text{PVB} - 33,60 \quad R^2 = 97,74\% \quad (15)$$

Donde “ ρ ” es la densidad de la pieza a estimar (kg/m^3) y “PVB” es el peso del filtro lleno de virutas extraídas por el prototipo a baterías (g).

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 97,74% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El coeficiente de correlación es igual a 0,989 indicando una relación muy fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es $23,82 \text{ kg/m}^3$.

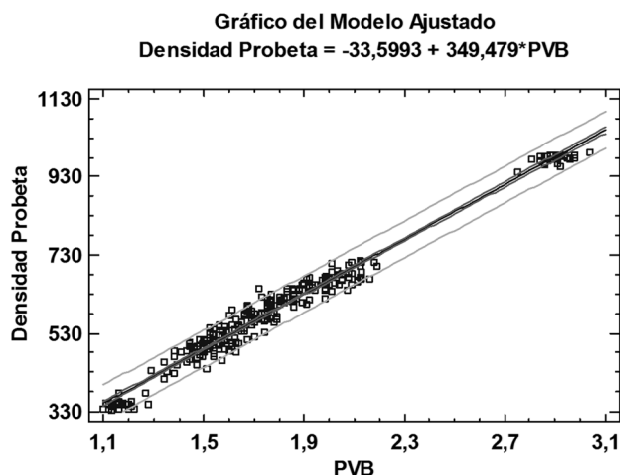


Figura 79: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PVB

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,550618) de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

El modelo cumple las hipótesis de Normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 80.

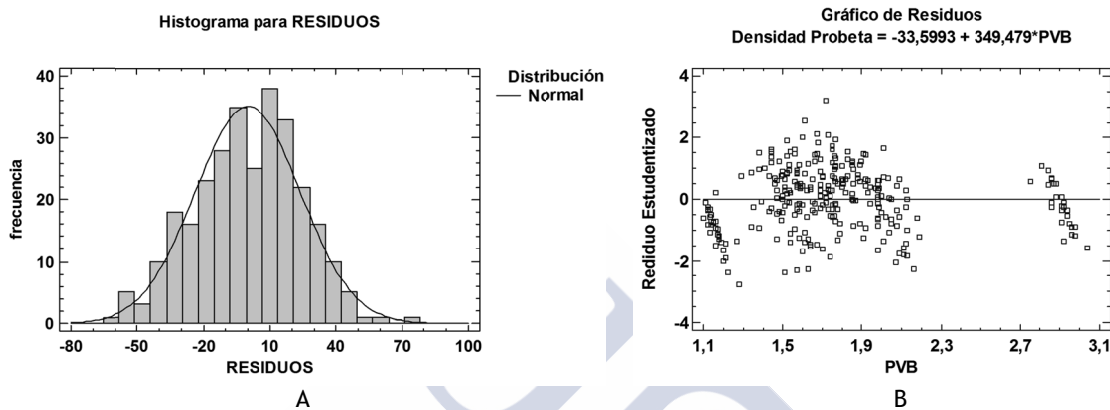


Figura 80: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PVB (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

8.3.7 Modelo de equivalencia de PVB en PVE

Se propone realizar un modelo de transformación de PVB en PVE mediante una regresión lineal simple para poder utilizar los datos obtenidos en ambos prototipos en los modelos.

Puesto que el P-valor (0,0000) en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre PVE y PVB con un nivel de confianza del 95,0%. El modelo resultante se muestra en la ecuación 16 y la figura 81.

$$PVE = 0,795 \cdot PVB + 0,18 \quad R^2 = 96,38\% \quad (16)$$

Donde “PVE” es el peso del filtro lleno de virutas extraídas por el prototipo 4 o eléctrico (g) y “PVB” es el peso del filtro lleno de virutas extraídas por el prototipo 5 o a baterías (g).

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 96,38% de la variabilidad en PVE. El coeficiente de correlación es igual a 0,98, indicando una relación muy fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,069 g.

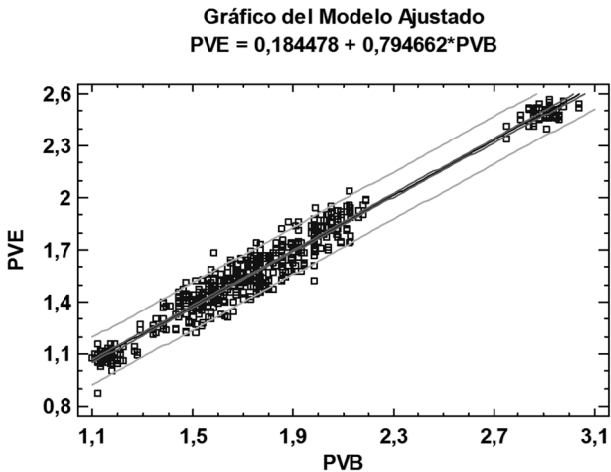


Figura 81: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta según PVB

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,484206) de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 82.

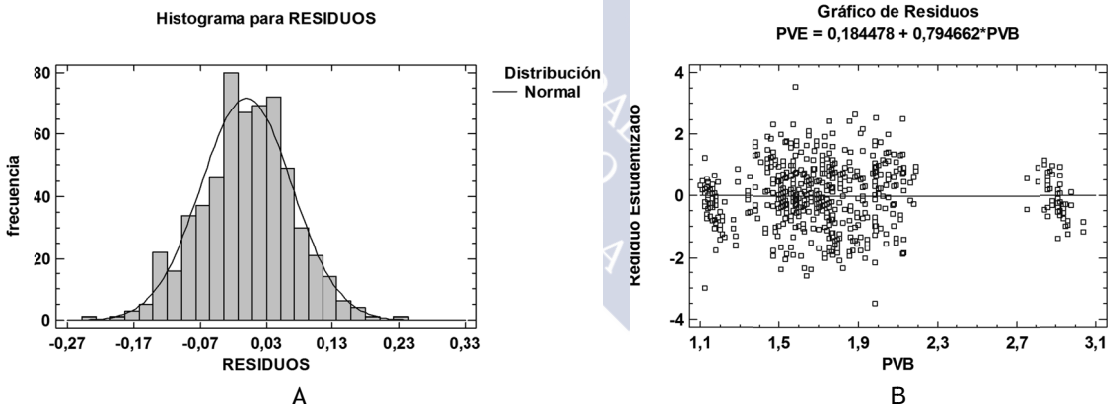


Figura 82: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal para PVB (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

8.3.8 Comparación de modelos

Finalmente en la tabla 33 se expone el resumen de los modelos de estimación de densidad para las diferentes metodologías comparando el número de variables, su R² y el error estándar de sus residuos.

Tabla 33: Comparación de los diferentes métodos y modelos de estimación de densidad hallados en el conjunto de las 10 especies

Metodología	Tipo de regresión	Variables independientes	R ² (%)	Error estándar de los residuos kg/m ³
MAT	Simple*	MAT _M	53,39	38,34
Penetrómetro	Simple*	PN _M	55,77	39,40
MAT	Múltiple	MAT _M + Zs	96,29	31,28
		MAT + Zs	95,78	33,07
Penetrómetro		PN _M + Zs	96,43	30,69
		PN + Zs	95,71	33,33
Probeta testigo	Simple	PPT _M	96,62	18,96
		PPT	98,14	22,27
Extractor eléctrico		PVE _M	97,38	26,07
		PVE	96,26	31,01
Extractor a batería		PVB	97,74	23,82

*Modelo realizado sobre cinco especies (p. silvestre, p. laricio, castaño, roble e iroko)

El método con mejor R² es el de probeta testigo utilizando como estimador el peso del cilindro extraído sin tener en cuenta la dirección de ensayo. Este método también es el que menor error estándar posee en sus residuos pero utilizando como estimador la media del peso de los cilindros extraídos en dirección radial y tangencial.

La metodología propuesta por este estudio (extracción de virutas) obtiene muy buenas correlaciones, similares a las de la probeta testigo con errores un tanto mayores, pero con un impacto en las piezas analizadas entre cuatro y ocho veces menor si comparamos los volúmenes de material retirado de las piezas analizadas. Además es más fácil de ejecutar.

Los métodos de resistencia al arranque de tornillo y profundidad de penetración obtienen también muy buenos resultados en lo que se refiere a R². Pero la necesidad de conocer la especie de madera analizada hace que sean difíciles de llevar a la práctica. En el caso de los modelos de regresión simple su uso está limitado solo a cinco especies con bajos R² haciendo que no sea muy ventajosa.

8.4 CUARTA FASE: ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD Y LA DENSIDAD CORREGIDA AL 12% H EN TRES ESPECIES CON LOS PROTOTIPOS 4 Y 5

En este caso se realizó un ensayo por prototipo (4 y 5) en cada probeta, sin tener en cuenta la dirección de taladrado en probetas estabilizadas a diferentes humedades de consigna (H_C) con el fin de estimar la humedad de las misma y su densidad corregida al 12% H.

En este apartado solo se ha eliminado los valores obtenidos de la probeta E27-25 por ser errores de medida.

8.4.1 Estabilización a la humedad de consigna H_c

En primer lugar fue necesario acondicionar las probetas con diferentes humedades por debajo del punto de saturación (aprox. 30% H). Como describe el apartado 7.2.4.2 las probetas se acondicionaron en cinco grupos de humedades de consigna (H_c) por especie (5, 10, 15, 20 y 25% H). Por problemas de funcionamiento de la cámara de acondicionamiento las cámaras de humectación fueron colocadas en el laboratorio. Esto provocó que éstas no estuvieran a temperatura constante, sino que su temperatura variaba con la temperatura del laboratorio. Salvo en los meses de verano la temperatura nunca sobrepasó los 20° C.

Tabla 34: Valores medios y coeficientes de variación de la humedad de las probetas estabilizadas a diferentes humedades de consigna (H_c)

H_c (%)	Especie	Media (%)	CV (%)	Diferencias con H_c (%)
5	Cedro	7,00	0,71	2
	Laricio	6,58	3,34	1,58
	Elondo	6,22	7,40	1,22
10	Cedro	9,94	0,40	-0,06
	Laricio	10,65	2,44	0,65
	Elondo	10,30	0,78	0,30
15	Cedro	14,36	1,67	-0,64
	Laricio	14,28	3,57	-0,72
	Elondo	14,96	2,34	-0,04
20	Cedro	18,41	1,96	-1,59
	Laricio	19,64	3,92	-0,36
	Elondo	19,27	2,70	-0,73
25	Cedro	24,56	1,26	-0,44
	Laricio	24,64	3,94	-0,36
	Elondo	24,48	2,29	-0,52

En la tabla 34 se muestran los valores medios de las humedades obtenidos en la cámara de humectación y la estufa de secado para cada H_c y especie, así como la diferencia del valor obtenido con el ideal. Salvo por los valores de $H_c = 5$ para las tres especies y $H_c = 20$ para el cedro se obtuvieron las humedades de las probetas dentro del intervalo $H_c \pm 1\%$. Cabe destacar que en el caso de $H_c = 5$ la reducción de la humedad se llevó a cabo en la estufa, siendo más complejo el control del proceso.

A continuación, en las figuras 83, 84 y 85, se muestran la evolución de la humedad de las probetas ($H_c = 25$) en función del tiempo para las tres especies por ser las series temporales más largas. Las probetas de laricio fueron las más rápidas en lograr la humedad requerida con una media de 38 días, las de cedro necesitaron el doble de días (73 días) y las de elondo casi ocho veces (295 días).

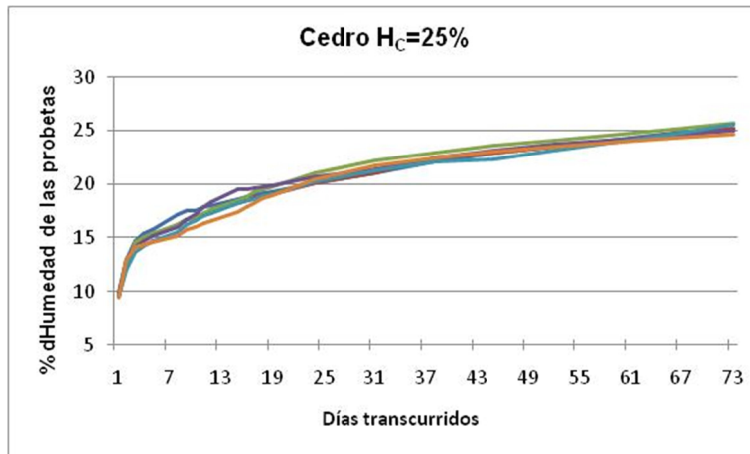


Figura 83: Gráfica de la evolución de la humedad en función del tiempo de las probetas para $H_c = 25$ de Cedro

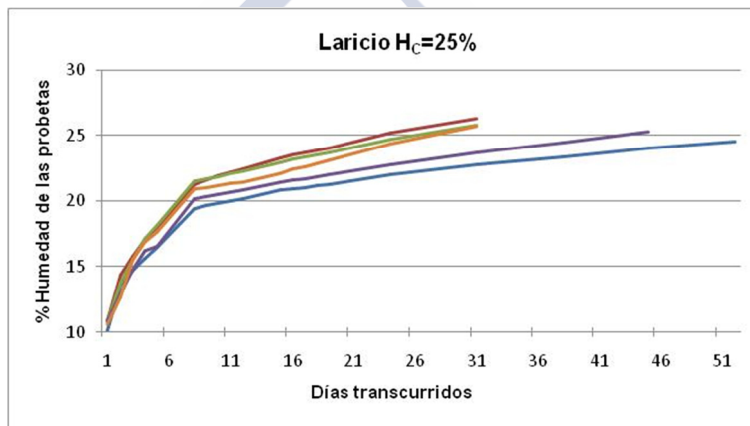


Figura 84: Gráfica de la evolución de la humedad en función del tiempo de las probetas para $H_c = 25$ de Laricio

En la gráfica correspondiente al elondo se observa un problema con los datos entre los días 127 y 274, donde la humedad se mantiene estable en torno al 23% H. además resulta llamativo que entre los días 274 y 295 se diera un aumento tan importante de humedad, teniendo en cuenta que en ningún momento se mojaron las probetas. Una posible causa fue que la cámara de acondicionamiento estaba colocada en el laboratorio donde no había control de la temperatura exterior y durante los meses de verano la temperatura fue muy alta lo que provoca que la humedad de equilibrio de la madera baje (23% H). Al bajar la temperatura del laboratorio (otoño) aumento la humedad de equilibrio (28% H) y las probetas se humectaron rápidamente. Por esta razón cabría esperar que si se hubiera tenido el control de la temperatura este proceso se habría acortado a la mitad para esta especie.

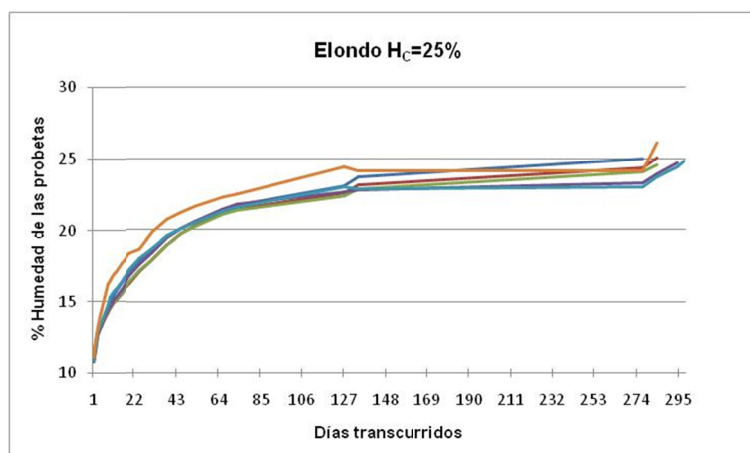


Figura 85: Gráfica de la evolución de la humedad en función del tiempo de las probetas para $H_c = 25$ de Elondo

8.4.2 Estadísticos obtenidos en los ensayos realizados

Una vez obtenidas y estabilizadas las humedades, las probetas se ensayaron de acuerdo con el método descrito en el apartado 7.2.4.

Las tablas 35, 36 y 37 recogen las densidades de las tres especies ensayadas a las distintas humedades de consigna, así como los pesos húmedos y secos en estufa de los filtros llenos de viruta extraída con los prototipos 4 (PVEH y PVE0) y 5 (PVBH y PVB0). La tabla 38 recoge los valores medios para las tres especies. Al igual que en casos anteriores el pino presenta mayores coeficientes de variación.

Tabla 35: Valores medios y coeficientes de variación de las diferentes variables para el cedro

HC (%)	Probetas		PVEH		PVE0		PVBH		PVB0	
	Media (kg/m ³)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)
5	341,20	0,74	1,11	2,47	1,04	2,40	1,25	1,57	1,19	1,50
10	350,84	1,56	1,11	1,25	1,02	1,18	1,27	2,75	1,17	1,43
15	353,05	1,64	1,08	1,36	0,99	1,79	1,17	1,68	1,07	2,55
20	362,03	0,79	1,03	2,08	0,92	2,38	1,11	4,75	1,01	4,35
25	370,84	1,91	1,05	2,54	0,91	2,81	1,11	2,93	0,99	2,66
Total	355,59	3,18	1,07	3,51	0,98	5,89	1,18	6,48	1,09	7,91

Tabla 36: Valores medios y coeficientes de variación de las diferentes variables para el laricio

H _c (%)	Probetas		PVEH		PVEO		PVBH		PVBO	
	Media (kg/m ³)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)
5	523,53	13,60	1,46	10,32	1,35	9,81	1,72	10,03	1,61	10,16
10	554,44	12,13	1,50	10,90	1,37	11,03	1,78	13,40	1,62	13,26
15	514,65	14,27	1,46	12,02	1,30	11,04	1,68	8,05	1,51	8,15
20	516,46	16,58	1,39	14,76	1,21	15,22	1,54	15,50	1,37	15,23
25	556,80	11,43	1,41	11,30	1,21	11,65	1,56	11,54	1,35	11,84
Total	533,17	13,13	1,44	11,41	1,29	12,22	1,65	12,39	1,49	13,50

Tabla 37: Valores medios y coeficientes de variación de las diferentes variables para el elondo

H _c (%)	Probetas		PVEH		PVEO		PVBH		PVBO	
	Media (kg/m ³)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)
5	946,46	1,51	2,43	1,36	2,30	1,21	2,82	1,60	2,67	1,53
10	965,77	0,51	2,46	1,92	2,26	1,87	2,75	3,59	2,54	3,56
15	977,84	0,95	2,45	2,14	2,19	2,29	2,84	2,75	2,56	2,70
20	983,73	1,25	2,42	2,46	2,09	2,59	2,80	1,92	2,46	1,91
25	1017,71	1,60	2,30	1,58	1,96	1,47	2,81	1,55	2,41	1,57
Total	978,30	2,70	2,41	2,88	2,17	5,81	2,80	2,46	2,53	4,14

Tabla 38: Valores medios y coeficientes de variación de las diferentes variables para el conjunto de las tres especies

H _c (%)	Probetas		PVEH		PVEO		PVBH		PVBO	
	Media (kg/m ³)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)	Media (g)	CV (%)
5	603,73	43,70	1,67	34,97	1,57	35,52	1,93	35,30	1,82	35,45
10	623,68	42,61	1,69	35,06	1,55	34,94	1,93	33,49	1,78	33,85
15	615,18	44,77	1,66	36,16	1,49	35,52	1,90	38,15	1,71	37,83
20	620,74	44,46	1,61	38,34	1,41	37,20	1,82	41,36	1,61	40,06
25	648,45	43,50	1,54	34,75	1,32	34,07	1,83	40,80	1,59	39,55
Total	622,36	42,89	1,63	35,22	1,47	35,28	1,88	37,04	1,70	36,80

Se realizó un estudio de las distribuciones de las diferentes variables por especie. Como se observa en las tablas 39, 40 y 41 dado que todos los P-valores son mayores que 0,05, se asume que provienen de una distribución normal con un 95% de nivel de confianza.

Tabla 39: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov de las diferentes variables para el cedro (95%; P-valor>0,05 →Normal)

H _c (%)	Densidad Probetas P-valor	H _p P-valor	PVEH P-valor	PVE0 P-valor	PVBH P-valor	PVBO P-valor
5	0,999052	0,674453	0,800749	0,389947	0,655291	0,95039
10	0,950873	0,658285	0,976374	0,955775	0,819887	0,921789
15	0,722691	0,977339	0,359763	0,74083	0,655291	0,911286
20	0,77204	0,875924	0,958496	0,532003	0,990486	0,874441
25	0,674253	0,989676	0,212391	0,427021	0,550036	0,514328
todas	0,984257	0,293872	0,544939	0,501165	0,625181	0,372342

Tabla 40: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov de las diferentes variables para el laricio (95%; P-valor>0,05 →Normal)

H _c (%)	Densidad Probetas P-valor	H _p P-valor	PVEH P-valor	PVE0 P-valor	PVBH P-valor	PVBO P-valor
5	0,993966	0,930036	0,965263	0,980134	0,705482	0,74856
10	0,946011	0,980139	0,55221	0,497931	0,616734	0,551095
15	0,965764	0,397694	0,953001	0,96883	0,992947	0,992473
20	0,257852	0,858297	0,161278	0,16778	0,279201	0,243369
25	0,732377	0,938069	0,817467	0,678942	0,976602	0,961365
todas	0,73847	0,593721	0,627004	0,327748	0,77256	0,94867

Tabla 41: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov de las diferentes variables para el elondo (95%; P-valor>0,05 →Normal)

H _c (%)	Densidad probetas P-valor	H _p P-valor	PVEH P-valor	PVE0 P-valor	PVBH P-valor	PVBO P-valor
5	0,995986	0,529006	0,953842	0,72836	0,920346	0,90968
10	0,99982	0,979713	0,633301	0,910541	0,470178	0,554454
15	0,93828	0,697784	0,933769	0,960237	0,782379	0,870289
20	0,970479	0,999312	0,744212	0,982893	0,950364	0,989511
25	0,870585	0,81927	0,955031	0,925448	0,981317	0,812378
Todas	0,906374	0,439826	0,513233	0,547637	0,202724	0,84096

8.4.2.1 Diferencias entre grupos de H_c

A continuación se realiza un análisis para comprobar las posibles diferencias estadísticamente significativas entre las diferentes variables en diferentes supuestos. Los resultados se exponen en las tablas 42 a 48.

Tabla 42: Estudio de las diferencias entre grupos de H_C según especies

Especies	Diferencias estadísticamente significativas	P-valor de la prueba-F	Prueba múltiple de rangos (grupos)	Nº de grupos
Cedro	si	0,0000	(5)(10;15)(20)(25)	4
Laricio	no	0,7423	(5;10;15;20;25)	1
Elondo	si	0,0000	(5)(10;15)(15;20)(25)	4
Todas las especies	no	0,992	(5;10;15;20;25)	1

Dada la gran variabilidad de la densidad de las piezas de laricio no existen diferencias estadísticamente significativas entre las densidades las probetas agrupadas por H_C con un nivel del 5% de significación. En cambio en las otras especies sí existe diferencia. Otro detalle a mencionar es que tanto en laricio como en elondo la densidad de las piezas $H_C = 15$ se agrupan con un grupo adyacente.

Como se observa en la tabla 43 existen diferencias estadísticamente significativas entre las diferentes H_C para cada especie y para el conjunto de ellas con un nivel del 5% de significación. En todas ellas se identifican cinco grupos diferentes coincidentes con las diferentes H_C .

Tabla 43: Estudio de las diferencias entre humedades de las probetas según especies

Especies	Diferencias estadísticamente significativas	P-valor de la prueba-F	Prueba múltiple de rangos (grupos)	Nº de grupos
Cedro	si	0,0000	(5)(10)(15)(20)(25)	5
Laricio	si	0,0000	(5)(10)(15)(20)(25)	5
Elondo	si	0,0000	(5)(10)(15)(20)(25)	5
Todas las especies	si	0,0000	(5)(10)(15)(20)(25)	5

Tabla 44: Estudio de las diferencias entre grupos de H_C para PVEH según especies

Especies	Diferencias estadísticamente significativas	P-valor de la prueba-F	Prueba múltiple de rangos (grupos)	Nº de grupos
Cedro	si	0,0000	(5;10;15)(20;25)	2
Laricio	no	0,7979	(5;10;15;20;25)	1
Elondo	si	0,0001	(5;10;15;20)(25)	2
Todas las especies	no	0,9542	(5;10;15;20;25)	1

Tabla 45: Estudio de las diferencias entre grupos de H_C para PVE0 según especies

Especies	Diferencias estadísticamente significativas	P-valor de la prueba-F	Prueba múltiple de rangos (grupos)	Nº de grupos
Cedro	si	0,0000	(5;10)(15)(20;25)	3
Laricio	no	0,2099	(5;10;15;20;25)	1
Elondo	si	0,0000	(5;10)(15)(20)(25)	4
Todas las especies	no	0,6223	(5;10;15;20;25)	1

Tabla 46: Estudio de las diferencias entre grupos de H_C para PVBH según especies

Especies	Diferencias estadísticamente significativas	P-valor de la prueba-F	Prueba múltiple de rangos (grupos)	Nº de grupos
Cedro	si	0,0000	(5;10)(15)(20;25)	3
Laricio	no	0,2073	(5;10;15;20;25)	1
Elondo	no	0,2843	(5;10;15;20;25)	1
Todas las especies	no	0,9787	(5;10;15;20;25)	1

Tabla 47: Estudio de las diferencias entre grupos de H_C para PVB0 según especies

Especies	Diferencias estadísticamente significativas	P-valor de la prueba-F	Prueba múltiple de rangos (grupos)	Nº de grupos
Cedro	si	0,0000	(5;10)(15)(20;25)	3
Laricio	si	0,0329	(5;10;15)(15;20;25)	2
Elondo	no	0,0000	(5)(10;15)(20;25)	3
Todas las especies	no	0,7629	(5;10;15;20;25)	1

Tabla 48: Estudio de las diferencias entre especies para las diferentes variables

Variable	Diferencias estadísticamente significativas	P-valor de la prueba-F	Prueba múltiple de rangos (grupos)
Densidad probeta	si	0,0000	3 grupos
H probeta	no	0,9469	1 grupo
PVEH	si	0,0000	3 grupos
PVE0	si	0,0000	3 grupos
PVBH	si	0,0000	3 grupos
PVB0	si	0,0000	3 grupos

Tanto en PVEH con en PVBH las diferencias estadísticamente significativas son mínimas, en cambio para PVE0 y PVB0 son mayores. Este comportamiento se explica por la poca variabilidad de las densidades húmedas de los diferentes grupos de H_C y la diferente

perdida de humedad de los diferentes grupos de H_C al secar las muestras. Las humedades de las virutas siempre se encuentran por debajo de la de las probetas, mayor cuanto más alta sea la humedad de partida.

8.4.3 Estimación del contenido de humedad

En la tabla 49 se muestran los valores medios de las humedades de las probetas (H_P) y de las virutas extraídas con el prototipo 4 (H_E) y con el 5 (H_B) para cada especie y H_C , así como sus coeficientes de variación. Se realizaron pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov a los valores de las diferentes humedades y puesto que todos los P-valores son mayores que 0,05, se asume que las distribuciones de las diferentes variables (H_P , H_E y H_B) provienen de una distribución normal al 95% de probabilidad (tabla 50).

Tabla 49: Media de los valores de las humedades obtenidas de las probetas (H_P), las virutas extraídas con el prototipo 4 (H_E) y extraídas con el prototipo 5 (H_B) y sus coeficientes de variación para cada especie y H_C

Especies	H_C (%)	H_P		H_E		H_B	
		Media (%)	CV (%)	Media (%)	CV (%)	Media (%)	CV (%)
Cedro	5	7,01	0,78	6,07	7,60	5,32	7,91
	10	9,94	0,39	7,98	4,80	8,86	42,66
	15	14,36	1,68	9,82	11,79	9,37	33,32
	20	18,41	1,92	11,79	7,84	9,54	9,90
	25	24,56	1,27	14,82	4,83	12,26	4,43
	Total	14,86	42,54	10,10	31,36	9,07	33,93
Laricio	5	6,58	3,30	7,97	9,72	7,07	4,80
	10	10,65	2,44	9,51	5,68	9,66	9,47
	15	14,28	3,55	11,95	9,67	11,18	5,71
	20	19,64	3,90	14,84	5,95	13,03	4,12
	25	25,90	9,86	16,93	10,30	15,18	4,13
	Total	15,41	45,35	12,24	28,67	11,22	25,76
Elondo	5	6,22	7,43	5,65	6,43	5,69	4,46
	10	10,30	0,76	8,86	6,13	8,26	4,64
	15	14,96	2,32	11,98	1,92	10,79	3,25
	20	19,27	2,70	15,72	4,06	13,88	4,52
	25	24,48	2,29	16,81	8,42	16,37	5,20
	Total	15,05	43,61	11,80	36,43	11,00	35,60
3 especies	5	6,60	6,54	6,56	17,77	6,03	13,90
	10	10,30	3,22	8,78	9,05	8,92	24,65
	15	14,53	3,26	11,25	12,20	10,45	18,32
	20	19,11	3,95	14,11	13,45	12,15	16,86
	25	24,98	6,32	16,19	10,01	14,60	12,94
	Total	15,10	43,42	11,38	33,08	10,43	32,86

Tabla 50: Pruebas de Bondad-de-Ajuste Kolmogorov-Smirnov de las diferentes humedades (95%; P-valor>0,05 →Normal)

Especie	H _p P-valor	H _E P-valor	H _B P-valor
Cedro	0,293872	0,544898	0,698803
Laricio	0,59372	0,613971	0,95975
Elondo	0,439826	0,552445	0,638713
Todas	0,075974	0,533333	0,497583

Puesto que el 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 tres variables con un nivel del 5% de significación. Para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras, se realizaron Pruebas de Múltiples Rangos. Como se aprecia en la tabla 51 y figura 86, H_B y H_E son homogéneos entre sí pero diferentes con H_p. Por lo tanto no se puede utilizar el contenido de humedad de las virutas extraídas por cualquiera de los dos prototipos como medida directa del contenido de humedad de las probetas.

Tabla 51: Pruebas de Múltiple Rangos para HP, HE y HB. Método: 95,0 porcentaje LSD

Variabes	Media (%)	Grupos Homogéneos
H _B	10,43	X
H _E	11,34	X
H _p	15,10	X

Gráfico Caja y Bigotes

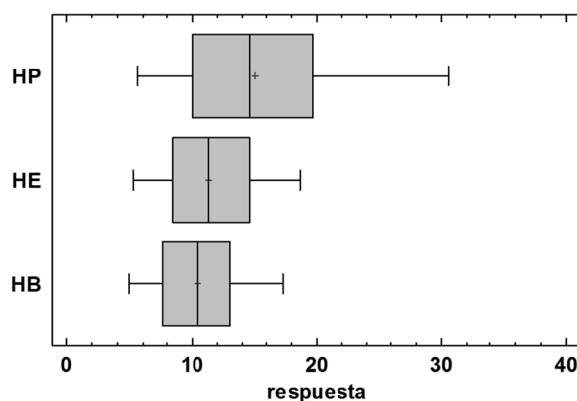


Figura 86: Diagrama de cajas y bigotes comparando H_p, H_E y H_B (%) para el conjunto de las tres especies

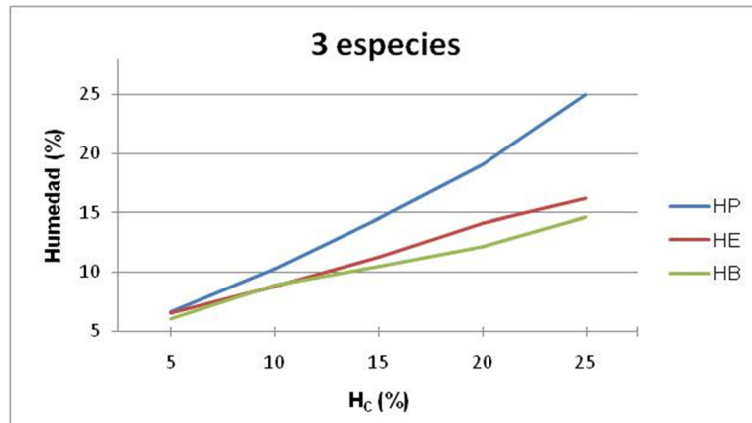


Figura 87: Líneas de tendencia de H_p, H_E y H_B (%) en función de H_c para el conjunto de las tres especies

En la figura 87 se observa como las diferencias entre las humedades de las virutas extraídas (H_E y H_B) y la humedad de las probetas (H_p) aumentan a medida que aumenta la humedad de las probetas. Las virutas extraídas con el prototipo a baterías pierden más humedad que las extraídas con el eléctrico aunque los datos formen un grupo homogéneo.

Con estos datos se propone realizar un modelo de estimación de la humedad de las probetas en función del peso de los filtros llenos de viruta húmedos y el peso de los filtros llenos de viruta secos en estufa para cada uno de los prototipos. Como estas variables no son independientes entre sí, no se puede realizar un modelo de regresión múltiple con ellas. Para solventar el problema de los modelos para el conjunto de las tres especies se decide realizar una transformación aritmética de las variables, sustituyendo PVEH y PVE0 por PVEH/PVE0 y PVBH y PVB0 por PVBH/PVB0 como variables independientes respectivamente.

Modelo de estimación de la humedad de la probeta para el conjunto de las tres especies para el prototipo eléctrico, utilizando PVEH/PVE0 como variable independiente.

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre HP y PVEH/PVE0 con un nivel de confianza del 95,0%. El modelo resultante se muestra en la ecuación 17 y la figura 88.

$$H_p = 160,92 \cdot \left(\frac{PVEH}{PVE0} \right) - 164,16 \quad R^2 = 86,28\% \quad (17)$$

Donde "H_p" es la humedad la pieza a estimar (%); "PVEH" es el peso del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 4 húmedas (g) y "PVE0" es el peso del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 4 secadas en estufa (g).

El estadístico R² indica que el modelo ajustado explica 86,28% de la variabilidad en HP. El coeficiente de correlación es igual a 0,93, indicando una relación muy fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 2,43% H. Este error puede ser importante dependiendo de la humedad estimada, desde un 10% a un 50% del valor medio para el rango de humedades de 25 al 5% H.

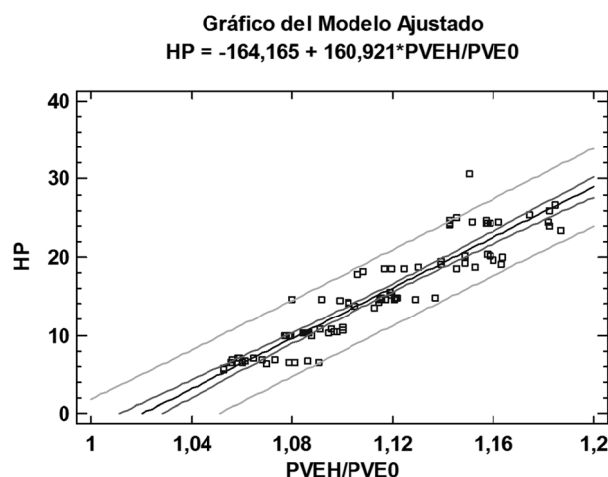


Figura 88: Gráfico del modelo de regresión lineal de humedad de la probeta según PVE0 y PVEH

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,287119) de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 89.

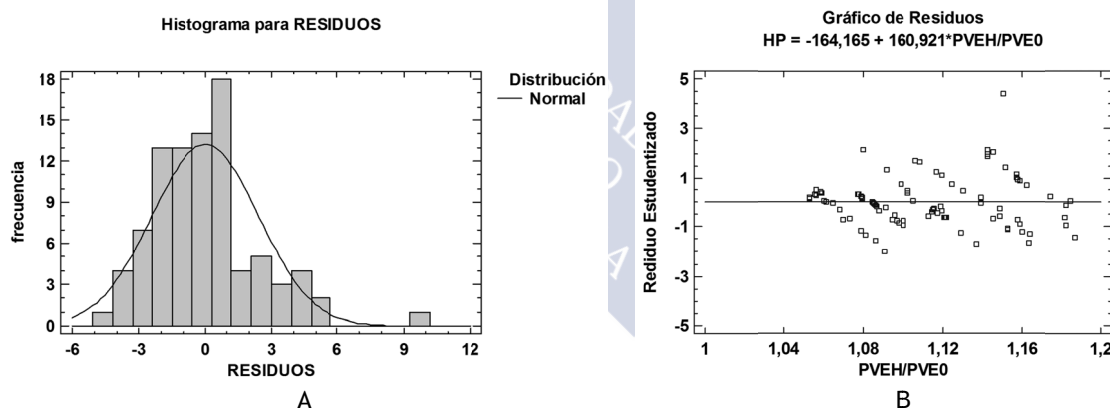


Figura 89: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

Modelo de estimación de la humedad de la probeta para el conjunto de las tres especies para el prototipo a baterías, utilizando PVBH/PVB0 como variable independiente. Puesto que el P-valor (0,0000) en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre HP y PVBH/PVB0 con un nivel de confianza del 95,0%. El modelo resultante se muestra en la ecuación 18 y la figura 90.

$$H_p = 161,66 \cdot \left(\frac{PVBH}{PVB0} \right) - 163,42 \quad R^2 = 71,39\% \quad (18)$$

Donde “HP” es la humedad la pieza a estimar (%); “PVBH” es el peso del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 5 húmedas (g) y “PVB0” es el peso del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 5 secadas en estufa (g).

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 71,39% de la variabilidad en H_p . El coeficiente de correlación es igual a 0,84, indicando una fuerte relación entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 3,53% H. Este error puede ser importante dependiendo de la humedad estimada, desde un 14% a un 70% del valor medio para el rango de humedades de 25 al 5% H.

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,0578421) de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza. El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 91.

Estos modelos permiten la estimación de la humedad en un amplio rango de densidades. Si bien el modelo con el prototipo eléctrico aporta mayor R^2 y menor error estándar en la desviación de los residuos, no se descarta el modelo obtenido con el prototipo a baterías ya que aporta la ventaja de su portabilidad.

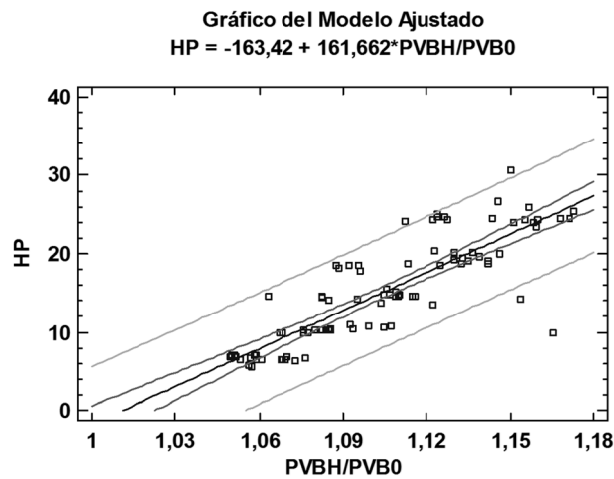


Figura 90: Gráfico del modelo de regresión lineal de humedad de la probeta según PVE0 y PVEH

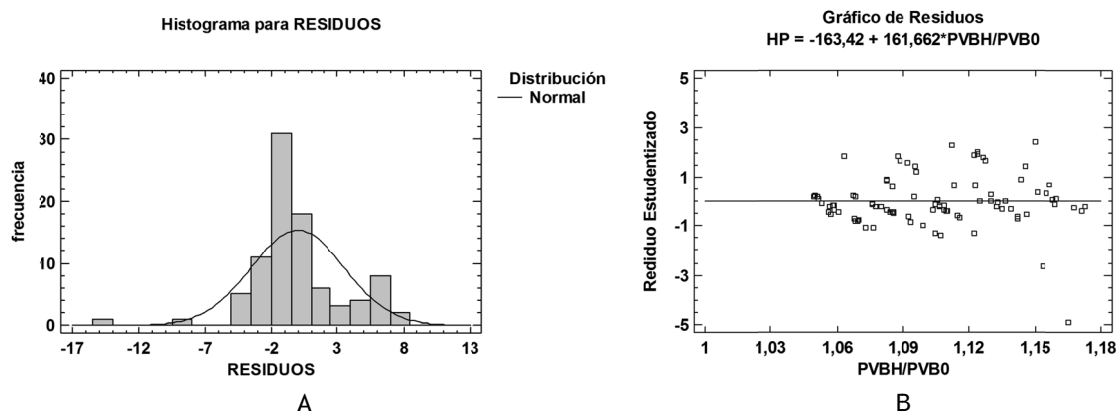


Figura 91: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

8.4.4 Estimación directa de la densidad corregida al 12% H

Como es posible estimar la densidad y la humedad de las piezas de madera con el peso húmedo y seco de las virutas extraídas se propone ir un paso más allá y construir un modelo de estimación de la densidad corregida al 12% de humedad normalizada en función de los pesos de las virutas húmedas y secas. Para ello, en primer lugar hay que obtener el valor de densidad de las probetas corregidas al 12% de contenido de humedad.

Se llevan a cabo dos correcciones de acuerdo con las Normas UNE-EN 384:2010 e ISO 13061-2:2014 aplicando las siguientes ecuaciones:

UNE-EN 384: 2010

$$\rho_{12} = \rho_H + \rho_H \frac{0,5(12-H)}{100} \quad (19)$$

Donde “ ρ_{12} ” es la densidad de la pieza a estimar corregida al 12% de humedad (kg/m^3); “ ρ_H ” es la densidad de la pieza a la humedad H (kg/m^3) y “H” es la humedad de la pieza (%).

ISO 13061-2:2014

$$\rho_{12} = \rho_H \frac{1+0,01(12-H)}{1+0,01(12-H) \frac{\rho_H}{\rho_{H_2O}}} \quad (20)$$

Donde “ ρ_{12} ” es la densidad de la pieza a estimar corregida al 12% de humedad (kg/m^3); “ ρ_H ” es la densidad de la pieza a la humedad H (kg/m^3); “H” es la humedad de la pieza (%) y “ ρ_{H_2O} ” Es la densidad del agua (1.000 kg/m^3).

Los valores medios de densidad de las probetas, así como los valores corregidos al 12% H se muestran en la tabla 52. Cabe destacar que para valores de densidad de la madera próximos a los de la densidad del agua, la ecuación de la Norma ISO 13061-2:2014 muestra resultados contradictorios. Como se observa en la tabla 52, las densidades medias corregidas al 12% H de las piezas de elondo poseen mayor densidad que las densidades de las mismas piezas al 20 y 25% H. Por esta razón se decide utilizar los valores obtenidos según la Norma UNE-EN 384:2010 para realizar el modelo de estimación.

Tabla 52: Media de las densidades de las probetas medidas y corregidas al 12% H según dos Normas por especie y H_c

Especie	HC (%)	Densidad a la H _c		Densidad corregida al 12% H			
		Media (kg/m ³)	CV (%)	UNE-EN 384: 2010		ISO 13061-2:2014	
				Media (kg/m ³)	CV (%)	Media (kg/m ³)	CV (%)
Cedro	5	341,20	0,74	349,72	0,75	352,24	0,74
	10	350,84	1,56	354,44	1,56	355,49	1,56
	15	353,05	1,64	348,88	1,57	347,62	1,56
	20	362,03	0,79	350,42	0,90	346,87	0,97
	25	370,84	1,91	347,55	1,80	340,11	1,86
	Total	355,59	3,18	350,20	1,45	348,46	2,00
Laricio	5	523,53	13,60	537,69	13,59	536,44	13,22
	10	554,44	12,13	558,17	12,10	557,71	12,01
	15	514,65	14,27	508,64	14,06	508,98	14,22
	20	516,46	16,58	496,78	16,73	497,03	17,51
	25	556,80	11,43	518,12	11,62	519,99	12,47
	Total	533,17	13,13	523,88	13,35	524,03	13,55
Elondo	5	946,46	1,51	973,81	1,48	949,24	1,42
	10	965,77	0,51	973,99	0,50	966,33	0,50
	15	977,84	0,95	963,38	0,99	977,18	0,98
	20	983,73	1,25	947,98	1,31	982,48	1,35
	25	1017,71	1,60	954,19	1,64	1020,32	1,84
	Total	978,30	2,70	962,67	1,60	979,11	2,73
3 especies	5	603,73	43,70	620,40	43,84	612,64	42,41
	10	623,68	42,61	628,87	42,59	626,51	42,14
	15	615,18	44,77	606,97	44,60	611,26	45,41
	20	620,74	44,46	598,39	44,39	608,79	46,51
	25	648,45	43,50	606,62	43,69	626,81	47,61
	Total	622,36	42,89	612,25	42,86	617,20	43,87

8.4.4.1 Modelo para el prototipo eléctrico

Se propone un modelo de regresión lineal simple para describir la relación entre la densidad de las probetas corregidas al 12% H (ρ_{12}) y los PVEH y PVE0, utilizando $PVEH^2/PVE0$ como variable independiente. Puesto que el P-valor en la tabla ANOVA es menor 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 21 y la figura 92.

$$\rho_{12} = 406,85 \cdot \frac{PVEH^2}{PVE0} - 123,30 \quad R^2 = 99,04\% \quad (21)$$

Donde " ρ_{12} " es la densidad de la pieza a estimar corregida al 12% de humedad (kg/m^3); "PVEH" es el peso del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 4 húmedas (g) y "PVE0" es el peso del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 4 secadas en estufa (g).

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 99,04% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El coeficiente de correlación es igual a 0,995, indicando una relación muy fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es $26,01 \text{ kg/m}^3$.

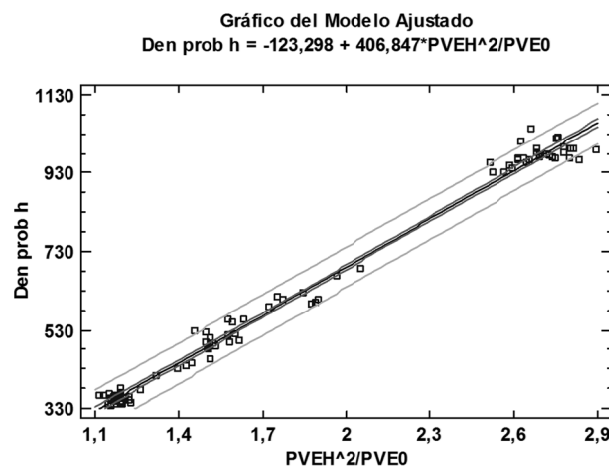


Figura 92: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta corregida al 12%H según PVE0 y PVEH

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño (0,854864) de las pruebas realizadas es mayor a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 93.

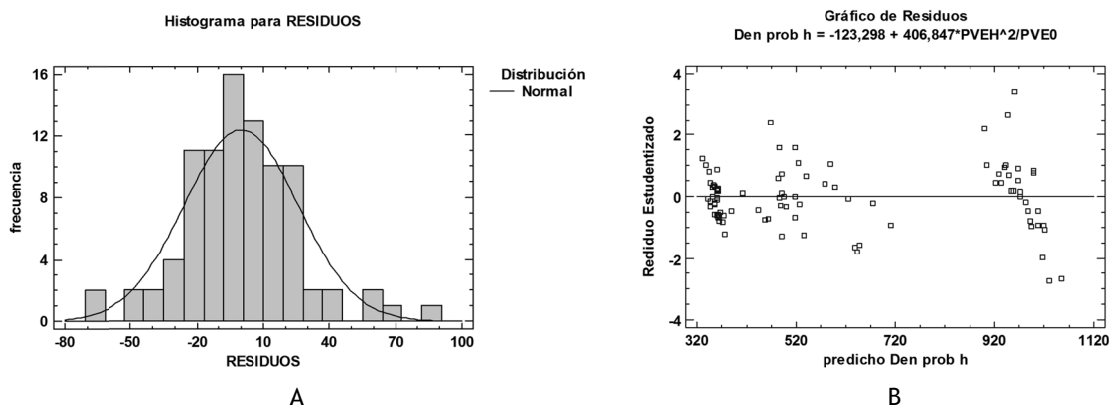


Figura 93: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

8.4.4.2 Modelo para el prototipo a baterías

Se propone un modelo de regresión lineal simple para describir la relación entre la densidad de las probetas corregidas al 12% H (ρ_{12}) y los PVBH y PVB0, utilizando $PVBH^2/PVB0$ como variable independiente. Puesto que el P-valor en la tabla ANOVA es menor 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 22 y la figura 94.

$$\rho_{12} = 337,68 \cdot \frac{PVBH^2}{PVB0} - 80,68 \quad R^2 = 98,48\% \quad (22)$$

Donde “ ρ_{12} ” es la densidad de la pieza a estimar corregida al 12% de humedad (kg/m^3); “PVBH” es el peso del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 5 húmedas (g) y “PVB0” es el peso del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 5 secadas en estufa (g).

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 98,48% de la variabilidad en la densidad de las probetas. El coeficiente de correlación es igual a 0,992, indicando una relación muy fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es $25,62 \text{ kg/m}^3$.

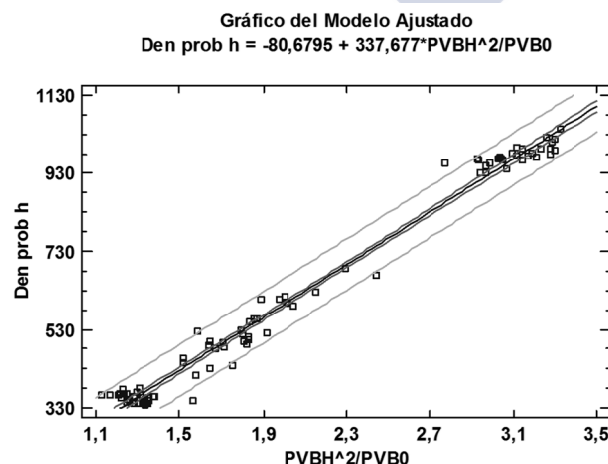


Figura 94: Gráfico del modelo de regresión lineal de Densidad probeta corregida al 12%H según PVB0 y PVBH

Se realizaron Pruebas de Bondad-de-Ajuste de Kolmogorov-Smirnov para los residuos del modelo. Debido a que el P-valor más pequeño de las pruebas realizadas (0,793982) es mayor a 0,05, se asume que los residuos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

El modelo cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, figura 95.

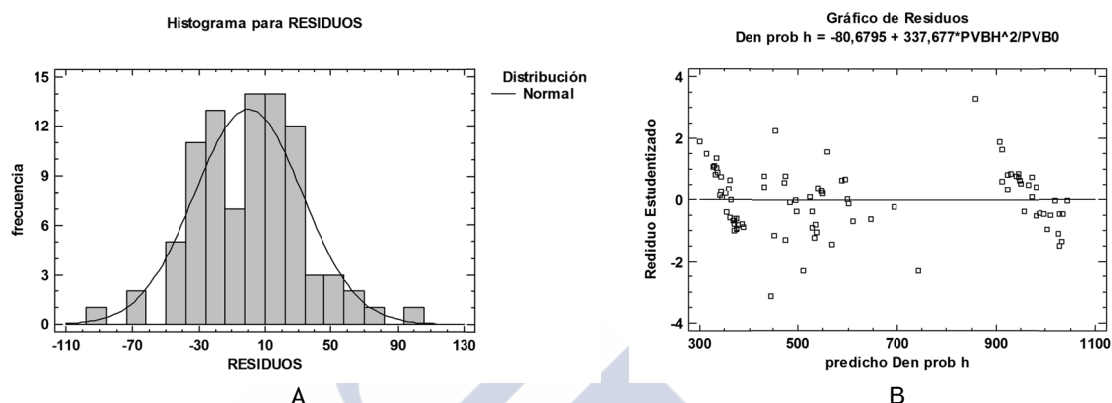


Figura 95: A: Histograma de frecuencias de los residuos del modelo lineal (normalidad); B: Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad)

Los coeficientes de determinación para ambos prototipos son muy altos. Esto se debe a la gran separación que existen entre las densidades de las tres especies y al pequeño tamaño de las probetas requerido para que la humectación sea viable en un periodo de tiempo razonable para la investigación.

Los dos modelos cumplen con las hipótesis de partida y del comportamiento sus residuos. El modelo del prototipo eléctrico posee un mayor R^2 y menor error estándar lo que lo hace mejor modelo de estimación que el modelo de estimación del prototipo a baterías. Cabe destacar que la diferencia de estos valores es mínima. Esto sumado a la portabilidad del sistema a baterías hace que sea igualmente útil. No sería posible comparar estos resultados con los obtenidos con los otros métodos de este estudio ya que el tamaño de las probetas difiere considerablemente.

8.5 QUINTA FASE: IDENTIFICACIÓN DE PATOLOGÍAS BIÓTICAS EN MADERA MEDIANTE EL USO DEL EXTRACTOR DE VIRUTAS

La presente sección recoge resultados cualitativos. Debido a esto y sin entrar demasiado en el debate sobre la validez de resultados cualitativos frente a los cuantitativos en el campo científico, es necesario hacer una referencia al importante papel que juega tanto la subjetividad como la experiencia profesional del observador en este tipo de datos (*e.g.* Sale *et al.* 2002, Meagher 2009).

De la experiencia personal y profesional de los investigadores de esta tesis se deduce que los datos cualitativos son de elevada importancia a la hora de detectar e identificar patologías *in situ* en estructuras de madera existentes. Durante una inspección, al entrar en una estancia desde los olores presentes hasta el aspecto general comienzan a brindar información difícilmente cuantificable sobre las posibles patologías presentes, poniendo en valor la importancia del papel activo que tiene el operario como observador y la necesidad de entrenar la percepción y juicio individual.

Ya discutido por Bowers (1977), de forma común en la investigación científica, la percepción humana y la interpretación están presentes en mayor o menor medida, desde el diseño experimental a la justificación de la eliminación de datos anómalos. A pesar de los obstáculos y limitaciones que suponen las observaciones cualitativas, estas son consideradas como una herramienta útil y complementaria a otros métodos. Estudios de diferentes temáticas han demostrado este valor y sin embargo la presencia de subjetividad en una investigación científica puede llevar al lector a invalidar o menospreciar los resultados y la técnica. Sin embargo, esta técnica es ampliamente utilizada en ciertos campos como el de la medicina, la psicología, la sociología, la veterinaria o la biología (Meagher 2009).

En esta tesis el método científico está basado en la observación empírica, la cual es complementada en esta sección con los resultados cualitativos. De acuerdo con Block (1961), los errores en este tipo de medidas debidos a la percepción personal se pueden eliminar contrastando los resultados con otros observadores. De esta forma y gracias a la experiencia profesional, escalas de apreciación subjetivas son habitualmente utilizadas en mediciones *in situ*. Con el objetivo de homogeneizar y poner valor a estas apreciaciones, se recogen en este apartado unas descripciones de la experiencia al realizar las medidas así como unas fichas de trabajo con imágenes a modo de guía visual que permiten reducir el peso de la idiosincrasia del observador. Así, esta sección presenta resultados con un mayor grado de influencia de la percepción humana y de la interpretación de lo que se percibe.

Como se menciona en el apartado 7.2.5 los ensayos consisten en realizar extracciones de material con el prototipo 4 en diferentes maderas que presentan ataque de los xilófagos más representativos de la geografía española.

En primer lugar se pesan los filtros llenos de virutas, se estima su densidad con la ecuación 14 (apartado 8.3.5) y se compara con los valores de la bibliografía. Luego se separan las virutas extraídas en dos fracciones (gruesa y fina) con un tamiz de malla rectangular de 0,85 mm de luz. A continuación se estudiaron las características discriminantes de estas fracciones con la ayuda de una lupa binocular y/o un microscopio óptico. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 53.

Tabla 53: Resultados del estudio de maderas con patología

Especie	Patología	Fracción gruesa (% en peso)	Fracción fina (% en peso)	Densidad (Ecuación 14) (kg/m ³)	Densidad media (kg/m ³)	Diferencia densidades (%)
Pino	Pudrición parda	69	31	382	530	-28
Pino	Pudrición parda	44	56	390	530	-26
Pino	Pudrición blanca	77	23	413	530	-22
Pino	Pudrición blanca alveolar	75	25	349	530	-34
Pino	Carcoma (<i>Anobiidae</i>)	60	40	644	530	22
Pino	Carcoma (<i>Anobiidae</i>)	62	38	442	530	-17
Roble	Carcoma (<i>Xestobium</i> sp.)	56	44	563	672	-16
Pino	Curculiónidos	33	67	497	530	-6
Pino	Cerambícidos	62	38	533	530	0
Pino	Termes, pudrición y carcoma	52	48	603	530	14
Pino	Termes	69	31	610	530	15
Cedro	Madera sana	69	31	349	347	0
Chopo		80	20	516	504	2
Radiata		89	11	479	476	1
Pinaster		90	10	579	543	7
Silvestre		90	10	524	573	-8
Laricio		78	22	500	585	-14
Castaño		78	22	623	615	1
Roble		89	11	722	672	8
Iroko		82	18	574	617	-7
Elondo		90	10	945	975	-3

El número de ensayos realizados es muy bajo para poder obtener una correlación entre la pérdida de densidad o masa y la patología. Como se aprecia en la tabla 53 parece existir una tendencia de una pérdida de un 20 a un 30% de masa en maderas afectadas por pudriciones, pero esto podría depender de otros factores. Por otro lado, algunas muestras de madera atacada por insectos han tenido valores de densidad extraordinariamente altos, del orden de un 15 a 20% mayores que la densidad media. Esto hace pensar que el dispositivo aspira detritos y barro sueltos de las galerías. Pero al igual que en el caso anterior, se trata de suposiciones. Sería necesario acometer un estudio en mayor detalle para sacar conclusiones a este respecto.

Con las muestras obtenidas fue posible realizar un estudio de las características diferenciadoras producidas por los patógenos. Su resultado se expone a continuación en los siguientes apartados.

8.5.1 Características del material extraído por los prototipos en maderas con y sin ataque de xilófagos

8.5.1.1 Madera sana

Durante el proceso de la extracción de virutas en madera sana no se siente ninguna pérdida de resistencia. Al retirar el filtro del cartucho, este tiene un aspecto limpio y mullido, con volumen.

La muestra extraída tiene aspecto sano y limpio. Posee el olor característico de la madera sana. La fracción fina es reducida y en la fracción gruesa se aprecian las virutas generadas por el corte de la broca, figuras 96 y 97. La viruta suele tener una tonalidad más clara que la cara de la pieza ensayada debido a que la madera estaba protegida de los elementos externos.

8.5.1.2 Insectos de ciclo larvario (carcomas, cerambícidos y curculiónidos)

Durante el proceso de extracción de viruta en una madera atacada por insectos de ciclo larvario se pueden percibir pérdidas de resistencia al taladrado si el ataque es suficientemente grande. Al retirar el filtro del cartucho, este tiene un aspecto sucio, polvoriento y presenta menor volumen que el de madera sana.

La muestra extraída tiene aspecto polvoriento, sin color característico, figuras de 98 a 101. Puede presentar olor a madera cuando el ataque es reciente, o a humedad y polvo si en ella existen otros ataques como por ejemplo de hongos.

En la fracción fina se observan detritos. Con el estudio de la forma y el tamaño de estos detritos es posible identificar familia, género y en algunos casos especie del agente patógeno (Bobadilla *et al.* 2016).

8.5.1.3 Termes subterráneos

Durante el proceso de extracción de viruta en una madera atacada por termes se pueden percibir pérdidas de resistencia al taladrado debido a la presencia de cavidades. Al retirar el filtro del cartucho, este tiene un aspecto limpio con menor volumen que el de madera sana.

La muestra extraída tiene aspecto algo polvoriento, sin color característico. Puede presentar olor a madera cuando el ataque es reciente, o a humedad si en ella existen otros ataques, como por ejemplo de hongos o presenta unos niveles de humedad elevados, figura 102. Tanto en la fracción fina como en la gruesa, se aprecian restos de barro y madera digerida por los termes.

8.5.1.4 Pudriciones

Durante el proceso de extracción de viruta en una madera atacada por pudriciones se puede percibir una pérdida general de la resistencia de madera al taladrado cuando el ataque

es suficientemente grande. Al retirar el filtro del cartucho, este tiene un aspecto muy sucio y polvoriento, y presenta menor volumen que el de madera sana.

La muestra extraída tiene aspecto polvoriento, de color marrón oscuro para pudrición parda, y de color crema para la madera con pudrición blanca. Presenta olor a humedad y polvo.

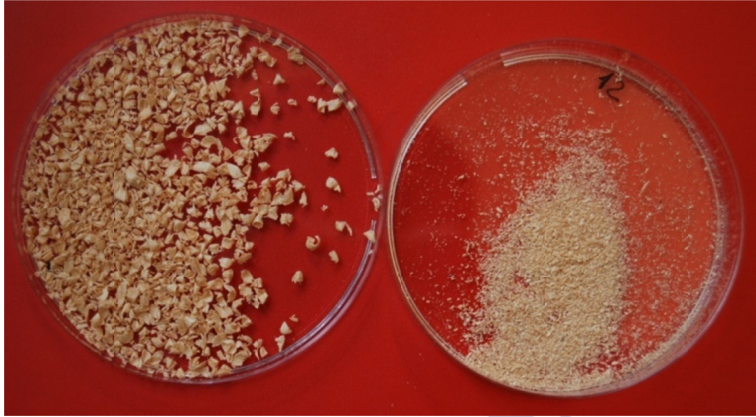
En la pudrición parda, la fracción fina es amplia y tiene aspecto de polvo marrón oscuro, muy fino y vaporoso. Este se adhiere a cualquier superficie por estática. Tanto en la fracción gruesa como en la fina, se observan pequeños primas de madera podrida, figura 103.

En la pudrición blanca la fracción fina también es amplia con polvo color crema, fino y fibroso. Tanto en la fracción gruesa como en la fina, se observan pequeños paquetes de fibras que han perdido su lignina, figura 104.

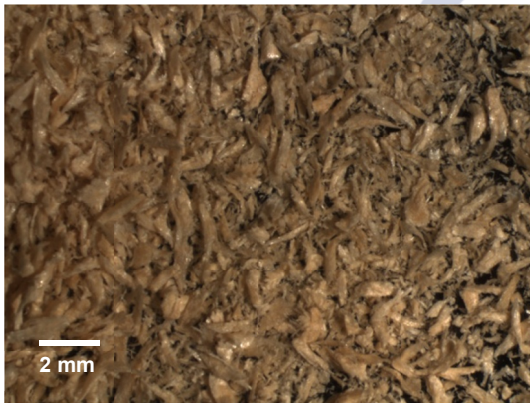
A continuación se recogen en una serie de fichas lo datos correspondientes a las características observadas para cada uno de los patógenos, figuras de 96 a 104.



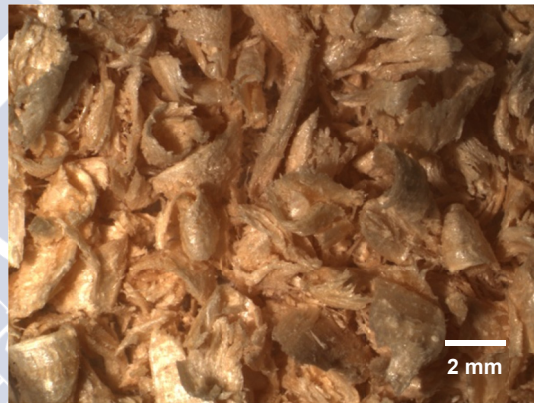
Ficha 1: Características de las muestras extraídas de madera sin patología de *Pinus silvestris* L.



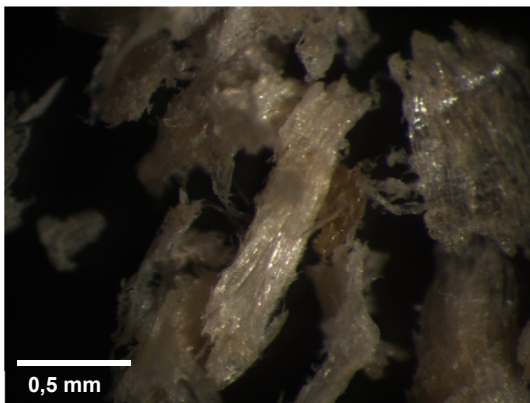
Fraciones fina y gruesa separadas en placas petri. Muestra con aspecto sano y fibroso



Fración fina: Aspecto fibroso y cantidad reducida (objetivo x6)



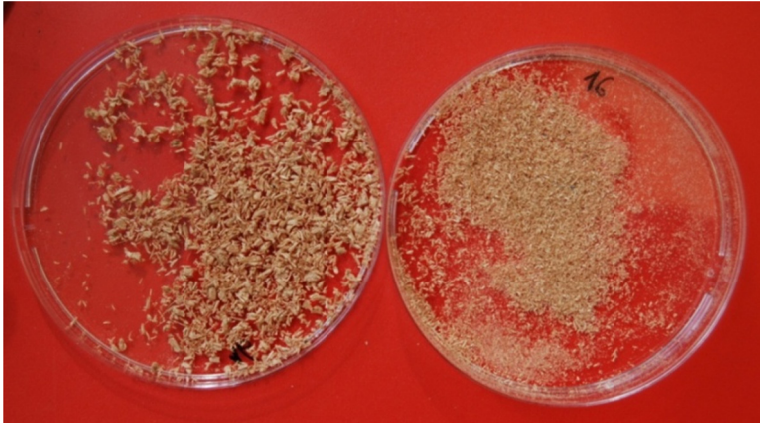
Fración gruesa: Presencia de virutas bien formadas (objetivo x6)



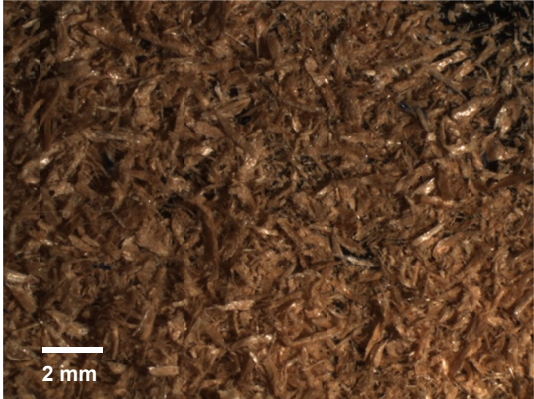
Detalle de la fracción fina: Paquetes fibrosos sanos (objetivo x50)

Figura 96: Imágenes características de las muestras extraídas de pino silvestre, sin patología

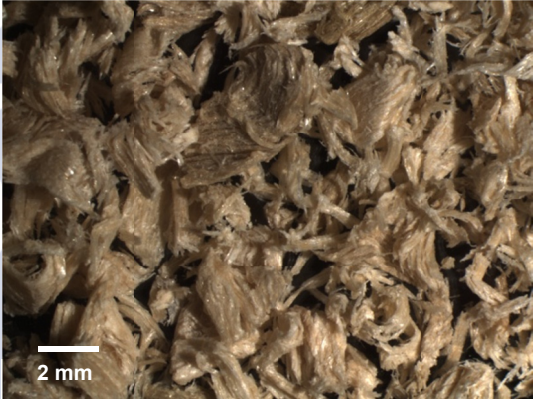
Ficha 2: Características de las muestras extraídas de madera sin patología de *Quercus robur* L.



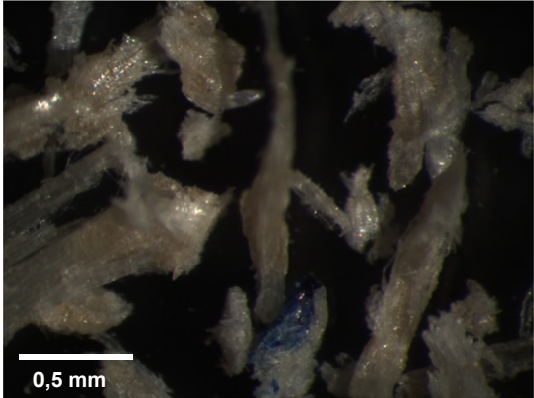
Ambas fracciones separadas en placas petri. Muestra con aspecto sano y fibroso



Fracción fina: Aspecto fibroso y cantidad reducida (objetivo x6)



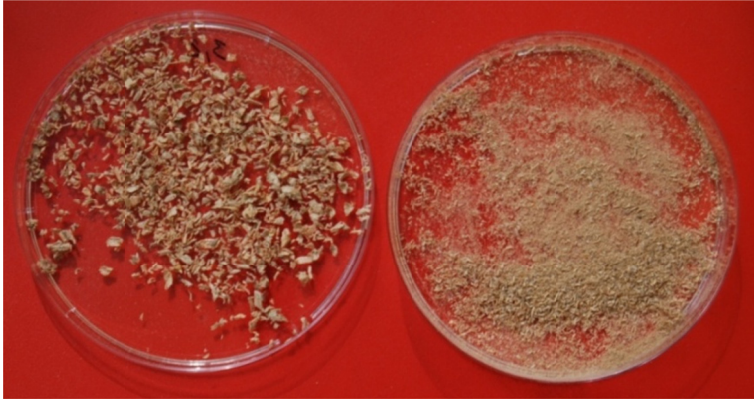
Fracción gruesa: Presencia de virutas bien formadas (objetivo x6)



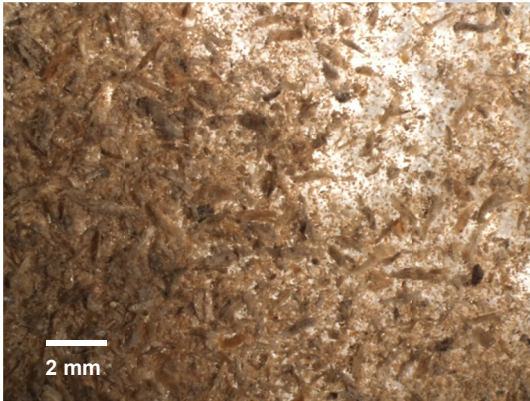
Detalle fracción fina: Paquetes fibrosos sanos (objetivo x50)

Figura 97: Imágenes características de las muestras extraídas de roble sin patología

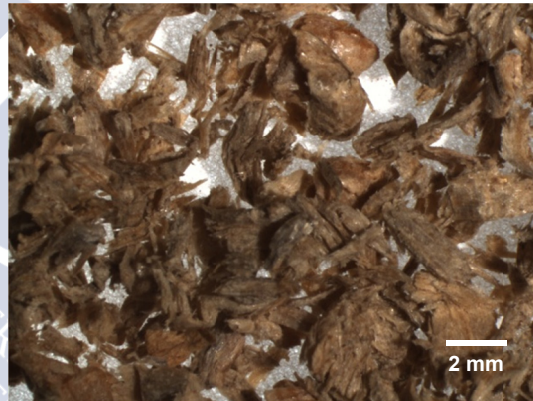
Ficha 3: Características de las muestras extraídas de madera de *Pinus sp.* con ataque de anóbidos



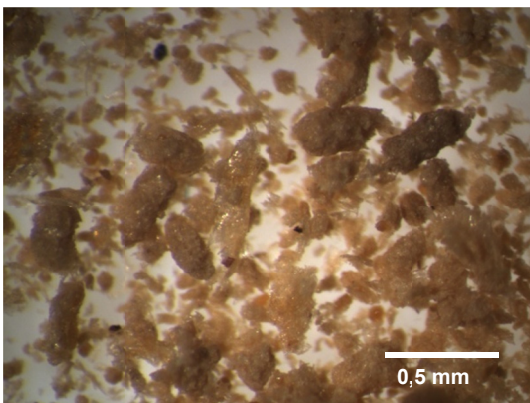
Ambas fracciones separadas en placas petri. Muestra con aspecto polvoriento



Fracción fina: Aspecto polvoriento con presencia de detritus (objetivo x6)



Fracción gruesa: Presencia de virutas bien formadas (objetivo x6)



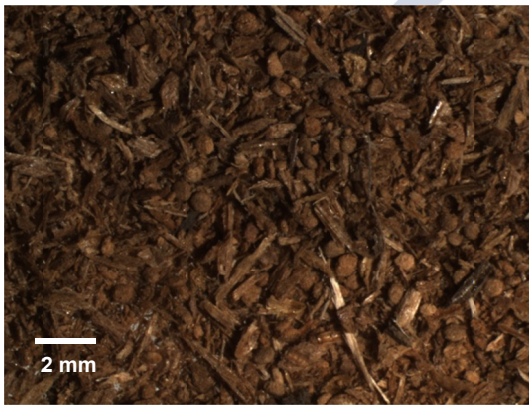
Detalle de la fracción fina: Excremento característicos de *Anobiidae*(objetivo x50)

Figura 98: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de pino atacada por anóbidos

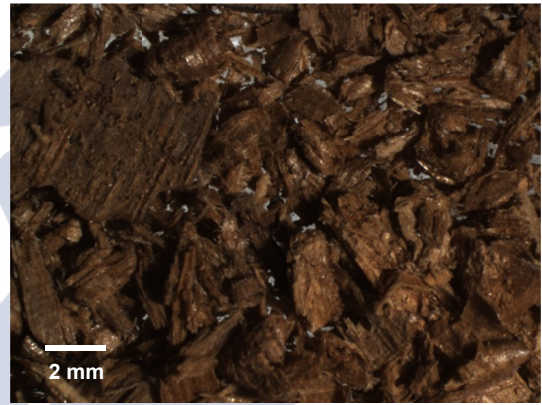
Ficha 4: Características de las muestras extraídas de madera de *Quercus robur* L. atacada por anóbidos



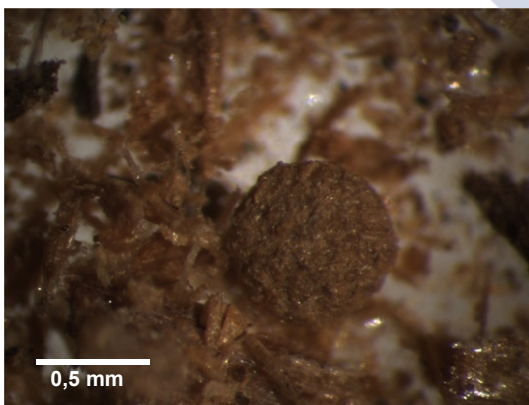
Ambas fracciones separadas en placas petri. Muestra con aspecto polvoriento



Fracción fina: Aspecto polvoriento con presencia de detritus (objetivo x6)



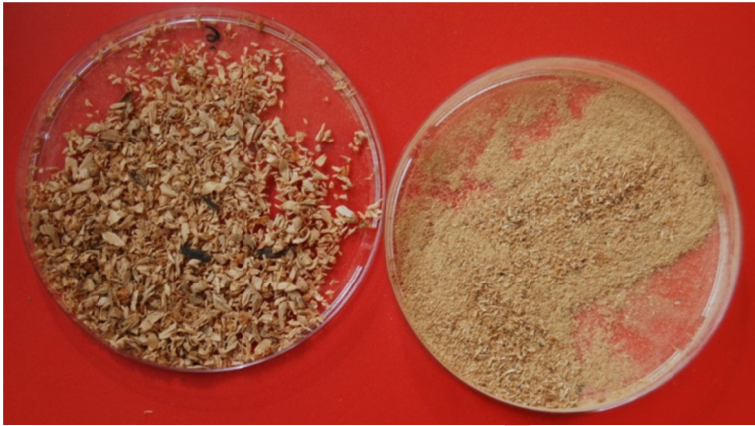
Fracción gruesa: Presencia de virutas bien formadas y restos de galerías (objetivo x6)



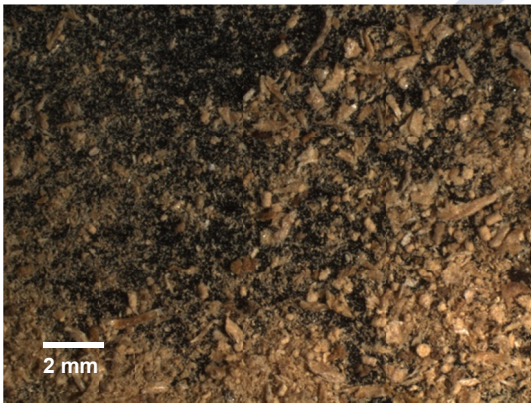
Detalle de la fracción fina: Excremento característicos de *Xestobium rufovillosum* (De Geer) (objetivo x50)

Figura 99: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de roble atacada por anóbidos

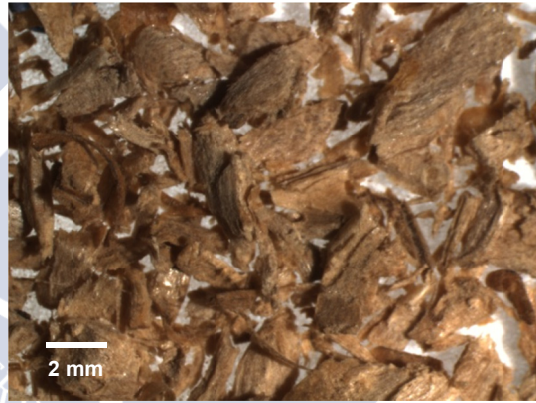
Ficha 5: Características de las muestras extraídas de madera de *Pinus sp.* atacada por cerambícidos



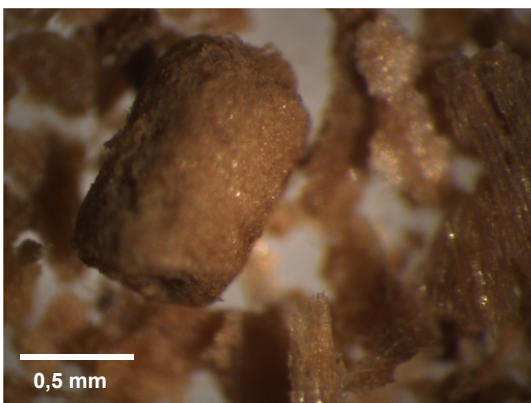
Ambas fracciones separadas en placas petri. Muestra con aspecto polvoriento



Fracción fina: Aspecto polvoriento con presencia de detritus (objetivo x6)



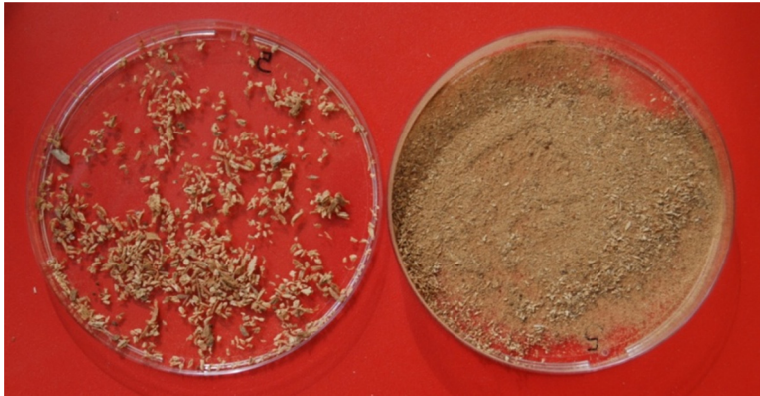
Fracción gruesa: Presencia de virutas bien formadas y restos de galerías (objetivo x6)



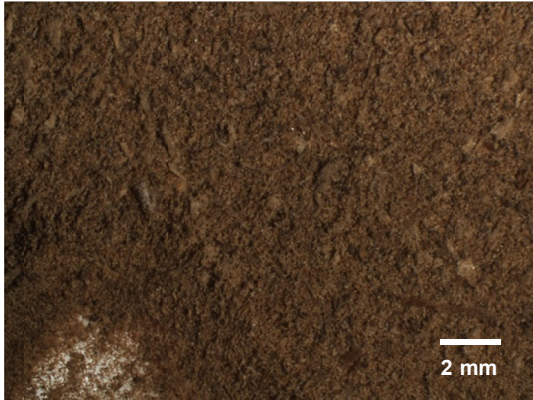
Detalle de la fracción fina: Excremento característicos de *Hylotrupes baujulus* L. (objetivo x50)

Figura 100: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de pino atacada por cerambícidos

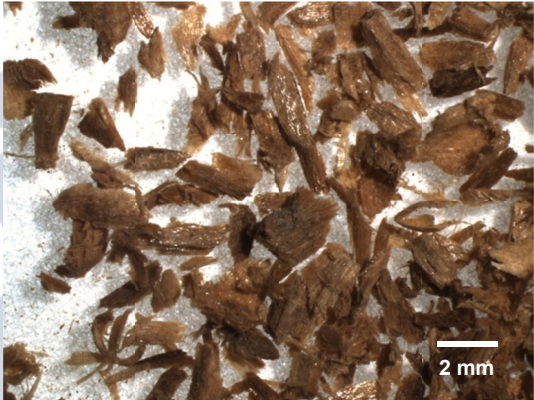
Ficha 6: Características de las muestras extraídas de madera de *Pinus sp.* atacada por curculiónidos



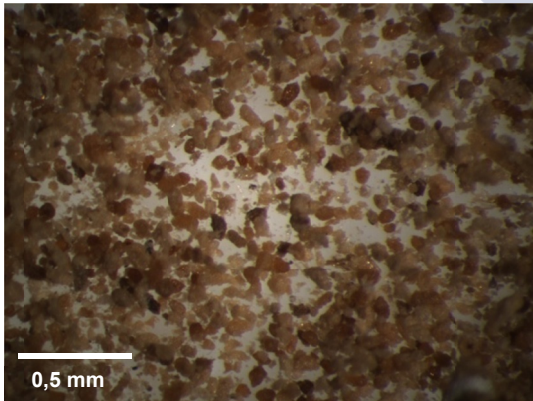
Ambas fracciones separadas en placas petri. Muestra con aspecto polvoriento, color oscuro



Fracción fina: Aspecto polvoriento con presencia de detritus (objetivo x6)



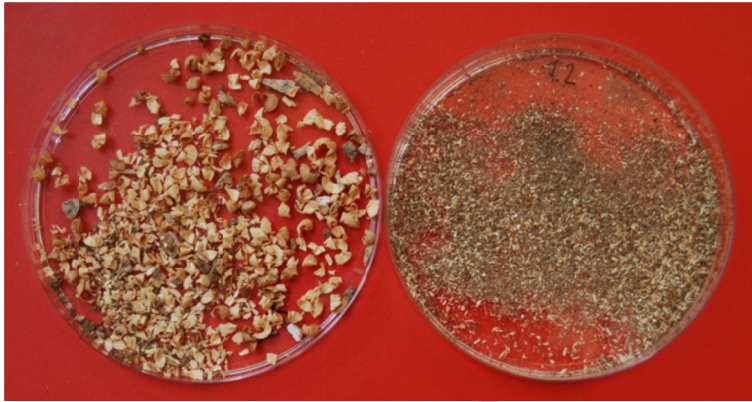
Fracción gruesa: Presencia de virutas bien formadas y restos de galerías (objetivo x6)



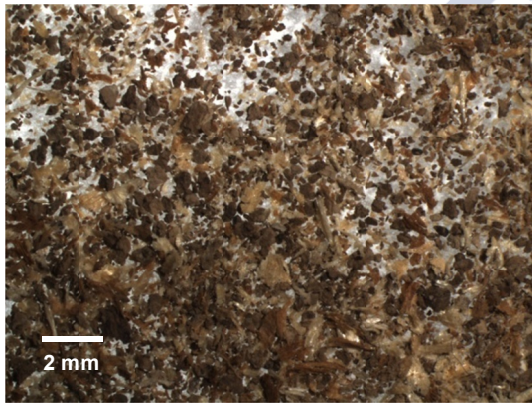
Detalle de la fracción fina: Excrementos característicos de los Curculionidae (objetivo x50)

Figura 101: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de pino atacada por curculiónidos

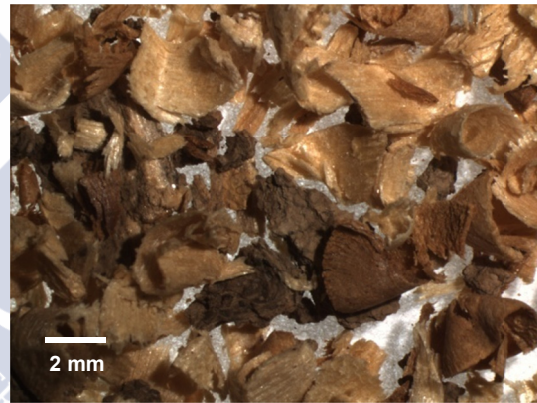
Ficha 7: Características de las muestras extraídas de madera de *Pinus sp.* atacada por termes subterráneos



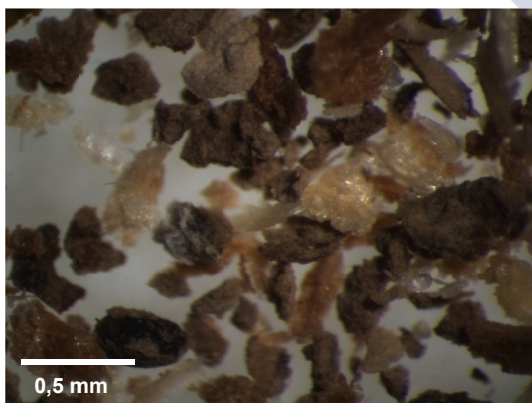
Ambas fracciones separadas en placas petri. Muestra con aspecto polvoriento, color oscuro con olor a humedad o sin olor



Fracción fina: Presencia de restos de barro y madera digerida (objetivo x6)



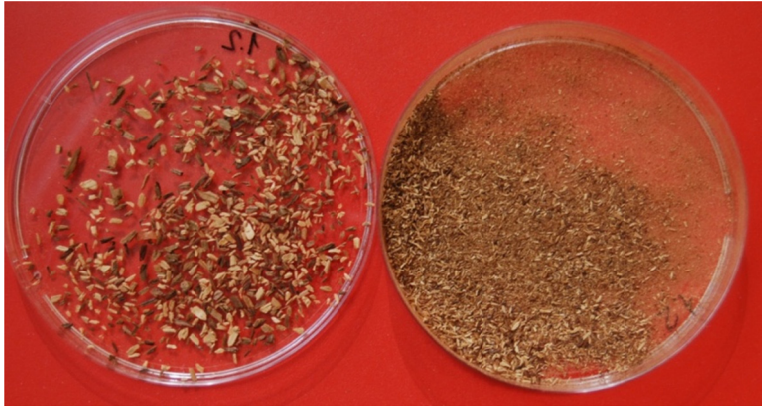
Fracción gruesa: Presencia de virutas bien formadas con restos de galerías, barro y madera digerida (objetivo x6)



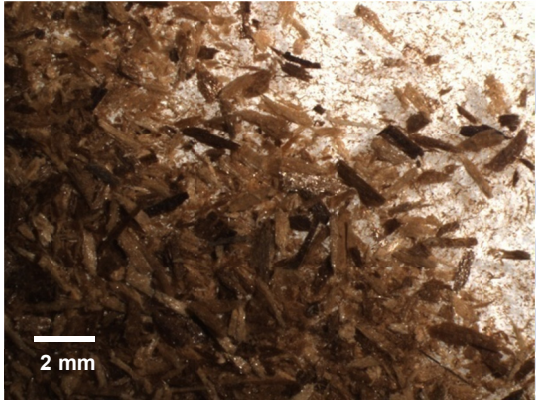
Detalle de la fracción fina: Restos de barro y madera digerida característicos de *Reticulitermes sp.* Holmgren (objetivo x50)

Figura 102: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de pino atacada por termes subterráneos

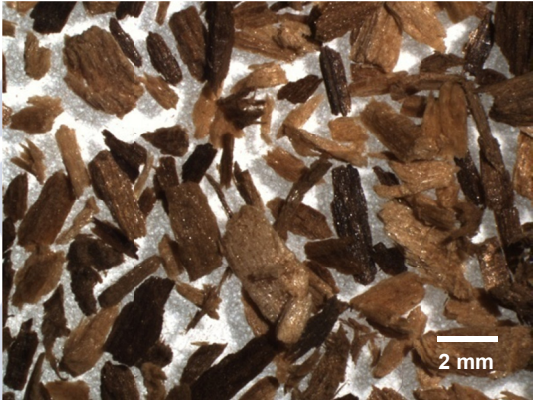
Ficha 8: Características de las muestras extraídas de madera de *Pinus sp.* atacada por pudrición parda



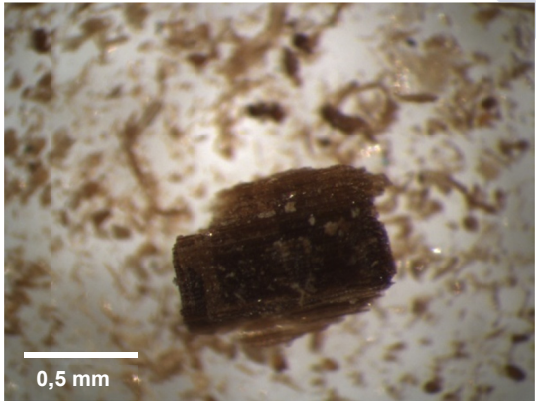
Ambas fracciones separadas en placas petri. Muestra con aspecto polvoriento, color oscuro con olor a humedad o sin olor



Fracción fina: Aspecto polvoriento, color marrón oscuro (objetivo x6)



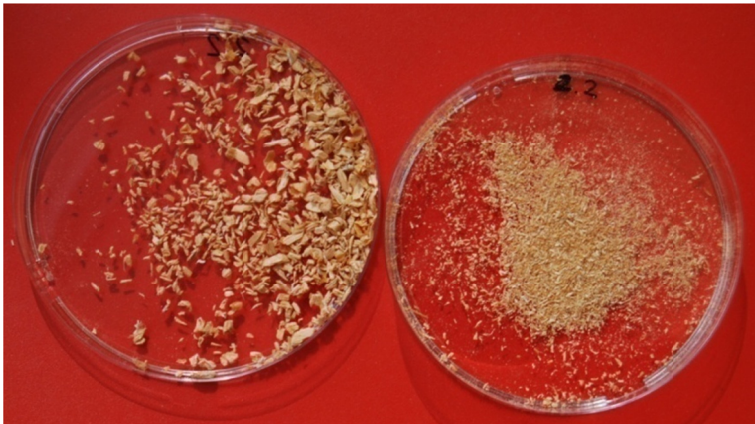
Fracción gruesa: Presencia de prismas característicos de la pudrición parda (objetivo x6)



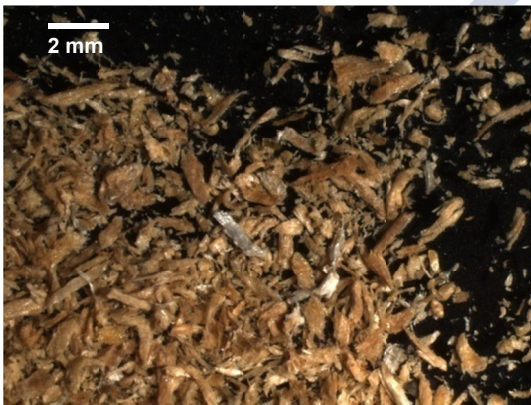
Detalle de la fracción fina: Prisma producido por la pudrición, madera con pérdida de celulosa (objetivo x50)

Figura 103: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de pino atacada por pudrición parda

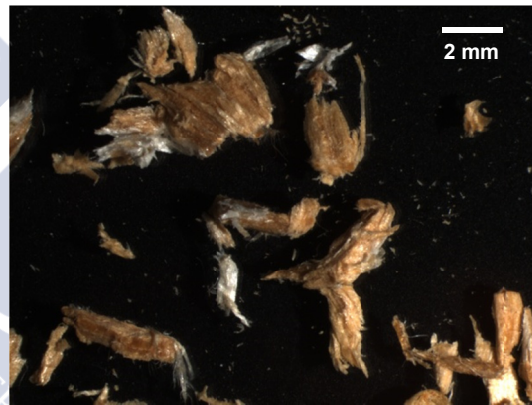
Ficha 9: Características de las muestras extraídas de madera de *Pinus sp.* atacada por pudrición blanca



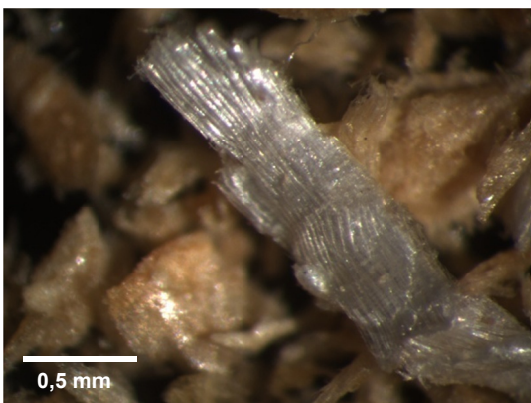
Ambas fracciones separadas en placas petri.
Muestra con aspecto fibroso polvoriento, color claro con olor a humedad o sin olor



Fracción fina: Aspecto fibroso con paquetes de fibras deslignificadas (objetivo x6)



Fracción gruesa: Presencia de paquetes fibrosos de madera deslignificada (objetivo x6)



Detalle de la fracción fina: Paquete de fibras deslignificadas sobre paquetes de fibras sanos (objetivo x50)

Figura 104: Imágenes características de las muestras extraídas de madera de pino atacada por pudrición blanca

9. CONCLUSIONES

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas a lo largo de la realización de la investigación, divididas en las fases en las que se llevó a cabo para facilitar la comprensión de las mismas. Finalmente se recogen las conclusiones generales a destacar del trabajo de investigación realizado.

9.1 CONCLUSIONES GENERALES

Este estudio demuestra que la tecnología y metodología desarrollada aportan estimaciones de la densidad altamente fiables, utilizando un modelo de regresión basado en el peso del residuo de perforación como una variable predictiva.

En resumen, este equipo es simple, económico y fácil de usar, y resuelve una serie de problemas comunes en la inspección de estructuras existentes con una sola técnica. De esta forma, esta técnica permite:

- Estimar la densidad de la madera (eléctrico $R^2 = 96,26\%$ y a baterías $R^2 = 97,74\%$).
- Estimar la humedad de la madera siempre que esta se encuentre por debajo del punto de saturación de las fibras (eléctrico $R^2 = 86,28\%$ y a baterías $R^2 = 71,39\%$).
- Estimar directamente la densidad corregida al 12% de contenido de humedad para maderas que se encuentren por debajo del punto de saturación de las fibras (eléctrico $R^2 = 99,04\%$ y a baterías $R^2 = 98,48\%$).
- Detectar e identificar patologías bióticas.

9.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS POR FASE

9.2.1 Primera fase: Estudio de las variables condicionantes del prototipo

Del análisis visual del acabado superficial de los orificios dejados por las cuatro brocas estudiadas y del análisis de la capacidad de evacuación de las virutas generadas durante el taladrado, se concluyó que: la broca para madera de 3 puntas, marca Punta Castillo de valores nominales de $\varnothing 8 \times 200$ mm es la más adecuada para el buen funcionamiento del sistema por ser la que brindó mejor acabado superficial del interior del orificio y mayor capacidad de extracción de las virutas generadas.

Se seleccionó una bolsa de té como filtro monouso para recoger el polvo y las virutas generadas durante la perforación. Las bolsas de té seleccionadas cuentan con los requisitos necesarios. Además son económicas y se encuentran fácilmente en el mercado.

9.2.2 Segunda fase: Estimación de la densidad en cuatro especies de coníferas con extractor de virutas (estudio preliminar)

En primer lugar se analizó el método propuesto en el estudio preliminar. El análisis de los resultados muestra que no hay necesidad de repetir las mediciones (orificios perforados) en la misma zona de ensayo (150 mm) dado que los resultados son estadísticamente iguales. Tampoco es necesario conocer la dirección de ensayo en la madera (radial o tangencial) ya que esto no influye en el resultado final.

Existe una diferencia del 5% entre la densidad de las probetas y la obtenida a partir de las virutas extraídas. Dado que las muestras son estadísticamente diferentes se realizó un modelo de estimación de la densidad de las probetas utilizando la densidad de las virutas extraídas como predictor obteniendo muy buenas correlaciones ($R^2 = 80,7\%$). Con el fin de simplificar el cálculo y reducir los errores de medición, se obtuvo otro modelo de regresión en base al peso de las virutas extraídas como variable predictiva dando como resultado un mejor coeficiente de determinación R^2 de 84,4%. Esto es debido a la eliminación de los errores de medición que se producen al calcular el volumen desalojado.

9.2.3 Tercera fase: Estimación de la densidad en 10 especies con extractor de virutas, probetas testigo, penetrómetro y arranque de tornillo

Las conclusiones de esta fase se expondrán separadas para cada uno de los métodos utilizados con unas conclusiones generales como colofón:

- **Estimación de la densidad con el método de arranque de tornillos**

Para obtener modelos validos de estimación de la densidad para el conjunto de las 10 especies fue necesario realizar regresiones múltiples teniendo en cuenta la especie de madera ensayada y la resistencia al arranque del tornillo.

El modelo que tiene en cuenta la media de los valores de resistencia en dirección radial y tangencial tiene un coeficiente de determinación de 96,29%. Por otro lado, el modelo que considera el valor de resistencia sin tener en cuenta la dirección de ensayo, obtiene un coeficiente de determinación del 95,78%.

Con este método, para obtener un modelo lineal simple fue necesario eliminar cinco especies: cedro, chopo, pino radiata, pino pinaster y elondo. Este modelo que considera como estimador la resistencia al arranque, obtiene un coeficiente de determinación de 53,39%.

- **Estimación de la densidad con penetrómetro**

En el caso del penetrómetro también fue necesario realizar regresiones múltiples teniendo en cuenta la especie de madera y el valor de penetración. De esta forma se obtuvieron modelos válidos de estimación de la densidad para el conjunto de las 10 especies. Los coeficientes de determinación resultantes fueron los siguientes: para la media de los valores penetración en dirección radial y tangencial fue de 96,43%; para el valor de penetración sin tener en cuenta la dirección de ensayo fue de 95,71%.

En este caso, para obtener un modelo lineal simple con la profundidad de penetración como estimador, también fue necesario eliminar cinco especies: cedro, chopo, pino radiata, pino pinaster y elondo. Con este cambio se obtuvo un coeficiente de determinación de 55,77%.

- **Estimación de la densidad con probetas testigo**

Con este método se obtuvo un modelo de regresión lineal simple de estimación de la densidad con un coeficiente de determinación de 96,62%. Este modelo tiene como estimador la media aritmética del peso de las probetas testigo extraídas en dirección radial y tangencial. El coeficiente de determinación sube al 98,14% en caso de utilizar el peso de las probetas testigo extraída sin tener en cuenta la dirección de ensayo como estimador.

Cuanto más densa sea la madera, más laborioso se torna el acto de extraer la probeta testigo. Algunas maderas como el roble y el iroko producen problemas de colmatación de la broca y quemado de la madera por fricción. Además, el serrín producido por algunas maderas puede resultar urticante. Así, durante los ensayos con el cedro rojo y el iroko fue necesario tomar medidas de seguridad especiales para no estar en contacto con su serrín.

- **Estimación de la densidad con el Extractor de Virutas eléctrico y a baterías**

Para cada dispositivo se halló una función de regresión lineal simple que pudiera estimar la densidad de las 10 especies. Estos modelos resultan en coeficientes de determinación de 96,26% para el extractor eléctrico y 97,74% para el extractor a baterías. Ambos utilizan como estimador el peso de los filtros llenos de virutas extraídas sin tener en cuenta la dirección de ensayo.

En el caso del extractor eléctrico también se obtuvo el modelo de regresión lineal simple para estimar la densidad en las 10 especies utilizando como predictor el valor medio de los filtros llenos de virutas extraídas en dirección radial y tangencial con un coeficiente de determinación de 97,38%.

- **Conclusiones generales para la tercera fase**

Tanto la extracción de probetas testigo como la extracción de virutas obtienen los mejores resultados de correlación en la estimación de la densidad. Ambos métodos permiten estimar la densidad de maderas comprendidas entre los 335 kg/m³ y los 991 kg/m³.

Dentro de estos dos métodos, el de extracción de virutas es más rápido ya que solo requiere extraer la muestra y pesarla. En cambio en el método de probetas testigo hay que extraer la probeta, seccionarla al largo deseado, dimensionarla y pesarla. Por otro lado en el método de probeta testigo es más sencillo apreciar si existe algún fallo en la extracción.

Finalmente en relación con los métodos de resistencia a la penetración y resistencia al arranque de tornillos se concluye que los ensayos en maderas con densidades muy bajas (menores de 400 kg/m³) o muy altas (mayores de 750 kg/m³) presentan anomalías y comportamientos que se alejan de la normalidad. Por tanto estos valores de densidad constituyen los límites de funcionamiento para los modelos simples propuestos con estos equipos.

9.2.4 Cuarta fase: Estimación de la humedad y densidad corregida al 12% H en tres especies con el Extractor de Virutas

El dispositivo diseñado y fabricado para elevar el contenido de humedad de las probetas de madera cumplió con su función permitiendo el correcto desarrollo experimental.

Dentro de las dos fórmulas de corrección de la densidad al 12% H, se eligió la fórmula propuesta por la Norma UNE-EN 384:2010. Esto es debido a que la fórmula propuesta por la Norma ISO 13061-2:2014 proporciona resultados erróneos en maderas cuya densidad se aproxima o supera a la del agua.

Se estimó la humedad de la madera utilizando como variable predictiva el peso húmedo dividido por el peso seco de los filtros llenos de virutas extraídas con ambos equipos. Los modelos obtenidos resultaron en coeficientes de determinación del 86,28% para el extractor eléctrico y del 71,39% para el extractor a baterías.

De la misma forma, se obtuvieron los modelos de regresión de estimación de la densidad corregida al 12% H utilizando los pesos secos y húmedos de los filtros llenos de virutas extraídas. En este caso los coeficientes de determinación ascendieron al 99,04% para el extractor eléctrico y al 98,48% para el extractor a baterías. Estos resultados tan altos se deben a la gran separación que existe entre las densidades de las tres especies y al pequeño tamaño de las probetas.

9.2.5 Quinta fase: Identificación de patologías bióticas en madera.

Con los nuevos dispositivos y la metodología propuesta es posible detectar e identificar patologías bióticas en los elementos inspeccionados. La detección requiere considerar tres aspectos. En primer lugar la sensación de discontinuidad o falta de resistencia al extraer la muestra. En segundo lugar, una medida anormal de la estimación de la densidad. Finalmente el aspecto de las virutas y la presencia de restos dejados por los patógenos. Con el estudio de estos restos es posible identificar el tipo de agente biótico, llegando incluso en algunos casos a identificar la especie.





10. CONCLUSIONS

Research conclusions are presented in different sections, with the general conclusions first followed by the specific conclusions, organized according to research stages.

10.1 GENERAL CONCLUSIONS

This study shows that the technology and methodology developed provide highly reliable *in situ* density estimations. This is as a result of a regression model based on the mass of drilling residue as a predictable variable.

To summarize, this device is simple, affordable and easy to use. It resolves a variety of common, ordinary and everyday issues that arise during the assessment of existing timber structures. This technique permits:

- Wood density estimation (electric device $R^2 = 96.26\%$; battery powered device $R^2 = 97.74\%$).
- Wood moisture content estimation, providing that this variable is below fibre saturation point (electric device $R^2 = 86.28\%$, battery powered device $R^2 = 71.39\%$)
- Direct estimation of wood density at 12% humidity content providing that the wood moisture content is below the fibre saturation point (electric device $R^2 = 99.89\%$, battery powered device $R^2 = 99.82\%$)
- The detection and identification of biological pathologies.

10.2 SPECIFIC CONCLUSIONS

10.2.1 Stage one: study of prototype determinant factors.

From visual analysis of hole surface roughness made by the 4 drill bits and analysis of drill bit sawdust removal capacity it was inferred that the 8 mm diameter brad point bit gives the best surface finish and has the greatest sawdust removal capacity.

Tea bags were selected as a single use paper filter to collect and store the sawdust generated during drilling. They meet requisites and are inexpensive as well as easy to find.

10.2.2 Stage two: estimation of density of four conifer species with prototype 3

The proposed method was first analysed. The results show that there is no need to repeat measurements (drilling holes) in the same test area (150 mm long). It is also unnecessary to consider drilling direction (radial or tangential).

There is a 5% difference between sample density and the density calculated from the sawdust. Given the statistical difference between the two densities a regression model was proposed, based on the density of the drilling residue as a predictor. This model obtains a highly reliable density estimation ($r^2 = 80.7\%$). In order to simplify the calculation and reduce measurement errors, a regression model based on the mass of the drilling residue as a predictive variable was obtained. This gave a better determination coefficient, $r^2 = 84.4\%$.

10.2.3 Stage three: estimation of the density of 10 species using the “Wood extractor”, hollow drill, penetration tester and screw withdrawal device.

The conclusions in this section are grouped under the different testing methods. Some general conclusions are compiled at the end to finish the section off.

- **Screw withdrawal device density estimation**

In order to obtain valid models for density estimation of 10 species it was necessary to perform multiple regressions considering the species and the screw extraction force.

A first model takes into account the average of the values of radial and tangential resistance force. This model results in a determination coefficient of 96.29%. On the other hand, a second model considers resistance values while omitting test direction. In this case the determination coefficient is 95.78%.

With the aim of obtaining a simple regression model it was necessary to omit five species (western red cedar, poplar, radiata pine, maritime pine and missanda). This model uses extraction resistance as the estimator and results in a determination coefficient of 53.39%.

- **Penetrometer density estimation**

As was the case with the previous technique, to obtain valid models for the density estimation of 10 species it was necessary to perform multiple regressions taking into account species and penetration depth values.

A first model considers the average of radial and tangential penetration values, resulting in a determination coefficient of 96.43%. The second model considers penetration values while omitting testing direction. In this case the determination coefficient is 95.71%.

To obtain a simple regression model it was necessary to omit five species (western red cedar, poplar, radiata pine, maritime pine and missanda). This model considers penetration values as the estimator, resulting in a determination coefficient of 57.77%.

- **Hollow drill density estimation**

With this technique two simple regression models for the 10 species were obtained. The first model considers the average of the core sample mass in radial and tangential directions, resulting in a determination coefficient of 96.62%. The second model considers the core sample mass and omits test direction. In this case the determination coefficient is 98.14%.

The higher the density the harder it is to extract the core sample. Several woods such as oak and iroko cause silting of the drill bit and burning due to friction. Sawdust may also cause allergic reactions. It was therefore necessary to take additional personal safety measures to avoid contact with the sawdust of western red cedar and iroko.

- **Density estimation using the “Wood extractor” (prototypes 4 and 5)**

Two simple regressions were obtained for prototype 4. The first model considers average sawdust and filter mass as well as radial and tangential directions. It gives a 97.38% determination coefficient. The second model considers sawdust and filter mass while omitting direction, resulting in a determination coefficient of 96.26%.

Prototype 5 testing led to one simple regression model using sawdust and filter mass as variables and omitting sampling direction. This model gives a determination coefficient of 97.74%.

- **Final conclusions – stage three**

The best density estimation correlation results correspond to core sampling and sawdust extraction. Both methods permit density estimation of woods in the range from 335 kg/m³ to 991 kg/m³.

The fastest of these methods is chip drill extraction, as this technique only requires sample extraction and weighing. The core sampling method requires core extraction, cutting to the desired length, measuring and weighing. However, the core sampling method makes it easiest to detect extraction errors.

Finally, when the penetration tester and screw withdrawal device are used to test very low density woods (below 400 kg/m³) or very high density ones (over 750 kg/m³), they give rise to anomalies and behave in an abnormal way. The said density values are therefore the limits for the simple regression models proposed for penetration and pullout resistance.

10.2.4 Stage four: moisture content and density at 12% of moisture content estimation with the wood extractor (prototype 4 and 5)

The device developed to raise the moisture content of the wood samples worked properly, permitting a correct test process.

The formula chosen to correct the density to 12% of moisture content was the one proposed by the UNE-EN 384:2010 standard. The formula in the ISO 13061-2:2014 standard was rejected as it gives erroneous results for woods with a density close to or above water density.

Wood moisture content was estimated by the variable defined by the ratio of dry mass to wet mass of sawdust. As a result the determination coefficient for prototype 4 is 86.28%, and it is 71.39% for prototype 5.

The regression models to estimate the density to 12% were therefore calculated using the dry and wet mass of the filters containing the sawdust. In this case, the determination coefficients rose to 99.04% for prototype 4 and 98.48% for prototype 5. The high values of the coefficients are caused by differences in the density as well as the small size of the samples.

10.2.5 Stage five: the identification of biological pathologies

The new devices and proposed methodology make it possible to detect and identify biological pathologies in existing timber structures. Three aspects must be taken into account for detection: firstly there is the feeling of discontinuity or a lack of resistance in the wood when extracting the sample; secondly, any unusual density estimation; and finally the general appearance of the sawdust and the presence of pathogen residue. By analysing this residue it is possible to identify the type of biological agent and in some cases, the species.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una vez finalizado el trabajo de investigación de esta Tesis doctoral se abren algunas líneas para futuras investigaciones:

- Promover el uso de los nuevos dispositivos en la comunidad científica, con el fin de adquirir mayor experiencia con su uso y mejorar su funcionamiento.
- Con el objetivo de cerrar el ciclo de utilidad de los nuevos dispositivos de extracción de virutas sería necesario trasladar los ensayos del ambiente de laboratorio a uno que se aproxime más a la realidad de la inspección de estructuras existentes. Por esta razón se propone realizar ensayos a escala real, en piezas de madera estructural de gran escuadría que permitan estimar la densidad global de los elementos a partir de los filtros llenos de virutas extraídas. Finalmente se propone combinar esta técnica con técnicas globales como los ultrasonidos y las ondas acústicas, con el fin de mejorar las estimaciones de las propiedades físico-mecánicas de los elementos estructurales de madera.
- Mejorar el funcionamiento de los equipos en tomas de muestras en maderas con humedades superiores al punto de saturación de las fibras. A este respecto, en estos momentos se están realizando pruebas de estimación de la densidad básica a partir de los filtros llenos de virutas extraídas en maderas verdes de *Eucalyptus* sp. con el fin último de estimar la cantidad de celulosa que se encuentra en una determinada plantación.



REFERENCIAS

Bibliografía

- Acuña, L. Basterra, A. Casado, M^a M. López, G. Ramón-Cueto, G. Relea, E. Martínez, C. González, A. (2011). Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species, *Materiales de Construcción*. Vol. 61, 303. Pp 451-464.
- Álvarez, L.; Basterra, A.; Casado, M.; Acuña, L. (2005). Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructura de madera. En: I Jornadas de Investigación en Construcción. Madrid: IETcc CSIC.
- Arriaga, F., Íñiguez, G., Esteban, M., & Bobadilla, I. (2009). Proposal of a methodology for the assessment of existing timber structures in Spain. In 16th International Symposium on Nondestructive Testing and Evaluation of Wood.
- Arriaga, F.; Esteban, M.; Íñiguez-González, G.; Bobadilla, I.; Llana, D.; González Sanz, M., (2013). Structural assessment of the timber structures of the Casa Grande building in the Real Cortijo de San Isidro, Aranjuez, Madrid (Spain). 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Madison, Wisconsin, EEUU.
- Arriaga, F. Peraza, F. Esteban, M. Bobadilla, I. García, F. (2002). Intervención en estructuras de madera. Ed. Aitim. Madrid. 476 pp.
- Basterra, A.; Casado, M.; Acuña, L.; Pinazo, O. (2006). Técnicas de ensayo pseudo no destructivas en madera estructural existente mediante extracción de tornillos. *Revista ReCoPaR*, nº 2, pp. 37-59.
- Basterra, L.A., 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 doi: 10.3989/ic.09.016
- Bethge, K.; Mattheck, C.; Hunger, E. (1996). Equipment for detection and evaluation of incipient decay in trees. *Arboricultural Journal*, no. 20, pp. 13-37.
- Block, J., (1961) *The Q-sort Method in Personality Assessment and Psychiatric Research*. Charles C. Thomas, Springfield, IL.
- Bobadilla, I., Arriaga, F., Luengo, E., & Martínez, R. (2015). Dimensional and morphological analysis of the detritus from six European wood boring insects. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(4), 893-904.

- Bobadilla, I.; Esteban, M.; Íñiguez, G. Arriaga, F., y Ballarín, D. Palacios, J. (2007a) 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 modulo de elasticidad. Informes de la construcción, vol. 59, no, 506, pp. 107-116.
- Bobadilla, I., de Hijas, M. M., Esteban, M., Íñiguez, G., & Arriaga, F., (2009). Non destructive methods to estimate physical and biological aging of particle and fibre boards. In Proceedings of the 16th International Symposium on Non-Destructive Testing and Evaluation of Wood, H. Zhang and X. Wang (Eds.) (pp. 222-228).
- Bobadilla, I. Íñiguez, G. Esteban, M. Arriaga, F. Casas, L. (2007b). "Density estimation by screw withdrawal resistance and probing in structural sawn coniferous timber," Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Duluth.
- Bobadilla, I. Martínez, R. Calvo, J. Arriaga, F. Íñiguez-González, G. (2013) First steps in wood density estimation using a conventional drill. Proceedings of the 18th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Madison, Wisconsin.
- Bobadilla, I.; Santirso, M.C.; Herrero, D.; Esteban, M.; Íñiguez-González, G. (2011). Non-destructive methods to estimate physical aging of plywood. Proceedings 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Soprom, Hungary.
- Bowers, K.S., (1977) There's more to Iago than meets the eye: a clinical account of personal consistency. In: Magnusson, D., Endler, N.S. (Eds.), Personality at the Crossroads. Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, pp. 65-82.
- Brashaw, B.; Vatalaro, R.; Wacker, J.; Ross, R. (2005). Condition assessment of timber bridges: 1. Evaluation of micro-drilling resistance tool. Kennesaw, Georgia: Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory.
- Bucur, V. (2006) Acoustic of wood. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Cai, Z. Hunt, MO. Ross, R J. Soltis, L A. (2002) Screw withdrawal – A means to evaluate densities of *in situ* wood members. Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Berkeley, California.
- Calderón Guerrero, C. Alonso Herbias, E. ; Domínguez Núñez, J. A. ; Saiz de Omeñaca González, J.A. (2011). Relevance of resistance drilling method and computer-based mapping in street tree management interventions in Madrid (Spain). 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Sopron, Hungary.
- Calderoni, C., De Matteis, G., Giubileo, C., & Mazzolani, F. M. (2010). Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements. Engineering Structures, 32 (2), 442-448.
- Calvo López, J. (2013). Estimación de la densidad en maderas de coníferas empleando un taladro convencional. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- Casado, M.; Pinaza, O.; Basterra, LA; Acuña, L.; (2005) Técnicas de Ensayo No Destructivas en madera estructural mediante extracción de tornillos: aplicación en viguetas de forjado de un edificio singular. Actas del IVº Congreso Nacional de protección de la madera. CIDEMCO (Ed.).Donostia-San Sebastián.

- Costello, L. R.; Quarles, S. L. (1999). Detection of wood decay in blue gum and elm: an evaluation of the resistograph® and the portable drill. *Journal of Arboriculture*, vol. 25, no. 6.
- Cown, D. (1978) Comparison of the pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees. *New Zealand Journal of Forest Science*, vol. 8, no. 3, pp. 384-391.
- Divos, F. (1994). Screw withdrawal force as a strength predictor. En: *Proceedings of the 1st European Symposium on Non-destructive Evaluation of Wood*. Sopron, Hungary.
- Divos, F., Sismándy, F. (2011) Evaluation of historical wooden structures using non-destructive methods. En: *SHATIS'11 International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures - Lisbon, Portugal*,
- Divos, F., Tanaka, T. (1997) Lumber Strength Estimation by Multiple Regression. *Holzforschung*, vol. 51, no. 5, pp. 467-471.
- Esteban, M., Bobadilla, I., Arriaga, F., Íñiguez, G., & Garcia H (2009) NDT Applied to Estimate the Mechanical Properties of the Timber of an Ancient Structure in Valsain, Segovia (Spain). *Proceedings of 16th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Beijing Forestry University
- Esteban, M., Arriaga, F., Íñiguez, G., & Bobadilla, I. (2010). Structural assessment and reinforcement of ancient timber trusses. In *Structures & Architecture: ICSA 2010-1st International Conference on Structures & Architecture*. Guimaraes, Portugal (p. 303). CRC Press.
- Feio, A. O. (2006). *Inspecção e Diagnóstico de Estruturas Históricas de Madeira: Correlações com Métodos Não Destrutivos e Comportamento Estrutural*. Universidade do Minho, Escola de Engenharia. Tese de doutorado.
- Feio, A., & Machado, J. S. (2015). *In situ* assessment of timber structural members: Combining information from visual strength grading and NDT/SDT methods—A review. *Construction and Building Materials*, 101, 1157-1165.
- Feio, A.O.; Machado, J.S.; Lourenco, P.B.(2005). Parallel to the Grain Behaviour and NDT Correlations for Chestnut Wood (*Castanea Sativa* Mill). En: *Proceedings Conservation of Historic Wooden Structures*. Florence, Italy, pp. 294-303.
- Galligan, W.L. (1964) "A Status Report- Nondestructive Testing of Wood". *Forest Products Journal*, vol, 14, pp. 221 – 227.
- Giuriani, E., Marini, A., Cominelli, S., & Gubana, A. (2013). The Penetration Test to Evaluate Wood Decay after 20 Years Timber Structure Assessment Experience. *Advanced Materials Research*. Vol. 778, pp. 201-208.
- Greaves, B.L., Borralho, N., Raymond, C.A. & Farrington, A. (1996). Use of Pilodyn for the indirect selection of basic density in *Eucalyptus nitens*. *Canadian Journal of Forest Research*, 26 (9), 1643-1650.
- Guindeo, A., García, L., Peraza, F., Arriaga, F., Kasner, C., Medina, G. & Touza, M. (1997). *Especies de maderas para carpintería, construcción y mobiliario*. AITIM. Madrid, España.
- Görlacher, R. (1987). Non-destructive testing of wood: an *in situ* method for determination of density. *Holz as Roh-und Werkstoff*. Vol. 45, , pp. 273-278.

- Hoffmeyer, P. (1978). The Pilodyn instrument as a non-destructive tester of the shock resistance of wood. *In: Proc. of the 4th Nondestructive Testing of Wood Symp.*, Washington State Univ., Pullman, WA. pp. 47-66.
- Íñiguez, 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. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Montes. Tesis Doctoral.
- Íñiguez, G.; Arriaga, F.; Bobadilla, I.; Esteban, M., R.(2008) Grading by non-destructive techniques and assessment of the mechanical properties of large cross section coniferous sawn timber for structural use. *En: Proceedings of 10th World Conference on Timber Engineering*, Miyazaki, Japan. pp. 1-8.
- Íñiguez-Gonzalez, G., Montón, J., Arriaga, F., & Segué, E. (2015). *In Situ Assessment of Structural Timber Density Using Non-Destructive and Semi-Destructive Testing*. *BioResources*, 10(2), 2256-2265.
- Isik, F.; LI, B.(2003). Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs. *Canadian journal of forest research*, vol. 33, no. 12, pp. 2426-2435.
- Jasieńko J., Nowak T., Hamrol K., (2013). Selected Methods of Diagnosis of Historic Timber Structures – Principles and Possibilities of Assessment", *Advanced Materials Research*, Vol. 778, pp. 225-232.
- Johnstone, D.M.; Ades, P.K.; Moore, G.M.; Smith, I.W.(2007). Predicting wood decay in eucalyptus using an expert system and the IML-Resistograph Drill. *Agriculture & Urban Forestry* , vol. 33, no. 2, pp. 76-82.
- Kasal, B.(2003) Semi-Destructive Method for *In situ* Evaluation of Compressive Strength of Wood Structural Members. *Forest Products Journal*, 53 pp. 55-58.
- Kasal, B. & Anthony, R. (2004) *Advances in in situ evaluation of timber structures*. Progress in Structural Engineering and Materials. John Wiley & Sons Ltd., London, UK. Vol. 6 No 2, pp. 94-103.
- Kasal, B., & Tannert, T. (Eds.). (2011). *In situ assessment of structural timber* (Vol. 7). Springer Science & Business Media.
- Kloiber, M., & Kotlíňová, M. (2006). Prediction of mechanical properties by means of radial cores in situ. *In In situ evaluation & non-destructive testing of historic wood and masonry structures*, RILEM Workshop (pp. 10-14).
- Kloiber, M., Tippner, J., Hermacova, V., & Stainbruch, J. (2012a). Comparison of results of measuring by current NDT methods with results obtained through a new device for wood mechanical resistance measuring. *In 8th International conference on structural analysis of historical construction*. Wroclaw, Poland.
- Kloiber, M., Tippner, J., Hrivnák, J., & Praus, L. (2012b). Experimental verification of a new tool for wood mechanical resistance measurement. *Wood Res*, 57(3), 383-398.
- Kollman, F. (1959). *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*, Ed IFIE, Madrid, pp. 25-38. 675p.

- Llana, D.F. (2016). Influencia de factores físicos y geométricos en la clasificación estructural de la madera mediante técnicas no destructivas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, ETS de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural.
- Llana, D.F.; Hermoso, E.; Izquierdo, S.T.; Bobadilla, I.; Íñiguez-González, G. (2015) The effect of moisture content on nondestructive probing measurements. 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Rio de Janeiro, Brazil.
- Llana, D.F.; Íñiguez-González, G.; Hermoso, E.; Maynou, V.; Arriaga, F. (2016). Timber moisture content influence on non-destructive local measurements. World Conference on Timber Engineering. August 22-25. Vienna, Austria.
- Lopez, J.A. (1995). Ajuste preliminar del pilodyn 6j forest para estimar la densidad de la madera de *Eucalyptus grandis*. En: 6º Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas. U.N.N.E. Facultad de Ciencias Agrarias. Corrientes, pp. 77-.
- López, J.A. and G.M. Staffieri. 2002. Correlaciones genéticas entre Pilodyn y densidad de la madera de *Pinus elliottii* var. *elliottii* en la Mesopotamia Argentina. Novenas Jornadas Técnicas Forestales. INTA-FCF-MEYRNRYT-Eldorado, Misiones, Argentina. pp. 5.
- Maeglin, R. R.(1979) Increment cores :how to collect, handle, and use them. Kennesaw, Georgia : Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. General Technical Report; FPL 25
- Maeglin, R. R. (1973). *Wisconsin Wood Density Survey* (No. FSRP-FPL-202). Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin.
- Mariño, R. Fernandez, M^a. E. Fernández, C. (2002). “Análisis comparativo de la densidad de la madera de *Pinus sylvestris* L. mediante la utilización del resistógrafo,” Revista CIS-Madera n° 9. Pp. 60-70.
- Martínez, R.; Arriaga, F.; Llana, D.F.; Gallego, J.; Bobadilla, I.(2015). NDT to identify biological damage in wood. 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Rio de Janeiro, Brasil.
- Meagher, R. K. (2009). Observer ratings: validity and value as a tool for animal welfare research. *Applied Animal Behaviour Science*, 119(1), 1-14.
- Micko, M. M., Wang, E. I., Taylor, F. W., & Yanchuk, A. D. (1982). Determination of wood specific gravity in standing white spruce using a pilodyn tester. *The Forestry Chronicle*, 58(4), 178-180.
- Mitchell, H. L. (1958). Wood Quality Evaluation from Increment Cores. *Tappi*, Vol. 41, No. 4, pp. 150-156.
- Mitchell, H. L., & Wheeler, P. R. (1959). Wood quality of Mississippi's pine resources. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin.
- Monton, J. (2012).” Clasificación estructural de la Madera de *Pinus radiata* D.Don procedente de Cataluña mediante métodos no destructivos y su aplicabilidad en la diagnosis estructural,” *Tesis Doctoral. UPC*. Pp. 102-110.
- Niemz, P., L.J. Kucera, and G. Bernatowicz. (1998). Investigation of the spruce wood quality degraded by the brown-rot fungi. *Drevarsky Vyskum*. 43(1): 1-12.

- Notivol, E., Gil, L. A., Pardos, J. A. 1992. Una metodología para la estimación de la densidad de la madera en pie y de su grado de variabilidad en el *Pinus Pinaster* Ait. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 1992, vol. 1, no. 1, pp. 41-47.
- Pellerin, R. F., Ross, R.J., Beall, F.C., Bradshaw, B.K., Cheung, K., Wang, X. (2002) Nondestructive evaluation of wood. Forest Products Society, Madison, WI.
- Peña, S. V., & Rojas, I. M. (2006). Tecnología de la madera. Mundi-Prensa Libros.
- Ramón, G. (2007). Propuesta de metodología orientada al proyecto para la evaluación de estructuras de madera del patrimonio histórico. Tesis doctoral, E.T.S. de Arquitectura de Valladolid. Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Mecánica de los medios Continuos y Teoría de Estructuras.
- Raymond, C.A. & MacDonald, A.C. (1998). Where to shoot your Pilodyn: within tree variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania. *New Forests*, 15 (3), 205-221.
- Rinn, F. (1994). Resistographic inspection of building timber. En: Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast, Australia. vol. 2, pp. 469 – 478
- Rinn, F. (2012). Basics of typical resistance-drilling profiles. *Western Arborist*. Winter, 30-36.
- Rinn, F.; Scheingruber; F. and Schär, E.(1996) Resistograph and X-ray density charts of Wood: comparative evaluation of drill-Resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung: International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, vol. 50, no. 4, pp. 303–311.
- Ross, R.; Brashaw, B.; Pellerin, R.. (1998) “Non-destructive evaluation of wood”. *Forest Products Journal*. Vol. 48 (1): pp. 101-105.
- Ross, R., Brashaw, B.K., Wang, X., White, R.H., and Pellerin, R.F. (2004). *Wood and Timber: Condition Assessment Manual*. Forest Products Society, Madison, WI, 73 pp.
- Ross, R.J. Pellerin, R.F. (1994) Non destructive testing for assessing wood members in structures: A review. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, FPL-GTR-70, Madison, WI. pp. 1-40.
- Sale, J. E., Lohfeld, L. H., & Brazil, K. (2002). Revisiting the quantitative-qualitative debate: Implications for mixed-methods research. *Quality and quantity*, 36(1), 43-53.
- Silva, J.C.E., N.M.G. Borralho, and H. Wellendorf. (2000). Genetic parameter estimates for diameter growth, Pilodyn penetration and spiral grain in *Picea abies* (L.) Karst. *Silvae Genetica*. 49(1).
- Smith, S.M. and J.J. Morrell. 1986. Correcting Pilodyn measurement of Douglas-fir for different moisture levels. *Forest Prod. J.* 36(1): 45-46.
- Soriano, J., Gonçalves, R., Bertoldo, C.; Trinca, A., Ruy, M. (2011) Applications of esclerometer test method in specimens of *Eucalyptus saligna*. En: 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Sopron Hungary pp. 679-684. ISBN 978-963-9883-81-9.
- Soriano, J., da Veiga, N. S., Martins, I. Z. (2015) Wood density estimation using the sclerometric method. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(6), 753-758.

- Tampone, G., Mannucci, S.; Macchioni, S.; (2002): *Strutture di legno*. De Lettera Editore, Milano.
- Tippner, J., Kloiber, M., & Hrivnák, J. (2011). Derivation of mechanical properties by pushing of a pin into wood. In 17th International nondestructive testing and evaluation of wood symposium, Sopron (pp. 575-582).
- Tseng, Y. J., Hsu, M. F. (2003). Evaluating the Mechanical Properties of Wooden Components Using Drill Resistance Method. *J Wood Sci*, Vol. 49, pp. 116-124
- Venes, D. (2008). *Diccionario enciclopédico Taber de ciencias de la salud*. Ed. DAE. Madrid. 1753 pp.
- Watt, M.S., B.T. Garnett, and J.C.F. Walker. (1996). The use of the Pilodyn for assessing outerwood density in New Zealand radiata pine. *Forest Prod. J.* 46(11/12): 101-106.
- Wilson, James B. (1981). Pole inspection using the pilodyn. *Proceedings of the 7th Wood Pole Institute*. Fort Collins, Colorado.
- Wu, S., Xu, J., Li, G., Risto, V., Lu, Z., Li, B. & Wang, W. (2010). Use of the Pilodyn for assessing wood properties in standing trees of Eucalyptus clones. *Journal of Forestry Research*, 21 (1), 68-72.

Normas

- ISO 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. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.
- UNE-56544:2011. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*. Madrid: AENOR, 2011.
- UNE 56546:2013. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: madera de frondosas*. Madrid: AENOR, 2013.
- UNE-EN 384: 2010. *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. Madrid: AENOR, 2010.
- UNE-EN 408:2011+A1:2012. *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. Madrid: AENOR, 2011.
- UNE – EN: 13183 – 1 2002. *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa*. Madrid: AENOR, 2004.

Patentes

Dutkiewicz, J., Kwapiszewski, C., Olenchock, S. A., & Lewis, D. (1992). U.S. Patent No. 5,078,553. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Heinrich, G. (1992). U.S. Patent No. 5,173,154. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Irion, C. E., & Prindle, K. E. (1955). U.S. Patent No. 2,714,571. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Magill Jr Donald, G. (1964). U.S. Patent No. 3,121,657. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Martínez, R. and Bobadilla, I. (2013). Extractor de muestras de madera mediante taladro. Spain, ES2525504. (B27C 3/00) (2006.01), 16 Nov 2015. Appl. 201330890, 14 Jul 2013. 11p.



ANEXOS

ANEXO I: LEYENDA DE TABLAS DE DATOS

A: ancho de la probeta (mm).

B: espesor de la probeta (mm).

Cód.: código individual de probeta.

D1: diámetro del 1º orificio realizado con el prototipo 3 (mm).

D2: diámetro del 2º orificio realizado con el prototipo 3 (mm).

D3: diámetro del 3º orificio realizado con el prototipo 3 (mm).

D4: diámetro del orificio realizado con el prototipo 4 sin tener en cuenta la dirección de ensayo (mm).

D4R: diámetro del orificio realizado en dirección radial con el prototipo 4 (mm).

D4T: diámetro del orificio realizado en dirección tangencial con el prototipo 4 (mm).

D5: diámetro del orificio realizado con el prototipo 5 sin tener en cuenta la dirección de ensayo (mm).

Dir.: dirección de ensayo predominante de la probeta.

DPTR: diámetro de la probeta testigo extraída en dirección radial (mm).

DPTT: diámetro de la probeta testigo extraída en dirección tangencial (mm).

Esp.: especie ensayada.

HC: contenido de humedad consigna (%).

L: longitud de la probeta (mm).

LPTR: longitud de la probeta testigo extraída en dirección radial (mm).

LPPT: longitud de la probeta testigo extraída en dirección tangencial (mm).

MATR: fuerza necesaria para arrancar el tirafondo en dirección radial (kN).

MATT: fuerza necesaria para arrancar el tirafondo en dirección tangencial (kN).

P01: peso seco del filtro lleno de virutas extraídas del 1° orificio realizado con el prototipo 3 (g).

P02: peso seco del filtro lleno de virutas extraídas del 2° orificio realizado con el prototipo 3 (g).

P03: peso seco del filtro lleno de virutas extraídas del 3° orificio realizado con el prototipo 3 (g).

P04: peso seco del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 4 sin tener en cuenta la dirección de ensayo (g).

P05: peso seco del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 5 sin tener en cuenta la dirección de ensayo (g).

P0d: peso seco de la probeta después de los ensayos (g).

Ph: peso húmedo de la probeta (g).

Ph1: peso húmedo del filtro lleno de virutas extraídas del 1° orificio realizado con el prototipo 3 (g).

Ph2: peso húmedo del filtro lleno de virutas extraídas del 2° orificio realizado con el prototipo 3 (g).

Ph3: peso húmedo del filtro lleno de virutas extraídas del 3° orificio realizado con el prototipo 3 (g).

Ph4: peso húmedo del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 4 sin tener en cuenta la dirección de ensayo (g).

Ph4R: peso húmedo del filtro lleno de virutas extraídas en dirección radial con el prototipo 4 (g).

Ph4T: peso húmedo del filtro lleno de virutas extraídas en dirección tangencial con el prototipo 4 (g).

Ph5: peso húmedo del filtro lleno de virutas extraídas con el prototipo 5 sin tener en cuenta la dirección de ensayo (g).

Pha: peso húmedo de la probeta estabilizada ($HC \pm 1\%$) antes de los ensayos (g).

Phd: peso húmedo de la probeta después de los ensayos (g).

PNR: penetración de la varilla en dirección radial (mm).

PNT: penetración de la varilla en dirección tangencial (mm).

PPTR: peso de la probeta testigo extraída en dirección radial (g).

PPTT: peso de la probeta testigo extraída en dirección tangencial (g).

Prof.1: diámetro del 1º orificio realizado con el prototipo 3 (mm).

Prof.2: diámetro del 2º orificio realizado con el prototipo 3 (mm).

Prof.3: diámetro del 3º orificio realizado con el prototipo 3 (mm).

Prof.4: profundidad del orificio realizado con el prototipo 4 sin tener en cuenta la dirección de ensayo (mm).

Prof.4R: profundidad del orificio realizado en dirección radial con el prototipo 4 (mm).

Prof.4T: profundidad del orificio realizado en dirección tangencial con el prototipo 4 (mm).

Prof.5: profundidad del orificio realizado con el prototipo 5 sin tener en cuenta la dirección de ensayo (mm).



ANEXO II: TABLAS DE DATOS DE LOS ENSAYOS DE LA SEGUNDA FASE

Cód.	Esp.	B	A	L	Ph	Dir.	Phd	P0d
R1R	radiata	60,47	95,21	152,01	474,69	radial	470,85	423,96
R2R	radiata	58,85	97,55	151,92	404,10	radial	400,57	363,57
R3R	radiata	54,61	95,03	151,29	386,78	radial	382,72	345,06
R4R	radiata	54,74	94,93	151,01	334,85	radial	331,55	301,80
R5R	radiata	54,41	93,79	151,52	396,80	radial	392,86	353,71
R6R	radiata	57,34	96,49	151,53	346,95	radial	344,01	309,55
R7R	radiata	79,65	91,82	151,28	553,14	radial	549,24	498,80
R8R	radiata	58,49	95,36	151,84	390,82	radial	387,08	347,62
R9R	radiata	54,88	95,28	152,79	393,84	radial	389,78	351,78
R10R	radiata	61,52	94,78	152,01	369,90	radial	366,37	331,83
R11R	radiata	56,45	95,74	150,39	375,27	radial	372,80	336,41
R12R	radiata	61,53	102,46	151,37	460,74	radial	457,36	411,54
R13R	radiata	57,28	99,72	150,74	444,25	radial	444,49	398,08
R14R	radiata	54,01	96,54	150,53	402,24	radial	398,52	359,71
R15R	radiata	56,84	98,75	150,54	424,66	radial	421,36	378,87
R16R	radiata	57,79	95,94	152,96	438,78	radial	434,69	391,36
R17R	radiata	58,18	95,19	152,37	471,62	radial	467,99	418,35
R18R	radiata	57,90	94,37	152,59	447,07	radial	443,67	398,20
R19R	radiata	59,43	93,18	152,76	438,23	radial	434,70	389,87
R20R	radiata	60,12	95,29	152,09	426,60	radial	422,94	380,95
R21R	radiata	65,89	95,35	150,62	448,21	radial	444,51	401,77
R22R	radiata	58,23	95,77	150,36	334,81	radial	332,09	299,46
R1T	radiata	56,88	95,77	151,77	461,73	tangencial	457,56	411,84
R2T	radiata	58,89	94,73	151,94	449,62	tangencial	445,87	401,70
R3T	radiata	60,13	93,68	151,35	382,46	tangencial	379,06	343,48
R4T	radiata	57,30	93,86	150,99	392,48	tangencial	388,43	351,03
R5T	radiata	85,86	90,79	150,83	561,57	tangencial	557,91	501,79
R6T	radiata	57,23	88,79	150,57	380,54	tangencial	376,73	340,50
R7T	radiata	51,95	95,00	151,28	388,64	tangencial	384,11	350,21
R8T	radiata	59,21	95,23	151,01	455,59	tangencial	452,25	408,01
R9T	radiata	61,48	95,44	150,78	429,27	tangencial	425,10	385,29
R10T	radiata	83,77	94,90	152,60	615,36	tangencial	611,94	551,36
R11T	radiata	83,24	90,80	152,96	630,21	tangencial	626,74	564,31
R12T	radiata	58,00	94,10	150,58	401,26	tangencial	397,80	359,57
R13T	radiata	57,20	94,41	150,83	417,65	tangencial	413,96	374,29
R14T	radiata	61,52	93,81	150,86	466,46	tangencial	462,14	416,00
R15T	radiata	58,10	98,39	152,34	483,25	tangencial	478,92	428,95
R16T	radiata	58,16	99,00	152,04	401,28	tangencial	397,92	356,81
R17T	radiata	57,97	100,79	150,99	452,65	tangencial	448,62	405,60
R18T	radiata	60,46	96,09	152,37	503,43	tangencial	499,11	449,40
R19T	radiata	55,01	97,24	152,30	460,24	tangencial	456,29	413,97
R20T	radiata	58,17	91,63	151,73	467,89	tangencial	463,17	419,40
R21T	radiata	60,14	97,41	150,73	445,84	tangencial	442,27	400,01
R22T	radiata	54,76	93,99	150,59	374,52	tangencial	370,92	335,58
P1R	pinaster	80,75	99,73	99,46	404,87	radial	401,31	355,00

Cód.	Esp.	B	A	L	Ph	Dir.	Phd	P0d
P2R	pinaster	81,10	98,43	92,24	353,35	radial	349,96	309,74
P3R	pinaster	79,17	100,15	90,07	346,71	radial	343,32	303,21
P4R	pinaster	78,93	99,84	93,02	355,71	radial	352,22	312,53
P5R	pinaster	79,60	99,62	96,52	374,21	radial	370,62	327,33
P6R	pinaster	79,91	98,62	95,36	372,40	radial	368,79	327,81
P7R	pinaster	80,09	99,84	92,06	367,11	radial	363,49	321,61
P8R	pinaster	82,17	98,76	102,75	379,68	radial	376,16	335,55
P9R	pinaster	80,86	97,94	94,92	390,12	radial	386,58	342,51
P10R	pinaster	98,71	83,58	101,00	358,35	radial	355,20	313,08
P11R	pinaster	100,61	83,21	95,82	377,42	radial	374,20	329,87
P12R	pinaster	80,56	99,45	95,31	389,23	radial	385,67	339,12
P13R	pinaster	80,59	100,35	95,50	361,71	radial	358,35	316,36
P14R	pinaster	79,79	98,42	94,69	373,06	radial	369,32	325,24
P15R	pinaster	97,49	84,45	94,71	334,51	radial	331,52	292,55
P16R	pinaster	78,77	99,79	96,48	369,83	radial	366,26	323,26
P17R	pinaster	83,50	98,15	122,02	464,31	radial	461,10	408,72
P18R	pinaster	79,00	100,63	93,09	380,10	radial	376,59	333,03
P19R	pinaster	81,52	97,79	87,14	355,36	radial	351,99	310,57
P20R	pinaster	101,61	80,82	98,00	404,52	radial	400,91	352,87
P21R	pinaster	79,01	100,80	91,51	421,60	radial	417,98	369,79
P22R	pinaster	79,71	100,77	97,89	488,01	radial	484,35	429,30
P1T	pinaster	83,65	97,54	95,06	370,33	tangencial	366,89	326,01
P2T	pinaster	81,47	102,89	94,05	391,08	tangencial	387,78	342,13
P3T	pinaster	95,19	97,44	95,27	331,87	tangencial	328,90	291,02
P4T	pinaster	83,86	97,46	89,64	327,94	tangencial	324,81	287,99
P5T	pinaster	99,78	80,82	100,82	384,96	tangencial	381,52	337,11
P6T	pinaster	83,30	98,01	93,73	324,33	tangencial	321,21	290,58
P7T	pinaster	83,33	97,34	96,79	341,47	tangencial	338,37	298,12
P8T	pinaster	83,25	97,37	95,47	349,62	tangencial	346,54	306,27
P9T	pinaster	83,04	100,02	98,67	360,83	tangencial	357,81	316,01
P10T	pinaster	83,19	98,22	98,22	344,28	tangencial	341,14	301,40
P11T	pinaster	83,19	97,12	96,78	343,65	tangencial	343,43	301,03
P12T	pinaster	83,61	100,80	94,98	369,46	tangencial	365,88	322,39
P13T	pinaster	83,44	101,23	97,79	377,94	tangencial	374,56	333,52
P14T	pinaster	83,61	98,63	96,38	346,99	tangencial	344,04	302,96
P15T	pinaster	83,26	97,60	93,49	337,99	tangencial	335,15	296,32
P16T	pinaster	83,50	97,97	96,57	352,83	tangencial	349,87	309,32
P17T	pinaster	83,86	100,45	98,68	378,92	tangencial	375,56	334,38
P18T	pinaster	85,06	101,11	102,53	396,71	tangencial	393,41	346,86
P19T	pinaster	83,00	99,95	95,40	350,17	tangencial	347,10	307,77
P20T	pinaster	84,63	100,36	99,39	412,61	tangencial	409,41	363,24
P21T	pinaster	83,79	97,65	98,25	365,74	tangencial	362,60	322,10
P22T	pinaster	83,81	100,45	94,32	461,74	tangencial	458,35	409,19
S1R	silvestre	57,70	88,53	148,64	365,30	radial	362,28	332,11
S2R	silvestre	52,64	91,74	148,30	334,80	radial	331,85	302,06
S3R	silvestre	59,14	95,41	150,17	400,34	radial	397,00	360,35
S4R	silvestre	60,08	94,38	150,04	414,60	radial	411,03	373,27
S5R	silvestre	62,31	94,73	150,11	416,20	radial	412,86	374,59
S6R	silvestre	59,80	94,42	150,40	385,08	radial	381,94	346,98

Cód.	Esp.	B	A	L	Ph	Dir.	Phd	P0d
S7R	silvestre	59,87	95,79	149,95	473,98	radial	470,07	428,46
S8R	silvestre	60,90	94,66	149,27	433,73	radial	429,72	410,00
S9R	silvestre	60,26	94,68	148,52	467,04	radial	462,88	428,47
S10R	silvestre	57,96	95,60	149,50	424,18	radial	420,55	382,11
S11R	silvestre	59,24	95,23	149,42	414,68	radial	411,35	371,96
S12R	silvestre	72,04	95,22	149,48	507,26	radial	503,84	456,26
S13R	silvestre	58,60	95,85	150,35	485,08	radial	480,22	445,17
S14R	silvestre	62,32	95,30	152,00	408,46	radial	405,24	369,40
S15R	silvestre	60,07	95,08	151,98	418,11	radial	414,77	378,77
S16R	silvestre	59,55	87,43	152,32	396,87	radial	393,50	357,12
S17R	silvestre	60,64	96,55	149,28	424,78	radial	421,53	388,31
S18R	silvestre	60,21	94,98	150,83	379,98	radial	377,24	342,74
S19R	silvestre	60,49	94,88	150,76	361,64	radial	359,03	326,66
S20R	silvestre	60,17	94,65	150,69	401,97	radial	398,65	361,43
S21R	silvestre	60,13	94,07	151,00	381,14	radial	378,47	343,64
S1T	silvestre	59,61	87,20	148,08	345,24	tangencial	342,08	310,86
S2T	silvestre	59,58	95,39	148,23	387,03	tangencial	383,96	350,76
S3T	silvestre	57,71	88,81	149,64	358,17	tangencial	354,97	322,84
S4T	silvestre	62,94	95,10	149,01	426,98	tangencial	423,51	383,34
S5T	silvestre	58,83	95,00	148,99	370,66	tangencial	367,74	336,35
S6T	silvestre	59,76	95,28	150,39	389,44	tangencial	386,32	350,79
S7T	silvestre	62,80	95,48	150,35	418,02	tangencial	414,84	376,65
S8T	silvestre	59,97	94,96	150,01	464,74	tangencial	461,22	425,38
S9T	silvestre	59,87	95,44	149,80	445,90	tangencial	442,52	431,34
S10T	silvestre	66,07	93,68	148,34	522,37	tangencial	574,97	518,30
S11T	silvestre	60,28	95,58	148,31	488,81	tangencial	484,84	437,23
S14T	silvestre	61,41	95,18	151,94	431,01	tangencial	427,74	389,70
S15T	silvestre	59,02	94,86	152,31	430,70	tangencial	427,42	387,40
S16T	silvestre	60,22	86,41	152,09	401,80	tangencial	398,35	362,61
S17T	silvestre	60,44	94,64	152,11	425,96	tangencial	422,69	385,25
S18T	silvestre	61,27	94,78	150,54	424,16	tangencial	420,86	382,37
S19T	silvestre	61,83	88,82	150,04	401,97	tangencial	398,74	362,10
S20T	silvestre	59,79	92,52	150,62	407,76	tangencial	404,16	368,11
S21T	silvestre	73,48	92,19	149,71	407,63	tangencial	404,20	368,16
N1R	laricio	67,90	95,21	149,51	819,77	radial	812,97	723,19
N2R	laricio	68,08	93,99	149,46	933,51	radial	925,92	818,76
N3R	laricio	60,09	94,92	149,72	678,20	radial	672,26	602,27
N4R	laricio	59,68	93,74	150,22	685,05	radial	679,52	618,66
N5R	laricio	60,22	95,05	150,25	478,77	radial	474,71	433,82
N6R	laricio	59,89	95,19	150,52	547,78	radial	543,88	500,71
N7R	laricio	59,88	94,96	150,10	508,95	radial	505,00	459,94
N9R	laricio	54,30	94,26	150,50	484,70	radial	480,02	433,32
N10R	laricio	57,36	94,04	150,45	516,97	radial	512,58	467,74
N11R	laricio	71,10	94,36	149,93	620,30	radial	618,87	556,85
N12R	laricio	67,38	93,58	149,80	536,26	radial	532,20	481,64
N13R	laricio	71,72	94,21	150,31	565,25	radial	561,33	507,72
N14R	laricio	59,49	95,04	150,43	515,63	radial	511,29	467,62
N15R	laricio	58,95	95,14	150,06	500,01	radial	595,94	449,12
N16R	laricio	60,24	94,99	150,11	405,89	radial	402,68	364,89

Cód.	Esp.	B	A	L	Ph	Dir.	Phd	P0d
N17R	laricio	59,79	93,81	150,23	398,91	radial	395,82	358,77
N18R	laricio	65,43	94,91	149,80	468,52	radial	465,05	421,81
N19R	laricio	59,80	95,38	150,09	371,72	radial	368,78	336,01
N20R	laricio	60,36	94,77	150,11	419,18	radial	416,12	382,75
N21R	laricio	60,57	95,11	149,83	527,10	radial	523,10	477,31
N22R	laricio	60,40	95,28	150,00	505,89	radial	502,01	458,79
N1T	laricio	59,23	95,22	150,26	651,91	tangencial	646,99	595,38
N2T	laricio	59,32	93,64	150,38	656,69	tangencial	651,25	596,70
N4T	laricio	60,30	95,56	149,71	507,46	tangencial	503,70	461,94
N5T	laricio	60,29	94,95	150,70	547,02	tangencial	541,86	497,76
N6T	laricio	60,20	95,47	150,65	539,05	tangencial	534,66	486,55
N7T	laricio	59,83	92,75	150,78	518,80	tangencial	514,45	466,88
N8T	laricio	61,46	94,11	149,81	580,58	tangencial	575,81	529,45
N9T	laricio	59,97	95,21	149,89	579,44	tangencial	574,89	526,18
N10T	laricio	59,79	91,13	149,87	531,89	tangencial	527,81	480,26
N11T	laricio	73,37	96,01	150,02	585,03	tangencial	581,64	527,14
N12T	laricio	75,56	84,89	150,46	506,98	tangencial	503,63	456,14
N13T	laricio	59,39	95,29	150,01	518,19	tangencial	512,96	464,83
N14T	laricio	59,56	95,10	150,02	487,30	tangencial	483,31	435,15
N15T	laricio	60,49	95,23	150,12	545,29	tangencial	540,57	484,65
N16T	laricio	60,24	94,63	150,18	536,01	tangencial	531,42	475,98
N17T	laricio	60,37	95,17	151,02	394,23	tangencial	391,02	359,82
N18T	laricio	58,75	95,38	149,48	459,92	tangencial	455,39	416,59
N19T	laricio	60,20	95,29	149,64	472,83	tangencial	468,62	427,99
N20T	laricio	59,99	95,22	150,53	439,22	tangencial	435,54	395,87
N21T	laricio	59,74	95,26	150,18	544,35	tangencial	540,07	492,87
N22T	laricio	59,74	95,37	149,84	534,98	tangencial	530,60	481,56

Cód.	D1	D2	D3	Prof.1	Prof.2	Prof.3	Ph1	Ph2	Ph3	P01	P02	P03
R1R	8,05	8,19	8,02	46,31	46,59	47,22	1,51	1,51	1,56	1,39	1,39	1,45
R2R	8,00	8,01	8,03	46,15	46,64	46,31	1,25	1,27	1,27	1,17	1,19	1,18
R3R	8,03	8,02	8,03	46,58	47,10	46,51	1,48	1,48	1,46	1,37	1,36	1,36
R4R	8,03	8,02	8,10	46,64	46,52	46,59	1,21	1,21	1,21	1,13	1,14	1,13
R5R	8,02	8,00	8,03	46,54	46,68	47,60	1,36	1,38	1,41	1,27	1,30	1,32
R6R	8,06	8,02	8,07	47,13	46,31	46,84	1,14	1,18	1,15	1,05	1,10	1,06
R7R	8,07	8,01	8,03	46,89	47,06	46,60	1,45	1,40	1,41	1,36	1,30	1,32
R8R	8,13	8,08	8,09	46,36	46,79	46,69	1,31	1,32	1,31	1,22	1,22	1,22
R9R	8,01	8,00	8,01	46,69	46,68	46,26	1,46	1,48	1,47	1,37	1,34	1,36
R10R	8,06	8,08	8,05	46,80	46,72	46,96	1,20	1,21	1,23	1,11	1,14	1,15
R11R	8,08	8,08	8,03	46,54	46,33	46,67	1,30	1,32	1,32	1,17	1,18	1,17
R12R	8,07	8,03	8,06	46,74	46,65	46,64	1,38	1,37	1,37	1,26	1,26	1,26
R13R	8,09	8,04	8,01	46,56	46,38	46,53	1,42	1,43	1,42	1,31	1,32	1,29
R14R	8,13	8,10	8,05	46,55	46,76	46,75	1,37	1,40	1,37	1,27	1,30	1,28
R15R	8,09	8,03	8,10	46,72	46,49	46,79	1,33	1,33	1,38	1,23	1,11	1,26
R16R	8,01	8,01	8,03	46,43	46,41	46,61	1,43	1,44	1,45	1,36	1,34	1,35
R17R	8,05	8,03	8,00	46,19	46,13	46,05	1,45	1,45	1,43	1,32	1,32	1,30
R18R	8,00	8,02	8,03	46,26	46,38	46,54	1,38	1,40	1,38	1,27	1,27	1,27
R19R	8,02	8,02	8,00	46,02	46,42	46,52	1,41	1,42	1,41	1,29	1,30	1,29
R20R	8,01	8,01	8,03	46,59	46,51	46,78	1,45	1,45	1,47	1,34	1,34	1,35
R21R	8,04	8,00	8,02	46,83	46,75	46,88	1,37	1,39	1,41	1,26	1,29	1,29
R22R	8,03	8,03	8,15	46,35	46,53	46,37	1,13	1,17	1,15	1,05	1,08	1,07
R1T	8,01	8,00	8,02	46,43	46,53	46,67	1,43	1,45	1,49	1,34	1,35	1,39
R2T	8,02	8,01	8,02	46,34	46,43	46,72	1,50	1,53	1,53	1,38	1,39	1,45
R3T	8,04	8,09	8,00	46,92	47,20	46,69	1,33	1,32	1,32	1,23	1,23	1,22
R4T	8,01	8,02	8,02	46,36	47,06	46,80	1,49	1,51	1,52	1,36	1,38	1,40
R5T	8,06	8,06	8,10	47,36	47,05	46,86	1,45	1,38	1,42	1,34	1,28	1,31
R6T	8,07	8,09	8,05	46,90	46,15	46,63	1,33	1,36	1,66	1,23	1,25	1,54
R7T	8,01	8,03	8,02	46,36	46,56	47,02	1,52	1,54	1,56	1,41	1,43	1,46
R8T	8,08	8,09	8,00	46,43	46,70	46,58	1,31	1,35	1,30	1,22	1,25	1,22
R9T	8,02	8,15	8,12	46,36	46,45	46,62	1,39	1,41	1,41	1,30	1,32	1,33
R10T	8,02	8,11	8,00	47,02	46,99	46,81	1,33	1,34	1,32	1,23	1,24	1,22
R11T	8,06	8,03	8,15	46,76	47,70	47,14	1,31	1,31	1,33	1,22	1,22	1,24
R12T	8,03	8,00	8,00	46,41	46,58	46,65	1,32	1,32	1,35	1,23	1,20	1,24
R13T	8,06	8,00	8,05	46,91	46,81	46,68	1,48	1,38	1,43	1,36	1,27	1,31
R14T	8,03	8,03	8,03	47,17	46,41	46,79	1,54	1,50	1,47	1,44	1,39	1,37
R15T	8,00	8,01	8,00	46,70	47,06	46,65	1,51	1,47	1,53	1,40	1,35	1,41
R16T	8,02	8,03	8,13	46,07	46,44	46,98	1,21	1,22	1,19	1,12	1,17	1,14
R17T	8,09	8,06	8,03	46,77	46,43	46,82	1,38	1,34	1,34	1,30	1,25	1,26
R18T	8,07	8,10	8,02	46,72	47,04	47,02	1,61	1,51	1,60	1,48	1,41	1,46
R19T	8,03	8,07	8,01	46,29	46,12	46,55	1,40	1,44	1,42	1,32	1,34	1,32

Cód.	D1	D2	D3	Prof. 1	Prof. 2	Prof. 3	Ph1	Ph2	Ph3	P01	P02	P03
R20T	8,10	8,02	8,18	46,40	46,99	46,21	1,54	1,56	1,63	1,46	1,46	1,52
R21T	8,06	8,10	8,01	46,61	46,93	47,16	1,37	1,33	1,33	1,26	1,23	1,24
R22T	8,03	8,08	8,05	46,54	46,73	46,49	1,25	1,28	1,35	1,17	1,20	1,25
P1R	8,01	8,02	8,04	46,63	46,20	46,32	1,39	1,49	1,35	1,26	1,33	1,24
P2R	8,05	8,02	8,01	46,31	46,27	46,34	1,36	1,35	1,38	1,23	1,22	1,26
P3R	8,04	8,06	8,02	46,38	46,40	46,56	1,34	1,36	1,36	1,23	1,24	1,25
P4R	8,02	8,01	8,04	46,48	46,62	46,55	1,40	1,40	1,41	1,30	1,29	1,29
P5R	8,03	8,05	8,02	46,77	46,73	46,22	1,43	1,42	1,39	1,30	1,30	1,28
P6R	8,05	8,02	8,01	46,56	46,58	46,65	1,44	1,40	1,39	1,30	1,28	1,29
P7R	8,00	8,03	8,01	46,41	46,22	46,30	1,42	1,40	1,42	1,30	1,28	1,29
P8R	8,03	8,11	8,05	46,79	46,83	46,43	1,38	1,38	1,38	1,26	1,27	1,26
P9R	8,01	8,05	8,00	46,49	46,70	46,68	1,46	1,35	1,35	1,35	1,24	1,22
P10R	8,04	8,00	8,01	46,90	46,99	46,88	1,24	1,26	1,24	1,14	1,14	1,13
P11R	8,00	8,02	8,09	46,35	46,34	46,52	1,29	1,26	1,30	1,17	1,16	1,17
P12R	8,00	8,00	8,01	46,47	46,42	46,17	1,40	1,37	1,44	1,28	1,27	1,30
P13R	8,12	8,00	8,02	46,32	46,21	46,22	1,32	1,35	1,31	1,20	1,24	1,22
P14R	8,06	8,00	8,00	46,64	46,57	46,28	1,42	1,46	1,45	1,32	1,34	1,31
P15R	8,05	8,04	8,04	46,58	46,90	46,56	1,25	1,24	1,22	1,13	1,12	1,10
P16R	8,03	8,03	8,05	46,61	46,15	46,62	1,41	1,42	1,43	1,27	1,30	1,30
P17R	8,01	8,04	8,00	46,20	46,46	46,52	1,30	1,28	1,26	1,20	1,17	1,16
P18R	8,00	8,04	8,00	46,36	46,26	46,20	1,40	1,36	1,40	1,27	1,25	1,26
P19R	8,00	8,00	8,00	45,96	46,19	46,54	1,33	1,34	1,36	1,22	1,22	1,23
P20R	8,00	8,01	8,02	46,77	46,38	46,74	1,45	1,40	1,42	1,32	1,27	1,29
P21R	8,04	8,00	8,03	46,47	46,41	46,33	1,40	1,45	1,46	1,31	1,32	1,33
P22R	8,03	8,01	8,00	46,31	46,25	46,68	1,39	1,59	1,39	1,26	1,45	1,27
P1T	8,04	8,05	8,02	46,20	46,73	46,64	1,49	1,31	1,24	1,37	1,21	1,15
P2T	8,04	8,01	8,01	46,77	45,93	46,44	1,35	1,23	1,31	1,22	1,21	1,20
P3T	8,15	8,03	8,00	46,48	46,23	46,39	1,24	1,21	1,22	1,13	1,11	1,12
P4T	8,05	8,07	8,05	46,38	46,69	46,64	1,24	1,30	1,23	1,15	1,19	1,13
P5T	8,09	8,05	8,05	46,55	46,21	46,30	1,37	1,35	1,37	1,26	1,25	1,25
P6T	8,07	8,18	8,08	46,10	46,46	46,19	1,23	1,25	1,25	1,13	1,16	1,15
P7T	8,13	8,15	8,07	46,87	46,37	46,53	1,26	1,21	1,25	1,16	1,13	1,15
P8T	8,08	8,10	8,07	46,47	46,36	46,32	1,27	1,24	1,22	1,17	1,15	1,11
P9T	8,01	8,04	8,00	46,46	46,38	46,74	1,25	1,24	1,22	1,16	1,14	1,13
P10T	8,10	8,04	8,01	46,92	46,92	46,33	1,30	1,25	1,19	1,19	1,14	1,08
P11T	8,01	8,19	8,00	46,64	46,45	46,87	1,28	1,25	1,28	1,17	1,14	1,17
P12T	8,00	8,05	8,01	46,43	46,52	46,13	1,41	1,40	1,37	1,29	1,28	1,27
P13T	8,00	8,02	8,09	46,54	46,19	46,41	1,37	1,29	1,33	1,27	1,19	1,22
P14T	8,00	8,03	8,04	46,80	46,46	47,08	1,19	1,20	1,20	1,10	1,10	1,10
P15T	8,03	8,04	8,01	45,84	46,37	46,03	1,18	1,20	1,18	1,06	1,09	1,06
P16T	8,16	8,04	8,02	47,02	46,53	46,62	1,28	1,20	1,21	1,15	1,09	1,08

Cód.	D1	D2	D3	Prof.1	Prof.2	Prof.3	Ph1	Ph2	Ph3	P01	P02	P03
P17T	8,02	8,05	8,06	46,75	47,00	47,11	1,42	1,34	1,30	1,30	1,25	1,20
P18T	8,00	8,01	8,05	46,72	46,79	46,79	1,30	1,30	1,32	1,19	1,19	1,22
P19T	8,01	8,00	8,00	47,03	47,04	46,47	1,26	1,25	1,22	1,17	1,16	1,13
P20T	8,07	8,02	8,03	46,73	46,36	46,72	1,29	1,25	1,30	1,18	1,15	1,21
P21T	8,05	8,04	8,07	46,72	46,70	46,49	1,25	1,22	1,25	1,17	1,14	1,16
P22T	8,10	8,10	8,02	46,07	46,78	46,15	1,36	1,50	1,15	1,23	1,41	1,06
S1R	8,05	8,03	8,02	46,30	47,30	46,59	1,33	1,23	1,25	1,23	1,14	1,17
S2R	8,07	8,06	8,04	47,03	46,62	47,16	1,24	1,24	1,25	1,14	1,16	1,16
S3R	8,02	8,06	8,02	46,63	46,75	46,26	1,38	1,36	1,37	1,28	1,25	1,27
S4R	8,10	8,02	8,03	46,60	46,55	46,69	1,40	1,45	1,47	1,30	1,35	1,38
S5R	8,04	8,07	8,04	46,16	46,69	46,74	1,36	1,37	1,36	1,28	1,27	1,28
S6R	8,14	8,10	8,11	46,60	46,62	46,90	1,28	1,33	1,30	1,19	1,25	1,23
S7R	8,00	8,01	8,03	47,24	46,13	46,35	1,59	1,53	1,51	1,48	1,42	1,40
S8R	8,02	8,01	8,08	46,48	46,39	46,83	1,60	1,58	1,55	1,42	1,40	1,41
S9R	8,00	8,06	8,04	46,21	46,85	46,94	1,61	1,61	1,62	1,45	1,45	1,46
S10R	8,08	8,02	8,09	46,55	47,17	46,88	1,48	1,44	1,48	1,38	1,36	1,38
S11R	8,08	8,04	8,03	46,29	46,56	46,45	1,32	1,40	1,35	1,22	1,32	1,26
S12R	8,09	8,02	8,05	46,45	46,43	46,17	1,40	1,39	1,38	1,30	1,31	1,30
S13R	8,05	8,04	8,08	46,31	46,52	46,67	1,70	1,74	2,04	1,52	1,51	1,75
S14R	8,04	8,09	8,12	48,84	46,62	46,69	1,32	1,33	1,33	1,23	1,23	1,22
S15R	8,35	8,02	8,12	46,71	47,03	46,74	1,37	1,36	1,39	1,26	1,26	1,29
S16R	8,05	8,08	8,11	46,66	47,19	46,70	1,38	1,37	1,38	1,29	1,27	1,28
S17R	8,12	8,05	8,18	46,18	46,74	46,24	1,33	1,33	1,34	1,24	1,25	1,25
S18R	8,25	8,20	8,05	47,21	47,47	46,92	1,19	1,18	1,15	1,12	1,10	1,07
S19R	8,10	8,03	8,15	46,50	46,81	46,61	1,15	1,12	1,13	1,08	1,05	1,05
S20R	8,01	8,05	8,01	46,24	46,31	46,56	1,32	1,36	1,38	1,21	1,26	1,29
S21R	8,13	8,14	8,11	46,38	46,43	46,49	1,12	1,16	1,17	1,04	1,08	1,08
S1T	8,03	8,00	8,06	46,88	46,43	46,61	1,27	1,27	1,24	1,18	1,18	1,15
S2T	8,30	8,02	8,32	47,40	47,86	46,63	1,30	1,21	1,25	1,20	1,13	1,18
S3T	8,03	8,04	8,03	47,12	46,86	46,40	1,30	1,29	1,27	1,23	1,20	1,20
S4T	8,00	8,04	8,03	46,83	46,99	46,94	1,30	1,30	1,32	1,19	1,20	1,22
S5T	8,04	8,04	8,06	46,07	46,96	46,84	1,19	1,20	1,23	1,12	1,12	1,15
S6T	8,02	8,02	8,04	46,45	46,77	46,48	1,31	1,31	1,28	1,22	1,21	1,20
S7T	8,09	8,01	8,06	47,02	36,36	46,77	1,34	1,30	1,32	1,26	1,22	1,22
S8T	8,05	8,05	8,06	46,16	46,59	46,54	1,40	1,44	1,39	1,27	1,32	1,29
S9T	8,02	8,06	8,03	46,24	46,43	49,25	1,44	1,39	1,32	1,30	1,27	1,23
S10T	8,04	8,05	8,11	46,15	46,23	46,91	1,57	1,56	1,70	1,41	1,39	1,50
S11T	8,03	8,03	8,03	46,23	46,62	46,57	1,61	1,57	1,53	1,46	1,43	1,40
S14T	8,02	8,04	8,06	46,94	46,52	46,88	1,38	1,34	1,33	1,27	1,24	1,24
S15T	8,05	8,01	8,07	45,99	46,66	46,78	1,57	1,36	1,37	1,46	1,28	1,28
S16T	8,02	8,01	8,05	46,39	46,67	47,06	1,41	1,39	1,40	1,31	1,31	1,30

Cód.	D1	D2	D3	Prof. 1	Prof. 2	Prof. 3	Ph1	Ph2	Ph3	P01	P02	P03
S17T	8,02	8,03	8,03	46,53	46,63	46,46	1,34	1,34	1,34	1,25	1,24	1,24
S18T	8,03	8,01	8,00	46,17	46,65	46,91	1,35	1,35	1,37	1,25	1,27	1,29
S19T	8,01	8,11	8,08	46,43	45,94	46,19	1,33	1,34	1,34	1,25	1,25	1,26
S20T	8,00	8,02	8,02	46,87	46,55	46,85	1,51	1,43	1,41	1,39	1,34	1,30
S21T	8,04	8,06	8,04	46,39	46,72	46,37	1,40	1,41	1,40	1,30	1,32	1,31
N1R	8,03	8,03	8,05	46,69	46,46	46,51	2,23	2,48	2,32	1,93	2,10	1,98
N2R	8,02	8,03	8,05	46,46	46,70	46,72	2,52	2,34	2,47	2,19	1,98	2,10
N3R	8,00	8,05	8,04	46,46	46,40	46,48	1,90	2,00	2,29	1,69	1,75	1,99
N4R	8,03	8,03	8,06	46,68	46,22	46,64	1,95	1,98	1,86	1,76	1,78	1,68
N5R	8,05	8,08	8,00	46,32	46,29	46,31	1,49	1,64	1,70	1,39	1,49	1,53
N6R	8,09	8,04	8,05	46,30	46,51	46,37	1,52	1,53	1,52	1,39	1,42	1,42
N7R	8,06	8,07	8,08	46,48	46,56	46,68	1,60	1,56	1,55	1,47	1,42	1,42
N9R	8,02	8,00	8,06	46,52	46,81	46,42	1,74	1,80	1,84	1,62	1,68	1,72
N10R	8,05	8,07	8,02	46,40	45,86	46,07	1,67	1,65	1,75	1,55	1,54	1,65
N11R	8,05	8,02	8,00	46,61	46,90	46,35	1,71	1,72	1,74	1,58	1,59	1,64
N12R	8,01	8,01	8,01	46,03	46,59	46,67	1,57	1,60	1,63	1,47	1,48	1,51
N13R	8,00	8,00	8,00	46,41	46,07	46,54	1,54	1,53	1,54	1,43	1,43	1,43
N14R	8,01	8,05	8,01	46,41	46,39	46,93	1,70	1,60	1,73	1,56	1,47	1,59
N15R	8,04	8,00	8,01	46,13	46,00	46,44	1,61	1,61	1,61	1,50	1,49	1,50
N16R	8,08	8,04	8,03	46,75	46,24	46,81	1,30	1,33	1,32	1,21	1,23	1,22
N17R	8,20	8,12	8,05	46,77	46,51	46,65	1,28	1,27	1,30	1,17	1,17	1,21
N18R	8,03	8,08	8,12	46,38	46,42	46,53	1,50	1,38	1,31	1,37	1,29	1,24
N19R	8,12	8,14	8,05	46,44	46,46	46,48	1,23	1,19	1,26	1,14	1,11	1,17
N20R	8,01	8,13	8,04	46,10	46,49	46,67	1,36	1,23	1,23	1,23	1,14	1,15
N21R	8,00	8,01	8,01	46,40	46,51	46,24	1,55	1,58	1,58	1,43	1,45	1,46
N22R	8,00	8,00	8,04	46,09	46,31	45,91	1,52	1,52	1,53	1,40	1,40	1,42
N1T	8,01	8,04	8,03	46,85	46,66	46,60	1,85	1,81	1,85	1,64	1,62	1,65
N2T	8,06	8,01	8,08	46,41	46,84	46,36	2,02	2,14	1,97	1,83	1,91	1,78
N4T	8,01	8,05	8,04	46,52	46,32	46,37	1,49	1,52	1,51	1,37	1,39	1,39
N5T	8,05	8,02	8,02	46,13	46,67	46,57	1,77	1,92	2,07	1,59	1,68	1,80
N6T	8,05	8,02	8,02	46,50	46,75	46,47	1,77	1,73	1,69	1,66	1,60	1,56
N7T	8,02	8,00	8,02	46,16	46,14	45,46	1,69	1,70	1,67	1,58	1,58	1,56
N8T	8,06	8,00	8,01	46,21	46,44	46,23	1,84	1,79	1,74	1,62	1,57	1,55
N9T	8,00	8,04	8,03	46,30	446,44	45,75	1,76	1,77	1,67	1,58	1,62	1,56
N10T	8,10	8,01	8,02	46,46	46,65	45,52	1,59	1,57	1,62	1,48	1,45	1,50
N11T	8,05	8,11	8,04	46,34	46,52	46,64	1,38	1,38	1,40	1,29	1,29	1,30
N12T	8,06	8,11	8,05	46,09	46,43	46,29	1,34	1,38	1,38	1,25	1,29	1,26
N13T	8,03	8,02	8,01	46,58	46,46	46,15	1,87	1,93	1,97	1,63	1,67	1,74
N14T	8,02	8,02	8,04	46,39	46,34	46,36	1,64	1,58	1,55	1,54	1,44	1,45
N15T	8,00	8,03	8,01	46,19	46,31	46,18	1,77	1,79	1,80	1,65	1,68	1,69
N16T	8,00	8,00	8,01	46,44	46,46	46,25	1,74	1,74	1,73	1,63	1,63	1,62

Cód.	D1	D2	D3	Prof. 1	Prof. 2	Prof. 3	Ph1	Ph2	Ph3	P01	P02	P03
N17T	8,03	8,13	8,05	46,69	46,43	46,46	1,48	1,31	1,26	1,31	1,21	1,16
N18T	8,09	8,03	8,03	46,46	46,48	46,69	1,70	1,79	1,68	1,53	1,59	1,52
N19T	8,01	8,01	8,00	46,35	46,48	46,38	1,64	1,66	1,64	1,51	1,52	1,51
N20T	8,00	8,05	8,06	46,44	46,57	46,57	1,48	1,47	1,50	1,38	1,38	1,40
N21T	8,01	8,00	8,03	46,20	46,31	46,35	1,68	1,68	1,63	1,56	1,56	1,52
N22T	8,00	8,01	8,01	46,18	46,31	46,52	1,71	1,68	1,68	1,58	1,56	1,55



ANEXO III: TABLAS DE DATOS DE LOS ENSAYOS DE LA TERCERA FASE

Cód.	Esp.	Ph	L	A	B	Dir.	DPTR	LPTR	PPTR	DPTT	LPTT	PPTT
101	Cedro	382,71	200,58	90,69	60,25	radial	9,71	51,11	1,31	9,19	50,99	1,25
102	Cedro	382,19	200,16	90,77	60,48	radial	9,55	51,07	1,29	9,38	50,57	1,19
103	Cedro	386,55	200,35	90,48	60,09	radial	9,60	50,97	1,24	9,59	50,97	1,34
104	Cedro	388,02	200,33	90,66	60,48	radial	9,53	50,90	1,34	9,65	50,77	1,25
105	Cedro	385,25	200,28	90,56	60,33	radial	9,63	50,94	1,27	9,84	50,89	1,31
106	Cedro	379,38	200,51	90,63	60,44	radial	9,63	50,86	1,30	9,63	50,84	1,28
107	Cedro	387,89	200,39	90,74	60,45	radial	9,69	44,80	1,19	9,61	50,81	1,29
108	Cedro	386,50	200,23	90,76	60,48	radial	9,55	51,21	1,32	9,29	50,88	1,26
109	Cedro	382,97	200,30	90,63	60,45	radial	9,80	50,77	1,32	9,56	50,89	1,28
110	Cedro	385,06	200,33	90,51	60,29	radial	9,52	50,90	1,26	9,57	50,87	1,35
111	Cedro	385,64	200,41	90,58	60,63	radial	9,57	50,71	1,30	9,59	50,67	1,32
112	Cedro	387,45	200,56	90,57	60,68	radial	9,63	51,22	1,36	9,56	50,91	1,32
113	Cedro	384,47	200,40	90,66	60,35	radial	9,83	50,93	1,39	9,83	51,00	1,30
114	Cedro	383,90	200,31	90,80	60,35	radial	9,81	50,80	1,29	9,70	50,80	1,35
115	Cedro	381,86	200,52	90,69	60,31	radial	9,67	51,02	1,24	9,75	50,81	1,36
116	Cedro	384,91	200,43	90,62	60,66	tangencial	9,90	50,82	1,32	9,77	51,08	1,29
117	Cedro	385,10	200,44	90,63	60,63	tangencial	9,75	50,81	1,31	9,82	50,99	1,37
118	Cedro	379,89	200,44	90,50	60,19	tangencial	9,75	50,94	1,34	9,84	51,19	1,35
119	Cedro	382,79	200,06	90,61	60,38	tangencial	9,74	50,79	1,35	9,98	51,01	1,44
120	Cedro	382,46	200,25	90,51	60,52	tangencial	9,68	50,78	1,31	9,79	50,75	1,25
121	Cedro	389,93	200,44	90,59	60,42	tangencial	9,79	51,11	1,36	9,84	50,48	1,36
122	Cedro	382,04	200,32	90,56	60,70	tangencial	9,81	50,53	1,29	9,93	50,85	1,28
123	Cedro	381,64	200,43	90,56	60,35	tangencial	9,59	51,02	1,31	9,81	50,84	1,29
124	Cedro	378,68	200,69	90,49	60,57	tangencial	9,78	50,49	1,29	9,88	50,75	1,26
125	Cedro	369,52	200,20	90,70	60,16	tangencial	9,80	50,81	1,28	9,82	50,64	1,31
126	Cedro	369,57	200,48	90,84	60,48	tangencial	9,78	50,48	1,29	9,74	50,64	1,27
127	Cedro	369,43	200,42	90,61	60,48	tangencial	9,72	49,65	1,23	9,70	50,69	1,24
128	Cedro	371,36	200,34	90,73	60,46	tangencial	9,76	50,69	1,31	9,70	50,69	1,30
129	Cedro	369,14	200,38	90,81	60,22	tangencial	9,91	50,89	1,28	9,87	50,77	1,33
130	Cedro	370,45	200,34	90,63	60,65	tangencial	9,68	50,76	1,26	9,80	50,95	1,31
201	Chopo	730,67	199,93	98,27	73,66	radial	10,04	51,22	2,01	10,04	50,81	2,05
202	Chopo	752,90	199,82	98,46	73,38	radial	9,98	51,22	2,12	9,99	51,09	2,22
203	Chopo	705,19	199,96	98,14	73,48	radial	9,98	51,07	2,09	10,02	51,10	2,06
204	Chopo	731,35	199,84	98,03	73,49	radial	9,84	51,01	2,04	9,98	51,03	2,02
205	Chopo	743,10	199,89	98,39	73,39	radial	10,01	50,96	1,98	10,02	50,79	2,12
206	Chopo	718,94	199,98	98,42	73,41	radial	9,88	51,01	2,00	9,96	51,06	2,02
207	Chopo	734,84	199,95	98,26	73,42	radial	9,90	51,07	2,01	9,96	51,40	2,13
208	Chopo	743,51	199,76	98,41	73,82	radial	9,90	51,03	2,01	10,00	50,94	2,10
209	Chopo	701,20	199,99	98,01	73,45	radial	9,98	51,07	1,98	9,96	51,06	1,95
210	Chopo	736,92	199,98	98,23	73,45	radial	9,95	51,15	2,02	10,00	51,24	2,08
211	Chopo	742,62	199,83	98,34	73,39	radial	10,01	51,18	2,08	10,04	51,23	2,14
212	Chopo	712,52	199,97	98,43	73,39	radial	9,98	50,99	1,99	10,02	50,96	2,00
213	Chopo	715,13	199,90	98,34	73,38	radial	9,97	51,23	2,02	9,93	51,16	2,04
214	Chopo	697,08	199,83	98,26	73,26	radial	10,00	51,11	2,96	10,00	51,27	2,00
215	Chopo	756,28	199,98	98,39	73,32	radial	10,00	51,07	2,18	9,86	50,73	2,03

Cód.	Esp.	Ph	L	A	B	Dir.	DPTR	LPTR	PPTR	DPTT	LPTT	PPTT
216	Chopo	728,77	199,96	98,63	73,46	tangencial	9,96	51,01	2,02	10,01	51,32	2,00
217	Chopo	749,19	199,96	98,50	73,36	tangencial	10,01	51,60	2,06	10,01	51,01	2,20
218	Chopo	706,06	199,98	98,35	73,23	tangencial	9,98	51,07	1,92	9,98	51,17	2,01
219	Chopo	756,03	199,98	98,44	73,41	tangencial	9,56	49,63	1,93	9,97	50,94	2,17
220	Chopo	730,83	199,76	98,30	73,46	tangencial	9,87	51,16	2,08	9,95	51,01	1,88
221	Chopo	735,82	199,86	98,34	73,50	tangencial	10,07	51,15	2,13	10,00	51,15	2,06
222	Chopo	750,28	199,92	98,53	73,39	tangencial	9,96	51,16	2,00	10,04	50,99	2,10
223	Chopo	730,62	199,79	98,56	73,43	tangencial	10,03	51,22	2,00	10,03	50,50	1,04
224	Chopo	714,06	199,96	98,62	73,42	tangencial	10,01	51,11	2,01	9,91	50,90	1,89
225	Chopo	725,15	199,94	98,31	73,66	tangencial	9,84	50,49	1,97	10,04	51,03	2,11
226	Chopo	695,49	199,83	98,21	73,37	tangencial	10,01	51,33	2,02	10,14	50,92	1,97
227	Chopo	702,78	199,95	98,53	73,44	tangencial	10,04	50,93	2,01	10,02	51,21	2,08
228	Chopo	727,00	199,98	98,54	73,49	tangencial	9,96	51,08	1,96	10,03	51,02	2,22
229	Chopo	728,71	199,80	98,36	73,11	tangencial	9,91	51,01	1,96	9,98	51,10	2,08
230	Chopo	741,27	199,78	98,15	73,77	tangencial	9,96	51,00	2,05	9,97	50,99	2,03
301	radiata	583,91	200,27	93,72	57,90	radial	10,02	51,34	2,10	10,00	51,03	2,11
302	radiata	560,27	200,35	93,70	59,85	radial	10,08	51,18	1,88	10,00	51,03	1,94
303	radiata	591,06	199,91	93,73	59,93	radial	9,96	51,44	2,19	10,00	51,19	2,30
304	radiata	540,19	200,42	93,53	59,85	radial	10,00	51,19	1,91	10,01	51,07	2,05
305	radiata	504,47	200,24	93,48	59,81	radial	9,95	50,92	1,69	9,97	51,22	1,59
306	radiata	518,24	200,92	93,53	59,81	radial	9,99	51,04	1,74	9,98	51,13	1,80
307	radiata	524,84	200,30	93,33	59,88	radial	10,01	51,25	1,88	9,91	51,25	1,69
308	radiata	541,41	200,39	93,47	59,87	radial	10,02	51,25	2,02	10,02	44,00	2,03
309	radiata	581,41	200,29	93,72	57,92	radial	10,05	51,05	2,15	10,03	51,36	2,16
310	radiata	561,20	199,99	93,65	57,93	radial	9,92	51,47	2,00	9,99	51,00	1,88
311	radiata	538,97	200,29	93,61	59,84	radial	10,04	51,46	1,95	10,01	50,98	1,93
312	radiata	541,31	200,32	93,54	59,85	radial	10,00	51,03	1,87	9,94	51,01	1,85
313	radiata	519,49	200,54	93,58	59,84	radial	10,00	51,14	1,87	10,04	50,97	1,80
314	radiata	548,33	200,53	93,61	59,81	radial	10,00	51,38	1,83	9,93	51,18	2,00
315	radiata	578,11	200,23	93,65	57,00	radial	9,94	51,17	2,03	9,96	51,36	1,88
316	radiata	479,08	200,33	93,57	59,97	tangencial	9,84	51,10	1,64	9,88	50,92	1,61
317	radiata	488,32	200,28	93,54	59,92	tangencial	9,89	51,31	1,71	9,79	51,26	1,60
318	radiata	485,74	200,24	93,59	59,95	tangencial	9,86	51,43	1,74	9,78	51,36	1,65
319	radiata	408,06	200,19	93,42	57,95	tangencial	9,81	51,01	1,43	9,84	50,84	1,57
320	radiata	463,56	200,32	93,61	59,85	tangencial	9,85	50,94	1,56	9,86	51,01	1,58
321	radiata	411,38	200,56	93,68	58,00	tangencial	9,71	51,18	1,43	9,61	51,04	1,42
322	radiata	531,75	200,26	93,59	58,04	tangencial	9,95	51,00	1,91	9,97	50,63	1,87
323	radiata	529,38	200,24	93,51	57,87	tangencial	9,93	50,98	1,94	9,95	51,06	1,86
324	radiata	568,26	200,26	93,55	57,72	tangencial	9,95	50,74	2,06	9,91	50,84	2,06
325	radiata	552,86	200,34	93,59	57,91	tangencial	9,89	51,44	2,06	9,96	51,04	1,98
326	radiata	512,87	200,26	93,59	58,03	tangencial	9,89	51,09	1,92	9,90	50,99	1,70
327	radiata	509,49	200,38	93,42	57,84	tangencial	9,95	50,73	1,83	9,96	50,11	1,77
328	radiata	521,06	200,36	93,47	57,85	tangencial	9,98	51,11	1,85	9,91	51,10	1,92
329	radiata	544,59	200,34	93,47	57,84	tangencial	9,78	51,03	1,90	9,87	51,15	2,14
330	radiata	501,31	196,57	93,37	57,88	tangencial	9,95	51,15	2,03	9,95	50,98	1,81
401	pinaster	737,35	199,35	87,56	65,92	radial	10,00	51,00	2,70	9,93	50,81	2,52
402	pinaster	553,52	199,46	88,16	65,01	radial	9,88	50,95	1,81	9,98	50,85	1,74
403	pinaster	681,32	199,56	87,24	65,64	radial	9,97	50,57	2,48	9,98	51,11	2,56
404	pinaster	698,37	199,48	87,55	68,83	radial	9,97	51,11	2,62	10,03	50,97	2,61

Cód.	Esp.	Ph	L	A	B	Dir.	DPTR	LPTR	PPTR	DPTT	LPTT	PPTT
405	pinaster	662,93	199,43	87,65	65,63	radial	9,99	51,14	2,36	9,98	51,18	2,34
406	pinaster	663,43	199,34	87,49	65,79	radial	10,00	50,78	2,42	10,01	51,02	2,40
407	pinaster	554,70	199,31	88,29	65,98	radial	10,05	50,94	2,06	9,97	50,73	1,95
408	pinaster	637,38	199,54	87,54	65,61	radial	10,00	51,08	2,27	9,97	50,65	2,25
409	pinaster	550,64	199,67	88,22	65,89	radial	10,03	51,18	1,86	9,99	50,73	1,84
410	pinaster	582,42	199,77	87,81	65,98	radial	9,93	51,24	1,94	9,90	50,93	1,95
411	pinaster	630,75	199,29	87,63	65,69	radial	10,00	50,91	2,29	10,00	50,76	2,26
412	pinaster	585,32	199,66	87,95	66,05	radial	9,96	50,90	1,83	9,91	50,96	1,86
413	pinaster	572,20	199,78	87,75	65,85	radial	10,05	51,13	2,09	10,01	50,98	1,91
414	pinaster	604,94	199,46	88,00	66,06	radial	10,01	50,85	1,91	9,97	50,85	1,99
415	pinaster	691,23	199,32	87,76	66,02	radial	9,95	50,63	2,44	10,01	51,23	2,60
416	pinaster	567,94	199,83	86,82	65,58	tangencial	9,99	50,87	2,00	10,01	50,90	2,03
417	pinaster	529,89	199,30	88,37	65,85	tangencial	9,92	50,95	1,94	10,00	50,70	2,11
418	pinaster	665,47	199,68	87,41	65,58	tangencial	10,02	51,11	2,28	10,01	50,82	2,40
419	pinaster	655,03	199,53	88,33	65,87	tangencial	10,01	51,21	2,40	10,01	50,63	2,35
420	pinaster	589,95	199,37	88,21	65,99	tangencial	9,96	50,73	1,95	9,98	50,67	1,90
421	pinaster	650,56	199,29	87,16	65,78	tangencial	10,00	51,01	2,28	9,98	51,18	2,33
422	pinaster	646,45	199,39	87,38	65,85	tangencial	10,04	50,91	2,31	10,00	50,54	2,31
423	pinaster	1051,56	199,62	87,31	65,76	tangencial	10,03	50,69	3,26	10,02	50,91	3,18
424	pinaster	1004,43	199,27	87,49	65,88	tangencial	10,04	51,14	3,19	10,00	50,96	3,42
425	pinaster	729,80	199,69	87,26	65,93	tangencial	9,99	50,47	2,13	10,02	51,14	2,52
426	pinaster	646,75	199,40	87,55	65,62	tangencial	10,01	50,89	2,32	10,00	50,80	2,22
427	pinaster	621,30	199,43	87,92	66,01	tangencial	9,92	50,46	2,27	9,94	51,03	2,08
428	pinaster	521,66	199,54	88,14	66,02	tangencial	9,95	50,71	1,23	9,98	50,85	1,82
429	pinaster	657,31	199,42	88,03	65,84	tangencial	9,98	51,13	2,39	10,01	50,46	2,42
430	pinaster	651,52	199,50	87,93	65,73	tangencial	10,16	51,20	2,38	9,93	50,75	2,31
501	silvestre	823,70	200,35	94,85	69,49	radial	9,97	50,81	2,67	9,94	50,74	2,59
502	silvestre	763,50	200,32	90,84	71,20	radial	10,01	50,72	2,31	9,94	50,95	2,12
503	silvestre	743,80	200,35	93,86	69,60	radial	9,97	50,69	2,40	10,04	50,57	2,44
504	silvestre	794,80	200,32	95,50	69,57	radial	10,01	50,52	2,46	10,00	50,31	2,47
505	silvestre	846,30	200,48	94,84	69,74	radial	9,99	50,61	2,61	9,98	50,79	2,50
506	silvestre	836,50	200,36	95,39	69,67	radial	9,95	50,38	2,51	10,01	50,83	2,64
507	silvestre	768,20	200,09	95,34	69,75	radial	9,97	50,19	2,39	9,99	50,78	2,52
508	silvestre	825,50	200,43	94,94	69,94	radial	10,00	50,77	2,45	9,97	50,94	2,56
509	silvestre	796,90	200,25	95,30	69,60	radial	10,00	50,97	2,62	9,92	50,74	2,98
510	silvestre	727,40	200,04	95,32	71,45	radial	9,97	50,57	2,25	9,99	51,04	2,37
511	silvestre	812,40	200,09	94,65	69,62	radial	9,94	51,01	2,32	9,98	51,07	2,66
512	silvestre	736,70	200,71	94,62	69,51	radial	10,00	50,77	2,33	10,00	50,69	2,38
513	silvestre	762,70	200,65	94,92	71,52	radial	9,98	50,49	2,28	10,00	50,74	2,25
514	silvestre	736,40	200,33	95,01	71,46	radial	10,02	50,90	2,32	9,97	50,77	2,12
515	silvestre	760,60	200,42	94,65	69,68	radial	9,92	50,71	2,40	9,98	50,71	2,39
516	silvestre	704,60	200,33	94,33	69,51	tangencial	9,96	50,78	2,09	9,99	50,61	2,01
517	silvestre	711,00	200,24	94,62	69,59	tangencial	9,97	51,00	2,05	9,97	50,79	1,94
518	silvestre	758,50	200,64	94,50	69,74	tangencial	9,95	50,31	2,71	9,97	50,80	3,04
519	silvestre	719,40	199,86	94,77	71,58	tangencial	9,99	50,87	2,04	9,91	50,59	1,95
520	silvestre	716,90	200,40	95,01	71,36	tangencial	9,96	50,75	2,06	9,94	50,55	1,93
521	silvestre	727,60	200,00	95,52	71,72	tangencial	10,00	50,66	2,20	9,84	50,75	2,09
522	silvestre	811,00	200,38	94,49	69,68	tangencial	10,01	50,46	2,39	9,99	51,04	2,58
523	silvestre	692,90	200,02	90,88	71,66	tangencial	9,98	50,43	2,20	10,01	50,68	2,10

Cód.	Esp.	Ph	L	A	B	Dir.	DPTR	LPTR	PPTR	DPTT	LPTT	PPTT
524	silvestre	826,30	200,35	94,38	69,26	tangencial	10,04	50,70	2,68	10,00	50,81	3,11
525	silvestre	717,00	200,23	95,03	69,46	tangencial	9,98	50,37	2,00	9,97	50,67	1,86
526	silvestre	688,10	200,43	90,64	71,81	tangencial	9,95	50,85	2,16	10,00	50,16	2,09
527	silvestre	759,30	200,21	94,48	69,17	tangencial	10,00	50,71	2,24	10,00	50,70	2,23
528	silvestre	759,30	200,34	94,43	69,38	tangencial	9,97	50,49	2,10	10,01	50,32	2,11
529	silvestre	730,10	200,54	95,14	71,40	tangencial	10,00	50,44	2,10	10,04	50,26	2,12
530	silvestre	762,50	200,39	94,44	69,28	tangencial	10,04	50,20	2,18	10,00	50,43	2,22
601	laricio	588,10	199,22	87,85	66,00	radial	9,91	51,23	2,02	9,64	50,87	2,05
602	laricio	610,05	199,64	87,50	65,83	radial	9,97	51,09	2,18	10,00	51,40	2,29
603	laricio	520,22	199,58	87,26	65,61	radial	9,98	51,17	2,11	9,96	50,64	1,80
604	laricio	699,37	199,52	87,48	65,73	radial	9,96	51,06	2,48	10,01	50,74	2,47
605	laricio	673,14	199,26	86,30	65,73	radial	10,02	50,91	2,36	9,98	50,66	2,28
606	laricio	699,84	199,72	87,20	65,84	radial	10,00	50,95	2,83	10,03	50,91	2,67
607	laricio	501,14	199,51	87,69	65,36	radial	9,99	51,03	1,70	9,93	50,78	1,74
608	laricio	575,07	199,88	88,39	65,79	radial	10,00	50,93	1,99	10,09	50,50	2,05
609	laricio	627,05	199,53	87,60	65,83	radial	9,94	50,77	2,24	9,96	50,70	2,12
610	laricio	805,13	199,69	86,94	65,88	radial	10,01	51,05	2,90	10,01	50,75	2,84
611	laricio	608,23	199,19	86,80	65,62	radial	9,98	50,67	2,05	10,04	51,03	2,12
612	laricio	650,12	199,38	87,33	65,73	radial	10,01	50,50	2,30	9,97	50,46	2,37
613	laricio	810,20	199,49	87,17	65,80	radial	9,90	50,70	2,93	10,01	50,70	3,25
614	laricio	742,02	199,68	87,47	65,84	radial	10,01	50,86	2,55	9,99	50,87	2,65
615	laricio	637,42	199,45	87,14	65,82	radial	10,03	50,02	2,32	9,99	51,12	2,90
616	laricio	649,24	199,59	87,41	65,84	tangencial	9,98	50,88	2,52	10,01	51,17	2,28
617	laricio	759,11	199,67	86,97	68,00	tangencial	10,06	51,41	3,52	9,98	50,73	2,47
618	laricio	650,33	199,66	86,93	65,97	tangencial	10,03	50,83	2,36	10,00	51,13	2,36
619	laricio	695,36	199,39	86,21	65,97	tangencial	10,00	50,91	2,51	9,98	50,98	2,49
620	laricio	768,29	199,39	87,50	65,71	tangencial	9,98	50,80	2,79	10,00	50,93	2,76
621	laricio	633,82	199,36	87,89	66,09	tangencial	9,97	51,08	2,42	10,03	50,89	2,22
622	laricio	702,26	199,49	87,42	65,94	tangencial	10,00	50,79	2,53	10,01	50,55	2,47
623	laricio	630,82	199,71	87,40	65,81	tangencial	10,03	50,98	2,30	9,97	50,84	2,25
624	laricio	667,50	200,04	87,15	65,80	tangencial	10,01	51,43	2,47	9,99	50,71	2,45
625	laricio	584,15	200,10	88,70	65,61	tangencial	10,01	51,03	2,16	10,05	50,84	2,04
626	laricio	814,62	199,69	87,02	65,81	tangencial	9,97	50,77	2,85	10,01	50,80	2,91
627	laricio	785,71	199,41	87,01	65,98	tangencial	10,01	51,12	2,80	10,00	51,05	2,81
628	laricio	707,00	199,62	87,24	65,97	tangencial	10,02	50,80	2,61	10,00	50,38	2,52
629	laricio	707,10	199,90	86,80	65,91	tangencial	10,00	50,78	2,46	10,03	50,97	2,49
630	laricio	668,68	199,43	87,54	67,89	tangencial	10,03	50,77	2,46	10,00	50,58	2,58
701	castaño	980,56	200,29	101,54	75,35	radial	10,03	50,71	2,44	9,99	50,98	2,58
702	castaño	988,95	195,38	101,37	75,07	radial	9,96	50,94	3,10	9,99	50,86	2,79
703	castaño	1034,42	200,37	101,57	75,50	radial	9,94	50,59	2,61	9,92	50,93	2,61
704	castaño	984,10	200,22	101,36	75,41	radial	10,04	50,88	2,39	10,04	50,99	2,54
705	castaño	802,29	200,25	100,93	67,81	radial	10,02	50,70	2,21	9,98	50,95	2,31
706	castaño	1016,56	200,17	101,11	75,36	radial	10,05	50,84	2,84	10,03	50,84	2,80
707	castaño	800,67	200,23	101,56	60,26	radial	10,07	50,84	2,77	9,97	50,99	2,74
708	castaño	945,99	200,22	101,71	75,38	radial	10,08	50,82	2,54	9,99	50,94	2,52
709	castaño	722,91	200,26	101,46	65,12	radial	9,86	50,80	2,02	9,88	50,98	2,12
710	castaño	718,56	200,21	91,12	60,03	radial	10,00	50,90	2,57	9,93	51,00	2,64
711	castaño	782,55	200,34	101,76	60,02	radial	10,00	51,07	2,59	10,01	51,17	2,70
712	castaño	715,45	200,30	101,48	66,25	radial	9,72	50,72	2,00	9,84	50,80	2,12

Cód.	Esp.	Ph	L	A	B	Dir.	DPTR	LPTR	PPTR	DPTT	LPTT	PPTT
713	castaño	722,28	199,99	101,78	66,39	radial	9,76	51,26	2,18	9,86	51,00	2,12
714	castaño	720,25	200,28	91,05	60,33	radial	9,99	50,83	2,60	10,00	50,39	2,65
715	castaño	781,22	199,73	101,91	59,95	radial	9,92	50,73	2,51	10,00	50,54	2,60
716	castaño	829,31	200,41	101,49	66,53	tangencial	9,96	50,95	2,52	9,92	54,75	2,53
717	castaño	837,39	200,20	101,49	66,73	tangencial	10,00	50,84	2,43	9,92	50,57	2,72
718	castaño	854,69	200,33	101,39	63,88	tangencial	9,87	51,17	4,63	9,97	50,47	2,64
719	castaño	829,62	200,41	101,46	64,08	tangencial	10,02	50,89	2,54	10,01	50,68	2,46
720	castaño	803,73	200,00	91,51	67,22	tangencial	10,00	51,10	2,66	9,90	51,97	2,72
721	castaño	906,46	200,40	101,69	66,62	tangencial	9,90	50,84	2,73	10,03	50,56	2,86
722	castaño	683,75	200,32	101,38	59,97	tangencial	9,99	51,00	2,25	9,99	50,70	2,30
723	castaño	732,33	200,07	101,13	66,69	tangencial	9,95	50,95	2,27	9,86	50,91	2,19
724	castaño	837,41	200,30	101,38	66,59	tangencial	9,95	50,66	2,48	9,69	50,84	2,34
725	castaño	783,86	200,33	91,36	66,52	tangencial	9,92	50,94	2,60	9,93	50,59	2,60
726	castaño	713,42	200,17	101,13	64,04	tangencial	9,95	50,89	2,22	9,93	50,65	2,27
727	castaño	710,33	199,57	101,35	63,98	tangencial	9,96	50,98	2,24	10,01	50,95	2,28
728	castaño	788,90	200,36	91,30	66,59	tangencial	9,89	50,77	2,64	10,03	50,98	2,62
729	castaño	686,87	200,32	101,37	60,03	tangencial	10,03	51,02	2,38	10,00	50,92	2,19
730	castaño	737,35	199,96	101,24	64,10	tangencial	10,01	51,07	2,75	10,01	51,01	2,33
801	roble	883,69	200,23	93,69	68,07	radial	10,02	51,12	2,91	10,04	50,87	3,02
802	roble	883,79	199,76	96,06	68,08	radial	10,01	50,99	2,66	10,03	50,86	2,91
803	roble	837,33	200,37	91,28	68,15	radial	10,04	50,99	2,66	10,02	50,78	2,85
804	roble	795,20	200,36	91,58	68,08	radial	10,06	51,13	2,71	10,01	50,77	2,71
805	roble	882,04	200,30	96,06	68,10	radial	10,00	50,98	2,65	9,99	50,84	2,72
806	roble	873,74	199,99	96,08	68,00	radial	10,00	51,15	2,64	10,03	50,93	2,79
807	roble	800,11	199,99	91,60	68,01	radial	9,99	51,08	2,56	9,99	50,89	2,69
808	roble	819,32	200,24	91,30	67,92	radial	10,02	50,82	2,78	9,99	50,77	2,57
809	roble	748,35	200,33	85,41	68,05	radial	10,00	50,80	2,71	10,05	50,92	2,66
810	roble	747,83	199,93	85,58	68,12	radial	10,02	50,83	2,76	10,05	50,68	2,64
811	roble	825,59	199,68	91,10	67,96	radial	10,04	50,92	2,67	10,02	50,93	2,85
812	roble	871,71	200,53	93,63	67,98	radial	10,02	51,04	2,90	10,01	50,88	2,88
813	roble	852,15	199,73	93,60	68,07	radial	10,02	50,90	2,53	10,03	50,73	2,81
814	roble	773,92	200,37	85,61	67,99	radial	10,00	51,02	2,68	10,03	51,03	2,80
815	roble	764,28	200,43	85,57	68,01	radial	10,05	50,78	2,75	10,04	50,99	2,86
816	roble	933,71	199,79	101,43	68,94	tangencial	9,97	50,59	2,73	9,96	50,98	2,78
817	roble	982,37	199,99	101,60	68,98	tangencial	9,96	50,80	2,76	9,97	50,67	2,87
818	roble	930,58	199,36	102,07	68,91	tangencial	9,94	51,04	2,66	9,99	50,84	2,78
819	roble	961,35	199,96	101,75	68,98	tangencial	9,92	51,12	2,74	9,92	50,73	2,83
820	roble	941,33	199,46	101,67	68,94	tangencial	9,98	50,88	2,66	9,94	50,90	2,72
821	roble	999,69	199,41	101,85	70,06	tangencial	9,96	50,88	2,84	9,94	50,82	2,88
822	roble	1012,80	200,05	101,39	70,00	tangencial	9,90	50,89	2,87	9,99	50,77	2,85
823	roble	953,82	200,41	101,56	68,86	tangencial	10,01	50,96	2,76	10,00	50,89	2,72
824	roble	1020,20	200,05	102,06	69,93	tangencial	9,99	50,79	2,93	10,03	50,66	3,00
825	roble	981,19	199,95	101,99	70,01	tangencial	9,93	50,92	2,83	10,00	50,84	2,90
826	roble	999,19	200,31	101,41	69,21	tangencial	9,97	50,80	2,97	9,98	51,00	3,16
827	roble	997,50	200,10	106,64	70,04	tangencial	9,94	50,70	2,87	9,98	50,18	2,86
828	roble	960,21	199,90	105,73	69,36	tangencial	9,97	50,95	2,91	10,01	51,05	2,87
829	roble	967,40	200,02	106,06	68,94	tangencial	10,01	50,84	2,90	10,03	50,99	2,88
830	roble	814,78	200,93	96,37	67,93	tangencial	10,03	51,08	2,65	10,03	50,91	2,64
901	iroko	956,37	199,59	101,14	73,32	radial	10,00	51,36	2,73	10,00	51,30	2,61

Cód.	Esp.	Ph	L	A	B	Dir.	DPTR	LPTR	PPTR	DPTT	LPTT	PPTT
902	iroko	923,87	199,81	98,00	73,40	radial	10,01	51,22	2,71	10,01	51,14	2,67
903	iroko	833,87	199,37	98,01	73,49	radial	10,05	50,94	2,40	9,97	51,18	2,38
904	iroko	871,95	199,85	98,12	73,49	radial	9,98	51,07	2,51	10,02	51,05	2,48
905	iroko	927,37	199,84	98,29	73,52	radial	10,03	51,11	2,56	9,98	50,93	2,74
906	iroko	967,77	199,81	101,04	73,47	radial	10,03	51,11	2,77	9,98	51,11	2,90
907	iroko	857,80	200,01	97,41	73,28	radial	9,96	50,84	2,43	10,01	50,99	2,49
908	iroko	971,85	199,38	101,15	73,55	radial	10,00	51,27	2,76	10,01	50,87	2,83
909	iroko	927,90	199,62	98,52	73,73	radial	10,08	51,03	2,76	9,99	51,17	2,61
910	iroko	953,90	199,80	101,15	73,59	radial	9,98	51,02	2,54	10,00	51,00	2,78
911	iroko	850,52	199,43	101,30	73,43	radial	10,00	51,02	2,44	10,00	51,10	2,45
912	iroko	979,43	199,96	101,18	73,45	radial	9,98	51,09	2,79	9,98	51,22	2,73
913	iroko	973,53	199,60	101,60	73,45	radial	9,98	50,87	2,73	10,02	51,23	2,69
914	iroko	975,17	199,59	101,10	73,45	radial	10,03	50,95	2,74	10,02	51,08	2,68
915	iroko	1014,75	199,57	101,29	73,51	radial	10,01	50,91	2,87	10,02	51,23	2,88
916	iroko	886,09	200,07	98,76	73,45	tangencial	10,01	51,00	2,51	10,01	51,09	2,37
917	iroko	875,65	199,68	101,72	73,39	tangencial	10,03	51,18	2,41	10,02	51,02	2,33
918	iroko	901,26	199,47	101,45	73,43	tangencial	10,02	51,24	2,49	10,01	51,00	2,39
919	iroko	870,88	199,50	98,44	73,38	tangencial	9,99	51,23	2,48	10,03	50,61	2,42
920	iroko	889,36	199,90	101,30	73,50	tangencial	10,02	50,84	2,44	10,00	50,85	2,44
921	iroko	859,20	199,84	101,36	73,34	tangencial	10,00	51,39	2,40	10,00	51,25	2,32
922	iroko	877,97	199,43	98,71	73,37	tangencial	9,99	50,73	2,58	10,02	50,85	2,43
923	iroko	879,19	199,76	98,60	73,44	tangencial	10,00	51,12	2,46	10,01	50,89	2,33
924	iroko	870,65	199,73	101,49	73,46	tangencial	10,00	51,15	2,45	10,04	51,17	2,35
925	iroko	846,10	199,65	101,19	73,45	tangencial	10,01	51,17	2,29	9,99	51,10	2,36
926	iroko	922,01	199,68	101,50	73,48	tangencial	10,03	51,00	2,41	9,99	51,27	2,45
927	iroko	849,98	199,23	101,50	73,38	tangencial	9,95	51,12	2,32	10,05	51,32	2,30
928	iroko	917,09	199,64	101,57	73,43	tangencial	9,93	51,13	2,54	10,03	51,14	2,49
929	iroko	917,05	199,54	100,86	73,40	tangencial	10,00	50,94	2,50	9,93	50,96	2,42
930	iroko	875,43	199,88	98,74	73,47	tangencial	9,99	50,78	2,47	10,00	50,85	2,45
1001	elondo	971,10	199,88	71,88	68,60	radial	9,99	50,47	4,06	9,97	50,63	3,97
1002	elondo	978,70	199,77	72,70	68,71	radial	9,98	50,48	3,95	10,05	50,61	3,97
1003	elondo	955,10	199,92	71,99	68,74	radial	10,03	51,05	3,91	10,00	51,07	4,07
1004	elondo	967,50	199,93	71,81	68,77	radial	10,01	50,67	3,96	10,03	50,53	4,05
1005	elondo	966,30	199,85	71,81	68,62	radial	10,00	50,56	3,93	10,11	50,77	4,01
1006	elondo	964,90	199,97	71,86	68,61	radial	10,05	50,67	4,04	10,01	50,58	3,99
1007	elondo	957,40	199,99	71,88	68,69	radial	10,04	50,71	4,02	10,07	50,64	3,96
1008	elondo	956,60	199,98	71,91	68,30	radial	10,07	50,85	4,02	10,03	50,51	3,98
1009	elondo	965,00	199,78	71,74	68,43	radial	10,08	50,34	3,99	10,01	50,90	4,13
1010	elondo	960,80	199,94	71,78	68,67	radial	10,03	50,47	3,96	10,07	50,43	3,96
1011	elondo	973,10	199,94	71,94	68,70	radial	10,04	50,64	4,06	10,04	51,05	4,10
1012	elondo	953,80	199,96	71,74	68,29	radial	10,02	50,57	4,01	10,08	51,04	4,02
1013	elondo	969,80	199,97	71,76	68,85	radial	10,04	50,27	4,11	10,12	51,03	4,05
1014	elondo	968,20	199,97	72,10	68,64	radial	10,05	51,27	3,98	10,09	51,34	4,12
1015	elondo	953,50	199,97	72,33	68,40	radial	10,00	50,19	4,00	9,99	50,60	3,98
1016	elondo	962,50	199,82	71,71	68,53	tangencial	9,91	50,47	3,40	9,99	50,62	3,97
1017	elondo	961,00	199,92	71,81	68,70	tangencial	9,97	50,65	4,02	9,98	51,00	4,00
1018	elondo	954,60	200,00	71,81	68,17	tangencial	10,03	50,56	3,98	10,04	50,41	3,98
1019	elondo	946,90	199,91	71,78	68,77	tangencial	10,00	50,70	3,84	10,05	50,56	3,97
1020	elondo	970,30	199,93	71,88	68,81	tangencial	10,01	50,32	4,05	10,00	50,50	4,07

Cód.	Esp.	Ph	L	A	B	Dir.	DPTR	LPTR	PPTR	DPTT	LPTT	PPTT
1021	elondo	968,00	199,90	71,65	68,92	tangencial	10,05	50,83	4,05	10,00	50,63	4,01
1022	elondo	976,20	199,99	71,84	68,87	tangencial	9,98	50,53	4,02	10,02	50,70	4,04
1023	elondo	977,80	200,05	71,70	68,76	tangencial	10,00	50,20	4,04	10,01	51,35	4,11
1024	elondo	967,30	200,01	71,77	68,63	tangencial	10,02	50,99	4,07	10,02	50,73	4,06
1025	elondo	954,20	199,91	72,57	69,89	tangencial	10,00	50,38	3,75	10,04	50,57	3,78
1026	elondo	967,00	199,99	72,32	69,45	tangencial	9,95	50,41	3,88	10,02	50,87	3,88
1027	elondo	964,10	200,11	72,43	69,65	tangencial	9,93	50,21	3,84	10,03	50,94	3,94
1028	elondo	971,50	199,99	71,76	68,72	tangencial	10,03	50,53	4,04	10,05	50,94	4,10
1029	elondo	967,40	199,87	71,74	68,69	tangencial	10,00	50,93	4,09	10,03	50,73	3,99
1030	elondo	962,90	199,87	72,45	69,71	tangencial	10,00	50,95	3,91	10,03	50,82	3,87



Cód.	D4R	Prof.4R	Ph4R	D4T	Prof.4T	P4T	D5	Prof.5	P5	MATR	MATT	PNR	PNT
101	8,55	48,69	1,08	8,54	48,76	1,05	7,51	66,09	1,16	0,82	1,04	18,0	21,0
102	8,55	49,41	1,06	8,45	48,84	1,12	7,47	64,67	1,14	0,92	0,90	20,0	19,0
103	8,32	47,46	1,08	8,58	48,49	1,13	7,67	64,95	1,16	0,72	1,03	18,0	18,0
104	8,55	49,13	1,10	8,58	48,88	1,10	7,43	64,88	1,13	0,74	0,92	20,0	20,0
105	8,53	48,63	1,06	8,80	48,86	1,12	7,28	64,90	1,17	0,92	0,81	21,0	17,0
106	8,75	48,63	1,09	8,67	48,87	1,08	7,41	65,10	1,14	0,97	0,79	22,0	23,0
107	8,64	48,86	1,09	8,58	48,63	1,09	7,45	66,12	1,14	0,95	0,90	18,0	17,0
108	8,25	48,80	1,05	8,69	48,82	1,11	7,36	65,42	1,15	0,70	0,99	15,0	18,0
109	8,83	48,94	1,08	8,67	48,72	1,08	7,33	64,97	1,12	0,83	0,93	22,0	20,0
110	8,52	48,60	1,05	8,58	48,89	1,09	7,44	65,11	1,12	1,03	0,94	21,0	20,0
111	8,50	49,03	1,00	8,68	48,94	1,10	7,75	64,92	1,18	0,86	1,01	16,0	19,0
112	8,50	48,93	1,08	8,56	48,78	1,10	7,70	65,55	1,11	1,00	0,87	17,0	18,0
113	8,56	48,71	1,07	8,58	48,76	1,08	7,44	65,10	1,15	0,83	0,89	19,0	19,0
114	8,42	48,70	0,87	8,59	49,01	1,16	7,44	65,13	1,12	0,92	1,02	21,0	18,0
115	8,49	48,82	1,04	8,68	48,82	1,16	7,37	64,95	1,17	1,02	0,84	21,0	18,0
116	8,58	48,79	1,08	8,68	49,19	1,16	7,39	65,12	1,19	0,94	0,82	20,0	19,0
117	8,46	48,86	1,10	8,31	49,03	1,12	7,33	64,89	1,16	0,91	0,86	19,0	15,0
118	8,56	48,80	1,03	8,63	48,98	1,12	7,53	65,50	1,13	1,01	0,87	20,0	19,0
119	8,21	48,98	1,06	8,41	49,11	1,12	7,26	64,85	1,18	0,79	0,83	20,0	19,0
120	8,34	48,94	1,09	8,49	48,81	1,11	7,80	64,85	1,28	0,96	0,81	19,0	17,0
121	8,58	48,58	1,09	8,57	48,53	1,06	7,32	65,56	1,21	0,96	0,94	18,0	17,5
122	8,47	48,76	1,04	8,56	48,67	1,10	7,44	65,45	1,20	0,89	0,77	20,0	17,5
123	8,55	48,67	1,11	8,40	48,51	1,10	7,35	65,22	1,18	0,85	0,84	19,0	20,0
124	8,63	48,70	1,06	8,65	49,07	1,10	7,60	65,30	1,21	0,84	0,77	21,0	16,0
125	8,65	48,71	1,07	8,37	48,65	1,06	7,20	65,36	1,20	0,99	0,99	14,0	15,0
126	8,65	48,68	1,10	8,45	48,63	1,04	7,42	65,35	1,13	0,99	0,91	14,0	17,0
127	8,55	48,77	1,08	8,79	48,65	1,08	7,94	65,36	1,10	0,83	0,73	21,0	17,0
128	8,61	48,51	1,09	8,45	48,37	1,06	7,77	65,60	1,12	0,69	0,93	18,0	19,0
129	8,63	48,53	1,06	8,59	48,56	1,14	7,50	65,65	1,22	1,00	0,94	16,5	15,0
130	8,59	48,46	1,05	8,59	48,54	1,09	7,72	65,73	1,16	0,89	0,88	22,0	17,0
201	8,23	47,23	1,40	8,18	47,12	1,35	7,27	65,14	1,49	1,51	1,20	12,0	10,0
202	8,22	47,83	1,43	8,31	47,87	1,41	7,30	64,90	1,60	1,50	1,37	9,0	8,0
203	8,21	47,81	1,43	8,20	47,49	1,47	7,16	65,33	1,46	1,41	1,46	9,0	8,0
204	8,28	47,35	1,39	8,33	47,56	1,44	7,32	65,07	1,53	1,59	1,07	9,0	8,0
205	8,25	47,51	1,44	8,16	47,13	1,46	7,25	64,70	1,67	1,10	1,63	10,0	8,0
206	8,22	48,03	1,41	8,25	47,36	1,41	7,13	64,92	1,44	1,65	1,62	7,0	8,0
207	8,18	47,26	1,38	8,35	47,55	1,45	7,14	64,66	1,54	1,36	0,91	8,0	9,0
208	8,23	47,69	1,42	8,25	47,58	1,42	7,13	64,69	1,50	1,34	1,73	9,0	8,0
209	8,26	47,52	1,36	8,26	47,93	1,36	7,20	64,81	1,47	1,56	1,57	10,0	9,0
210	8,21	47,65	1,43	8,23	47,59	1,59	7,21	64,84	1,57	1,10	1,32	11,0	9,0
211	8,22	47,98	1,42	8,24	47,71	1,43	7,21	64,96	1,58	1,31	1,28	8,0	8,0
212	8,23	47,49	1,41	8,22	47,74	1,43	7,10	64,76	1,46	1,05	1,76	9,0	8,0
213	8,25	47,55	1,41	8,33	47,79	1,41	7,19	64,45	1,52	1,29	1,31	10,0	9,0
214	8,24	47,66	1,37	8,35	47,74	1,40	7,30	64,60	1,38	1,79	1,75	10,0	10,0
215	8,19	47,59	1,49	8,22	47,73	1,46	7,10	64,88	1,57	1,88	1,40	8,0	10,0
216	8,25	47,76	1,56	8,23	47,82	1,47	7,21	64,89	1,61	1,43	1,20	10,0	10,0
217	8,23	47,79	1,44	8,25	47,98	1,37	7,18	64,85	1,52	1,34	1,21	9,0	7,0
218	8,39	47,67	1,38	8,30	47,47	1,37	7,35	64,70	1,50	1,52	1,20	10,0	9,0
219	8,10	47,75	1,41	8,19	47,49	1,52	7,22	64,70	1,53	1,53	1,90	9,0	7,0

Cód.	D4R	Prof.4R	Ph4R	D4T	Prof.4T	P4T	D5	Prof.5	P5	MATR	MATT	PNR	PNT
220	8,23	47,88	1,43	8,34	47,97	1,46	7,16	64,99	1,44	1,61	2,01	8,0	10,0
221	8,31	47,45	1,42	8,31	48,30	1,53	7,44	65,16	1,58	1,18	0,88	10,0	7,0
222	8,20	47,35	1,40	8,23	47,62	1,52	7,10	64,98	1,62	1,80	1,52	7,0	7,0
223	8,17	47,86	1,46	8,24	47,16	1,49	7,20	64,94	1,63	1,29	1,20	11,0	9,0
224	8,20	47,94	1,35	8,28	47,98	1,41	7,17	65,21	1,50	1,52	1,16	9,0	9,0
225	8,18	48,20	1,38	8,24	47,27	1,52	7,16	65,07	1,51	1,36	1,52	10,0	9,0
226	8,41	47,89	1,38	8,41	47,49	1,38	7,39	65,02	1,41	1,41	1,08	10,0	10,0
227	8,31	47,62	1,39	8,26	47,47	1,47	7,20	65,03	1,60	1,60	1,27	8,0	9,0
228	8,31	47,52	1,39	8,39	48,00	1,38	7,19	65,45	1,44	1,54	1,68	8,0	10,0
229	8,25	47,55	1,45	8,29	47,45	1,50	7,15	64,78	1,57	1,59	1,68	9,0	9,0
230	8,23	48,08	1,43	8,24	47,89	1,44	7,10	65,05	1,48	1,29	1,08	9,0	7,0
301	8,26	47,92	1,51	8,32	47,46	1,47	7,38	64,57	1,57	2,37	1,89	8,0	8,0
302	8,23	47,77	1,41	8,23	47,50	1,26	7,26	64,81	1,53	2,21	2,39	8,0	9,0
303	8,29	47,94	1,42	8,43	47,43	1,34	7,15	64,99	1,57	2,56	2,45	7,0	8,0
304	8,18	47,85	1,45	8,23	47,86	1,34	7,30	65,09	1,72	1,73	2,46	12,0	9,0
305	8,22	47,94	1,38	8,49	47,92	1,24	7,50	65,02	1,39	1,33	1,70	9,0	10,0
306	8,51	47,88	1,30	8,20	47,57	1,44	7,62	65,03	1,57	1,15	1,42	11,0	10,0
307	8,25	48,13	1,33	8,25	48,30	1,51	7,23	65,13	1,47	1,34	1,68	11,0	9,0
308	8,22	47,96	1,50	8,22	47,75	1,60	7,56	65,53	1,89	1,66	1,98	12,0	9,0
309	8,20	48,01	1,53	8,20	48,15	1,64	7,15	65,15	1,65	2,55	2,50	8,0	7,0
310	8,24	47,95	1,39	8,32	47,82	1,38	7,23	65,03	1,52	2,74	1,00	6,0	11,0
311	8,20	47,60	1,31	8,40	48,05	1,34	7,14	64,88	1,50	1,94	1,81	8,0	9,0
312	8,31	48,03	1,40	8,27	48,26	1,32	7,53	65,13	1,63	1,75	1,59	9,0	10,0
313	8,23	48,06	1,34	8,27	47,94	1,31	7,37	64,97	1,44	1,34	1,20	12,0	10,0
314	8,15	48,19	1,37	8,40	48,09	1,44	7,24	65,03	1,58	2,02	2,62	9,0	8,0
315	8,24	48,22	1,53	8,24	47,80	1,37	7,33	64,99	1,54	2,17	1,75	7,0	10,0
316	8,31	47,75	1,25	8,45	48,26	1,26	7,20	65,42	1,38	1,49	1,62	11,0	13,0
317	8,34	48,10	1,27	8,22	48,01	1,24	7,32	65,09	1,29	1,33	1,41	10,0	14,0
318	8,15	47,98	1,30	8,34	47,95	1,22	7,25	64,96	1,35	1,80	0,98	12,0	12,0
319	8,23	48,00	1,11	8,39	48,01	1,05	7,25	65,20	1,16	1,00	1,30	18,0	15,0
320	8,30	48,08	1,25	8,21	48,21	1,26	7,17	65,02	1,34	1,26	1,18	15,0	14,0
321	8,30	48,24	1,14	8,29	48,09	1,12	7,20	65,29	1,27	1,15	1,50	14,0	16,0
322	8,17	47,82	1,54	8,23	48,03	1,38	7,25	65,09	1,56	2,03	2,27	11,0	9,0
323	8,18	47,78	1,40	8,30	47,98	1,39	7,21	65,12	1,51	1,86	2,54	11,0	7,0
324	8,15	48,03	1,44	8,34	48,86	1,38	7,23	65,25	1,56	2,10	2,30	11,0	6,0
325	8,18	47,97	1,44	8,21	47,80	1,41	7,28	65,10	1,50	2,48	2,96	10,0	7,0
326	8,21	48,20	1,46	8,50	47,76	1,28	7,15	65,09	1,54	1,33	1,77	8,0	10,0
327	8,30	47,75	1,35	8,29	47,99	1,28	7,18	65,14	1,49	2,05	1,62	11,0	10,0
328	8,23	48,08	1,22	8,41	47,72	1,44	7,25	65,00	1,47	1,88	1,75	11,0	8,0
329	8,30	47,85	1,31	8,42	47,90	1,52	7,30	65,08	1,64	1,64	1,48	11,0	6,0
330	8,34	47,94	1,39	8,45	48,56	1,30	7,13	64,90	1,38	1,56	1,97	11,0	8,0
401	8,14	47,22	1,62	8,13	47,08	1,63	7,16	65,51	1,94	1,42	1,62	14,0	13,0
402	8,43	47,85	1,24	8,19	47,78	1,25	7,25	65,08	1,43	1,21	1,27	11,0	12,0
403	8,14	47,55	1,60	8,21	47,44	1,64	7,30	64,99	1,75	2,07	2,31	8,0	8,0
404	8,12	47,60	1,65	8,21	47,58	1,67	7,15	65,46	1,78	2,39	2,75	9,0	7,0
405	8,23	47,53	1,57	8,18	47,55	1,53	7,25	65,16	1,70	1,95	1,90	10,0	11,0
406	8,15	47,32	1,57	8,18	47,34	1,54	7,27	65,09	1,70	1,99	1,76	9,0	11,0
407	8,18	47,46	1,38	8,20	47,85	1,39	7,24	66,17	1,54	1,47	2,26	15,0	12,0
408	8,16	47,41	1,51	8,25	47,35	1,52	7,10	64,67	1,70	1,81	1,96	12,0	9,0

Cód.	D4R	Prof.4R	Ph4R	D4T	Prof.4T	P4T	D5	Prof.5	P5	MATR	MATT	PNR	PNT
409	8,20	47,88	1,29	8,20	47,78	1,28	7,22	65,39	1,48	2,11	2,15	10,0	12,0
410	8,15	47,86	1,36	8,18	48,00	1,39	7,12	65,16	1,51	1,18	1,43	8,0	12,0
411	8,18	47,71	1,52	8,17	47,66	1,54	7,12	65,06	1,69	1,89	1,98	10,0	10,0
412	8,26	47,36	1,47	8,31	47,34	1,49	7,16	65,27	1,64	1,52	1,56	10,0	11,0
413	8,11	47,43	1,44	8,14	47,59	1,33	7,22	64,79	1,61	1,60	1,00	13,0	16,0
414	8,29	48,15	1,46	8,18	47,64	1,42	7,19	65,11	1,70	1,16	1,24	13,0	15,0
415	8,14	47,40	1,63	8,11	47,60	1,70	7,16	65,28	1,77	1,89	2,16	8,0	8,0
416	8,23	47,71	1,31	8,15	47,53	1,37	7,30	64,54	1,56	1,55	1,70	11,0	12,0
417	8,24	47,28	1,33	8,20	47,95	1,33	7,17	65,44	1,43	1,06	1,90	11,0	10,0
418	8,13	47,72	1,52	8,21	47,73	1,56	7,29	65,10	1,74	1,81	2,15	9,0	10,0
419	8,13	47,32	1,56	8,12	47,81	1,62	7,28	65,13	1,75	2,38	1,88	8,0	9,0
420	8,14	47,96	1,40	8,34	48,39	1,38	7,66	65,42	1,44	1,45	0,98	9,0	11,0
421	8,13	47,54	1,54	8,09	47,45	1,54	7,15	65,17	1,71	1,97	2,06	10,0	10,0
422	8,21	47,51	1,42	8,17	47,73	1,54	7,45	65,07	1,73	1,34	1,75	10,0	10,0
423	8,11	47,75	2,06	8,13	47,59	2,22	7,37	65,33	2,57	2,40	1,62	14,0	13,0
424	8,11	47,38	1,84	8,13	47,50	1,97	7,30	65,33	2,23	1,90	1,52	11,0	11,0
425	8,20	47,74	1,38	8,10	47,34	1,45	7,14	65,05	1,62	1,97	1,79	9,0	12,0
426	8,13	47,60	1,55	8,14	47,42	1,53	7,20	65,13	1,72	2,18	1,69	9,0	11,0
427	8,19	47,40	2,42	8,27	47,49	2,28	7,40	65,28	2,26	1,96	0,86	6,0	14,0
428	8,30	47,70	1,23	8,23	47,69	1,45	7,22	65,38	1,47	1,16	1,62	15,0	13,0
429	8,13	47,29	1,50	8,22	47,58	1,46	7,14	65,25	1,76	1,93	1,54	10,0	9,0
430	8,12	47,50	1,52	8,14	47,20	1,61	7,11	65,18	1,72	1,61	1,76	9,0	9,0
501	8,05	47,89	1,65	8,16	48,08	1,68	7,11	65,65	1,83	1,74	1,44	9,0	13,0
502	8,26	48,13	1,44	8,30	48,17	1,44	7,12	65,79	1,61	1,62	2,06	9,0	7,0
503	8,14	47,96	1,60	8,13	47,68	1,58	7,50	65,19	1,72	1,65	1,12	11,0	10,0
504	8,10	48,11	1,58	8,16	47,69	1,62	7,16	65,64	1,68	1,38	1,39	11,0	10,0
505	8,14	47,71	1,81	8,26	47,21	1,67	7,29	65,74	1,98	1,86	1,48	9,0	12,0
506	8,26	47,05	1,72	8,18	47,88	1,72	7,14	65,28	1,86	1,77	1,61	9,0	11,0
507	8,13	47,69	1,58	8,20	48,00	1,59	7,20	65,09	1,74	1,64	1,21	10,0	13,0
508	8,11	47,20	1,61	8,28	47,23	1,67	7,08	64,76	1,73	1,78	1,10	9,0	15,0
509	8,23	47,58	1,59	8,20	48,02	1,56	7,09	65,26	1,67	2,21	1,30	9,0	12,0
510	8,20	47,81	1,57	8,15	47,67	1,56	7,40	65,52	1,59	1,39	1,18	9,0	13,0
511	8,57	47,58	1,63	8,17	47,40	1,67	7,29	65,53	1,75	1,40	1,65	11,0	12,0
512	8,13	47,96	1,52	8,17	47,44	1,63	7,25	65,52	1,65	1,53	1,46	10,0	11,0
513	8,17	47,25	1,65	8,19	47,77	1,64	7,20	65,05	1,69	1,34	1,21	11,0	14,0
514	8,24	47,35	1,51	8,23	47,78	1,46	7,14	65,54	1,65	1,08	0,98	10,0	17,0
515	8,19	47,30	1,53	8,20	47,40	1,53	7,16	65,66	1,66	1,62	1,20	10,0	13,0
516	8,39	47,39	1,40	8,30	47,44	1,34	7,24	65,73	1,66	1,21	0,99	12,0	14,0
517	8,17	48,03	1,44	8,35	47,67	1,41	7,13	65,36	1,62	1,39	1,17	14,0	20,0
518	8,22	48,07	1,43	8,25	47,80	1,42	7,30	64,81	1,60	1,21	1,20	14,0	15,0
519	8,22	48,04	1,46	8,22	47,58	1,33	7,20	64,90	1,52	1,49	0,92	13,0	18,0
520	8,26	48,50	1,41	8,23	47,94	1,38	7,45	65,93	1,53	1,38	1,31	13,0	16,0
521	8,18	48,19	1,43	8,20	47,84	1,43	7,29	66,22	1,59	1,36	1,31	11,0	13,0
522	8,14	48,26	1,64	8,14	47,93	1,57	7,23	65,02	1,76	1,69	1,36	10,0	14,0
523	8,16	47,82	1,41	8,11	47,86	1,45	7,61	64,85	1,59	1,14	1,34	11,0	13,0
524	8,16	48,26	1,22	8,32	47,98	1,55	7,22	65,26	1,77	1,85	1,20	10,0	13,0
525	8,16	47,58	1,47	8,13	47,38	1,90	7,19	65,34	1,52	1,29	0,97	12,0	19,0
526	8,13	47,69	1,44	8,15	47,85	1,35	7,11	66,81	1,53	1,35	1,06	12,0	13,0
527	8,14	47,86	1,51	8,17	47,44	1,54	7,12	65,05	1,66	1,38	0,94	10,0	15,0

Cód.	D4R	Prof.4R	Ph4R	D4T	Prof.4T	P4T	D5	Prof.5	P5	MATR	MATT	PNR	PNT
528	8,27	47,98	1,69	8,15	47,77	1,95	7,34	65,17	1,73	1,33	0,96	12,0	14,0
529	8,25	48,00	1,40	8,23	47,70	1,42	7,16	64,86	1,57	1,34	1,22	11,0	13,0
530	8,16	47,96	1,49	8,17	47,94	1,43	7,46	65,20	1,73	1,41	1,11	8,0	15,0
601	8,20	48,50	1,41	8,23	48,13	1,42	7,13	64,92	1,51	1,24	1,51	11,0	13,0
602	8,24	48,03	1,53	8,27	47,79	1,55	7,20	64,66	1,74	0,97	1,28	13,0	13,0
603	8,26	48,02	1,21	8,40	48,35	1,24	7,24	65,01	1,34	0,74	0,78	15,0	16,0
604	8,17	48,06	1,73	8,20	47,74	1,63	7,11	64,96	1,77	1,36	2,28	9,0	9,0
605	8,17	48,44	1,63	8,20	48,50	1,57	7,17	65,04	1,86	1,46	1,63	8,0	12,0
606	8,17	47,86	1,64	8,14	47,57	1,66	7,15	64,87	1,77	1,43	1,90	10,0	9,0
607	8,30	47,95	1,22	8,23	47,88	1,27	7,33	65,38	1,51	0,75	0,80	12,0	14,0
608	8,30	47,86	1,38	8,13	48,12	1,39	7,12	65,18	1,47	1,20	1,29	10,0	15,0
609	8,30	47,80	1,68	8,15	48,08	1,49	7,13	65,04	1,58	1,35	1,54	12,0	15,0
610	8,13	47,87	1,86	8,14	47,35	1,88	7,17	65,00	2,08	2,39	2,90	6,0	10,0
611	8,23	47,75	1,45	8,29	47,63	1,43	7,19	65,41	1,60	0,82	0,89	10,0	15,0
612	8,19	47,79	1,50	8,14	47,64	1,60	7,12	65,42	1,77	1,52	1,46	13,0	8,0
613	8,21	47,06	1,71	8,13	47,91	1,80	7,18	65,42	2,01	2,17	1,98	7,0	10,0
614	8,29	47,69	1,83	8,18	47,99	1,89	7,15	65,36	2,40	1,32	1,52	9,0	8,0
615	8,23	48,26	1,49	8,13	47,93	1,57	7,22	65,26	1,78	1,20	1,15	10,0	14,0
616	8,23	47,70	1,49	8,36	47,75	1,51	7,27	65,70	1,79	1,43	1,48	11,0	14,0
617	8,24	47,94	1,62	8,24	47,66	1,58	7,15	65,06	1,72	1,80	1,86	9,0	12,0
618	8,22	48,01	1,63	8,26	47,82	1,64	7,14	65,41	1,72	2,02	1,53	7,5	10,0
619	8,24	47,64	1,66	8,23	47,48	1,65	7,21	65,15	1,81	1,92	1,56	10,0	12,0
620	8,23	47,86	1,81	8,13	47,47	1,83	7,13	65,34	1,99	2,06	1,19	7,0	11,0
621	8,25	47,76	1,60	8,30	48,02	1,53	7,12	65,01	1,64	1,74	1,47	8,0	14,0
622	8,19	47,66	1,67	8,15	47,97	1,64	7,15	65,08	1,81	1,60	1,96	9,0	11,0
623	8,21	47,89	1,60	8,20	47,90	1,57	7,14	65,50	1,64	1,83	1,34	9,0	13,0
624	8,21	47,93	1,67	8,16	48,26	1,61	7,16	65,19	1,77	1,27	1,98	9,0	11,0
625	8,23	47,91	1,44	8,34	47,75	1,40	7,23	65,01	1,52	1,39	1,56	12,0	13,0
626	8,24	47,67	1,87	8,20	47,39	1,87	7,14	65,10	2,09	1,43	2,19	8,0	10,0
627	8,16	47,67	1,90	8,21	48,00	1,83	7,15	65,01	2,01	2,05	1,84	8,0	10,0
628	8,26	48,06	1,81	8,17	47,87	1,71	7,20	65,08	1,92	1,45	1,62	10,0	8,0
629	8,16	47,96	1,68	8,23	48,05	1,63	7,14	65,20	1,82	0,94	1,36	9,0	13,0
630	8,25	47,88	1,53	8,31	48,08	1,56	7,12	65,05	1,69	1,44	1,30	10,0	13,0
701	8,20	47,54	1,64	8,19	47,64	1,76	7,21	65,15	1,86	1,52	1,87	11,0	8,0
702	8,17	48,04	1,79	8,12	47,94	1,79	7,12	64,63	1,98	2,03	2,09	8,0	7,0
703	8,12	48,32	1,74	8,20	48,03	1,74	7,22	65,40	2,12	2,36	1,74	8,0	7,0
704	8,15	47,95	1,61	8,22	48,46	1,74	7,22	65,18	1,83	1,25	1,69	11,0	6,0
705	8,16	48,57	1,56	8,20	48,30	1,57	7,15	65,08	1,67	1,49	1,40	10,0	8,0
706	8,20	47,17	1,82	8,15	47,15	1,81	7,12	65,12	2,11	1,67	2,05	8,0	7,0
707	8,16	47,44	1,72	8,20	47,47	1,70	7,13	65,05	2,04	2,57	2,57	7,0	9,0
708	8,24	47,60	1,54	8,13	47,60	1,67	7,35	65,17	1,77	1,13	1,61	12,0	10,0
709	8,23	47,63	1,43	8,16	47,91	1,47	7,35	64,77	1,56	1,32	1,59	10,0	8,0
710	8,09	47,66	1,70	8,36	47,41	1,69	7,14	65,16	1,99	2,35	2,86	6,0	7,0
711	8,12	47,68	1,82	8,10	48,04	1,73	7,15	65,09	1,85	2,19	2,65	7,0	6,0
712	8,28	48,18	1,44	8,15	48,42	1,50	7,11	65,32	1,59	1,13	1,59	9,0	8,0
713	8,26	48,00	1,44	8,17	48,31	1,49	7,15	65,20	1,57	1,36	1,45	10,0	9,0
714	8,13	47,52	1,75	8,19	47,42	1,78	7,18	64,94	2,00	2,80	2,84	7,0	7,0
715	8,10	47,73	1,64	8,14	47,56	1,65	7,05	65,13	1,89	2,77	2,86	6,0	7,0
716	8,14	47,54	1,69	8,14	47,77	1,69	7,24	65,25	1,85	2,63	1,75	8,0	9,0

Cód.	D4R	Prof.4R	Ph4R	D4T	Prof.4T	P4T	D5	Prof.5	P5	MATR	MATT	PNR	PNT
717	8,24	48,14	1,67	8,24	48,14	1,67	7,25	65,29	1,85	1,63	1,98	7,0	8,0
718	8,23	47,43	1,79	8,18	48,80	1,87	7,21	65,13	2,02	1,93	2,59	8,0	6,0
719	8,22	48,01	1,74	8,15	48,18	1,70	7,16	65,17	1,83	1,59	1,74	8,0	8,0
720	8,23	47,41	1,73	8,13	47,67	1,74	7,06	65,06	1,89	1,60	2,08	9,0	6,0
721	8,16	47,44	1,78	8,16	47,75	1,75	7,20	64,92	2,13	2,78	1,55	6,0	7,0
722	8,27	47,24	1,49	8,09	48,80	1,65	7,23	64,96	1,74	1,56	1,60	11,0	9,0
723	8,21	47,28	1,50	8,34	47,54	1,49	7,21	65,19	1,66	1,84	1,56	9,0	9,0
724	8,25	47,26	1,67	8,23	48,28	1,74	7,26	65,10	1,75	1,46	1,86	8,0	9,0
725	8,18	47,32	1,70	8,24	47,41	1,76	7,14	65,47	1,98	1,63	1,86	9,0	7,0
726	8,25	47,37	1,49	8,17	47,52	1,53	7,14	65,47	1,56	1,31	1,30	9,0	8,0
727	8,18	47,32	1,49	8,18	47,58	1,52	7,19	65,22	1,61	1,53	1,40	10,0	9,0
728	8,13	48,33	1,75	8,20	47,65	1,73	7,17	65,22	1,92	1,77	1,83	7,0	8,0
729	8,23	47,56	1,53	8,23	47,31	1,47	7,18	65,09	1,63	1,29	1,09	10,0	11,0
730	8,16	47,96	1,53	8,19	47,86	1,50	7,12	65,26	1,69	1,46	1,54	10,0	9,0
801	8,23	47,90	1,77	8,19	48,00	1,87	7,14	65,26	2,03	1,69	1,92	10,0	9,0
802	8,31	48,11	1,82	8,23	47,80	1,94	7,20	65,25	1,99	1,65	1,72	10,0	7,0
803	8,21	47,60	1,71	8,21	47,96	1,86	7,17	65,05	1,92	1,44	1,62	12,0	10,0
804	8,21	47,59	1,83	8,30	47,97	1,83	7,11	65,48	2,01	1,98	1,63	9,0	8,0
805	8,21	47,68	1,77	8,14	47,92	1,82	7,30	65,21	2,08	1,64	1,67	10,0	9,0
806	8,23	47,83	1,74	8,26	47,54	1,84	7,13	65,11	1,91	1,66	1,98	11,0	8,0
807	8,17	47,97	1,72	8,22	47,78	1,86	7,18	65,95	1,88	1,47	1,86	11,0	8,0
808	8,19	47,38	1,81	8,23	47,95	1,71	7,12	65,15	1,98	1,54	1,68	9,0	10,5
809	8,22	48,19	1,81	8,15	47,96	1,75	7,26	65,20	1,98	2,07	1,79	9,0	10,0
810	8,15	48,06	1,81	8,16	47,93	1,79	7,19	65,15	2,07	2,30	1,63	10,0	10,0
811	8,16	48,65	1,85	8,23	47,82	1,86	7,29	65,26	2,05	1,80	1,76	9,0	8,0
812	8,22	48,81	1,95	8,18	49,01	1,89	7,14	65,22	2,05	2,67	1,72	8,0	9,0
813	8,16	47,77	1,70	8,15	48,18	1,83	7,19	64,90	1,98	1,58	1,94	12,0	9,0
814	8,17	47,66	1,80	8,21	47,75	1,84	7,21	65,07	1,97	1,75	1,48	10,0	9,0
815	8,17	47,88	1,82	8,17	47,97	1,87	7,23	65,10	1,98	1,96	1,94	8,0	7,0
816	8,19	47,86	1,79	8,25	47,70	1,84	7,15	65,24	2,00	2,47	2,47	8,0	8,0
817	8,20	47,89	1,92	8,24	47,91	2,04	7,16	65,37	2,12	2,52	2,26	6,0	6,0
818	8,16	47,86	1,81	8,12	48,90	1,91	7,06	65,18	2,05	2,47	1,96	7,0	6,0
819	8,20	47,35	1,86	8,18	47,89	1,93	7,13	65,16	2,08	2,64	2,22	7,0	6,0
820	8,25	48,33	1,83	8,21	47,95	1,88	7,22	65,05	1,98	2,24	2,07	7,0	7,0
821	8,21	47,63	1,99	8,19	47,99	1,98	7,23	65,27	2,19	2,52	2,31	6,0	6,0
822	8,20	47,57	1,96	8,18	47,68	1,90	7,15	65,29	2,18	2,23	2,37	6,0	5,0
823	8,25	47,74	1,83	8,20	47,86	1,90	7,09	65,54	2,04	2,00	2,03	8,0	6,0
824	8,17	47,95	1,96	8,22	47,71	1,92	7,14	65,32	2,12	2,61	2,49	6,0	5,0
825	8,19	47,82	1,91	8,14	48,00	1,94	7,14	65,21	2,13	2,32	2,44	7,0	5,0
826	8,24	48,32	1,89	8,19	47,80	1,93	7,15	65,45	2,13	2,14	2,20	7,0	6,0
827	8,18	47,47	1,89	8,10	48,30	1,93	7,20	65,17	2,16	2,67	2,53	7,0	6,0
828	8,14	47,65	1,90	8,15	48,79	1,92	7,19	65,08	2,09	2,18	1,89	6,0	6,0
829	8,10	47,71	1,92	8,17	48,00	1,95	7,15	65,14	2,11	1,92	1,94	8,0	6,0
830	8,24	47,90	1,75	8,14	48,03	1,78	7,25	65,40	1,98	1,97	1,76	9,0	10,0
901	8,15	47,24	1,70	8,22	47,11	1,58	7,26	65,29	1,93	2,37	2,57	7,0	7,0
902	8,27	47,19	1,70	8,24	46,76	1,52	7,17	65,93	1,98	2,21	2,07	7,0	7,0
903	8,31	47,01	1,51	8,19	47,37	1,46	7,25	65,28	1,77	2,00	1,33	8,0	10,0
904	8,26	46,66	1,52	8,25	47,02	1,47	7,19	65,25	1,80	1,72	2,09	7,0	8,0
905	8,20	46,97	1,52	8,31	46,71	1,60	7,39	65,25	1,85	1,67	2,07	7,0	8,0

Cód.	D4R	Prof.4R	Ph4R	D4T	Prof.4T	P4T	D5	Prof.5	P5	MATR	MATT	PNR	PNT
906	8,20	46,76	1,66	8,16	46,72	1,70	7,18	65,19	1,92	1,73	2,46	7,0	9,0
907	8,20	47,03	1,54	8,28	47,07	1,50	7,21	65,05	1,78	1,78	2,15	6,0	7,0
908	8,23	46,76	1,68	8,33	47,05	1,74	7,28	65,31	1,93	2,17	2,25	7,0	7,0
909	8,19	47,13	1,58	8,18	47,02	1,61	7,23	65,02	1,88	2,41	2,44	8,0	7,0
910	8,24	46,11	1,53	8,36	46,70	1,67	7,23	65,76	1,85	1,58	1,81	8,0	7,0
911	8,19	46,51	1,48	8,30	46,79	1,45	7,23	65,28	1,75	2,17	1,82	8,0	7,0
912	8,12	46,53	1,69	8,18	46,91	1,63	7,13	65,30	1,90	2,63	2,22	8,0	7,0
913	8,22	46,42	1,68	8,22	46,81	1,61	7,21	65,34	1,94	2,75	2,38	7,0	7,0
914	8,20	46,55	1,69	8,28	46,86	1,61	7,45	65,01	1,98	2,69	2,06	8,0	7,0
915	8,22	46,61	1,75	8,20	46,77	1,74	7,16	64,98	2,09	2,44	2,69	7,0	6,0
916	8,26	46,55	1,60	8,27	46,73	1,47	7,16	65,11	1,80	2,66	2,08	8,0	10,0
917	8,24	46,90	1,51	8,16	47,07	1,51	7,22	65,25	1,69	2,11	2,01	7,0	10,0
918	8,19	47,22	1,60	8,16	46,57	1,55	7,23	65,36	1,75	2,39	1,69	9,0	8,0
919	8,18	47,04	1,53	8,31	47,06	1,46	7,22	64,97	1,76	1,81	1,33	8,0	10,0
920	8,19	47,02	1,60	8,27	46,80	1,50	7,19	65,03	1,76	1,79	2,00	8,0	9,0
921	8,30	46,78	1,49	8,17	46,76	1,50	7,32	65,00	1,69	1,91	1,29	8,0	10,0
922	8,20	46,80	1,57	8,29	46,78	1,47	7,25	64,90	1,82	2,47	2,11	7,0	9,0
923	8,19	47,59	1,64	8,18	47,07	1,58	7,27	65,12	1,89	2,40	1,64	7,0	8,0
924	8,19	47,52	1,52	8,11	47,70	1,51	7,30	65,11	1,75	1,53	1,78	7,0	11,0
925	8,15	46,45	1,46	8,19	46,84	1,48	7,15	64,94	1,75	1,79	2,03	11,0	8,0
926	8,15	46,74	1,57	8,16	46,74	1,55	7,30	65,20	1,87	2,26	1,78	8,0	9,0
927	8,18	46,72	1,48	8,22	46,75	1,50	7,32	65,12	1,79	2,27	1,39	8,0	9,0
928	8,18	46,60	1,59	8,29	46,41	1,57	7,24	64,84	1,86	1,87	1,50	8,0	9,0
929	8,18	46,71	1,60	8,28	46,70	1,53	7,30	65,02	1,80	2,21	1,67	8,0	9,0
930	8,16	46,99	1,61	8,19	46,80	1,58	7,33	65,18	1,91	2,29	1,79	7,0	8,0
1001	8,06	47,32	2,40	8,08	47,19	2,48	7,05	66,25	2,91	4,07	4,00	5,0	4,0
1002	8,02	47,27	2,55	8,04	47,48	2,53	7,15	64,79	2,92	4,40	4,01	4,0	4,0
1003	8,08	47,60	2,49	8,14	47,23	2,51	7,17	66,61	2,91	4,40	4,04	5,0	5,0
1004	8,07	47,21	2,48	8,03	47,55	2,45	7,02	65,59	2,96	3,58	3,67	4,0	3,0
1005	8,03	47,27	2,48	8,06	47,48	2,52	7,04	65,25	2,87	3,87	3,64	5,0	5,0
1006	8,03	47,24	2,51	8,01	47,65	2,46	7,05	65,26	2,95	3,69	3,67	4,0	3,0
1007	8,02	47,27	2,41	8,03	47,21	2,41	7,04	65,03	2,84	2,82	3,69	4,0	5,0
1008	8,04	47,19	2,47	8,00	47,07	2,45	7,10	65,73	2,96	3,96	2,87	5,0	5,0
1009	8,04	47,25	2,51	8,10	47,21	2,51	7,14	65,95	2,92	3,64	5,04	4,0	4,0
1010	8,17	47,60	2,46	8,07	47,52	2,47	7,33	65,07	2,91	4,29	4,00	5,0	5,0
1011	8,02	47,28	2,54	8,02	47,30	2,52	7,15	64,69	2,88	4,16	4,21	4,0	4,0
1012	8,05	47,67	2,48	8,02	47,23	2,45	7,18	65,28	2,81	4,68	4,04	4,0	5,0
1013	8,02	47,14	2,49	8,05	47,24	2,49	7,09	64,97	2,86	4,58	3,95	4,0	4,0
1014	8,07	47,37	2,50	8,04	47,29	2,49	7,18	64,74	2,91	4,47	4,91	4,0	5,0
1015	8,10	47,53	2,47	8,06	47,24	2,43	7,11	64,75	2,86	4,80	4,01	4,0	5,0
1016	8,04	47,57	2,53	8,03	47,39	2,53	7,17	65,03	2,98	4,81	4,48	4,0	5,0
1017	8,04	47,10	2,46	8,06	47,51	2,45	7,12	65,14	2,88	5,07	4,55	4,0	4,0
1018	8,06	47,34	2,46	8,06	47,70	2,52	7,20	65,05	2,88	4,01	4,22	5,0	4,0
1019	8,06	47,22	2,41	8,05	47,50	2,48	7,23	65,06	2,86	3,95	4,17	4,0	5,0
1020	8,03	47,33	2,47	8,02	47,20	2,49	7,19	65,03	2,94	4,09	3,71	4,0	5,0
1021	8,04	47,36	2,52	8,06	47,48	2,51	7,09	65,05	2,84	3,64	3,47	5,0	4,0
1022	8,02	47,38	2,56	8,07	47,37	2,53	7,17	65,06	2,98	3,90	3,15	4,0	4,0
1023	8,03	47,57	2,54	8,02	47,50	2,52	7,30	65,70	3,04	3,66	3,94	4,0	4,0
1024	8,10	47,33	2,51	8,07	47,39	2,50	7,15	64,62	2,86	4,03	3,77	4,0	4,0

Cód.	D4R	Prof.4R	Ph4R	D4T	Prof.4T	P4T	D5	Prof.5	P5	MATR	MATT	PNR	PNT
1025	8,04	47,41	2,41	8,02	47,33	2,34	7,15	64,80	2,75	2,90	3,94	4,0	5,0
1026	8,05	47,53	2,46	8,03	47,27	2,38	7,12	64,69	2,44	2,89	3,65	4,0	5,0
1027	8,01	47,28	2,47	8,04	47,56	2,46	7,07	64,98	2,92	3,15	3,30	4,0	5,0
1028	8,15	47,34	2,50	8,09	47,68	2,48	7,19	65,18	2,94	4,35	3,69	4,0	4,0
1029	8,02	47,15	2,49	8,04	47,47	2,57	7,09	64,60	2,92	3,22	3,85	5,0	4,0
1030	8,02	47,43	2,45	8,06	47,28	2,38	7,18	64,10	2,48	3,26	4,06	5,0	5,0



ANEXO IV: TABLAS DE DATOS DE LOS ENSAYOS DE LA CUARTA FASE

Cód.	Esp.	HC	A	B	L	Ph	Pha	Phd	P0d
CE-01-05	Cedro	5	90,06	59,72	38,74	72,49	70,32	68,65	64,13
CE-02-05	Cedro	5	90,01	59,64	37,57	71,26	69,01	67,31	62,92
CE-03-05	Cedro	5	89,98	59,78	34,81	66,40	64,32	62,57	58,45
CE-04-05	Cedro	5	89,83	59,73	38,20	72,01	69,76	68,09	63,60
CE-05-05	Cedro	5	90,06	59,69	37,46	71,48	69,30	67,58	63,19
CE-06-05	Cedro	5	90,14	59,67	38,55	72,71	70,40	68,71	64,25
CE-07-10	Cedro	10	90,51	60,30	38,11	71,54	71,24	69,55	63,23
CE-08-10	Cedro	10	90,45	60,15	37,42	71,69	71,38	69,65	63,35
CE-09-10	Cedro	10	90,44	60,16	38,02	72,58	72,32	70,62	64,23
CE-10-10	Cedro	10	90,44	60,16	37,51	73,50	73,23	71,49	65,02
CE-11-10	Cedro	10	90,44	60,13	37,58	72,69	72,41	70,69	64,30
CE-12-10	Cedro	10	90,45	60,18	37,17	70,90	70,64	68,96	62,76
CE-13-15	Cedro	15	91,16	60,65	37,73	72,06	74,66	73,06	63,94
CE-14-15	Cedro	15	91,29	60,87	37,79	71,27	73,97	72,30	63,07
CE-15-15	Cedro	15	91,19	60,56	37,62	71,63	74,29	72,64	63,49
CE-16-15	Cedro	15	91,28	60,77	37,53	71,77	74,58	72,89	63,59
CE-17-15	Cedro	15	91,23	60,64	37,91	70,07	72,77	71,15	62,30
CE-18-15	Cedro	15	91,21	60,61	37,60	69,22	71,79	70,18	61,55
CE-19-20	Cedro	20	91,76	60,29	38,44	71,84	77,20	75,54	63,59
CE-20-20	Cedro	20	91,67	61,09	38,72	72,94	78,29	76,85	64,77
CE-21-20	Cedro	20	91,78	61,25	37,87	72,02	77,26	75,66	63,86
CE-22-20	Cedro	20	91,66	61,11	37,46	71,10	76,12	74,55	63,11
CE-23-20	Cedro	20	91,67	61,25	37,95	70,91	76,06	74,47	62,80
CE-24-20	Cedro	20	91,49	60,89	38,27	72,87	77,91	76,27	64,72
CE-25-25	Cedro	25	92,37	61,76	38,01	73,48	82,87	81,17	65,09
CE-26-25	Cedro	25	92,33	61,21	37,88	69,41	78,35	76,71	61,69
CE-27-25	Cedro	25	92,18	61,58	38,62	73,04	82,66	80,96	64,77
CE-28-25	Cedro	25	92,36	61,75	38,14	71,16	80,16	78,48	63,08
CE-29-25	Cedro	25	92,48	61,40	38,16	70,13	79,39	77,76	62,34
CE-30-25	Cedro	25	92,31	61,19	37,50	68,56	77,29	75,64	60,93
PL-01-05	laricio	5	85,63	64,91	38,62	111,08	106,05	103,73	97,15
PL-02-05	laricio	5	86,92	64,69	38,36	124,43	118,94	116,47	109,34
PL-03-05	laricio	5	87,63	65,11	38,36	114,50	109,53	107,11	100,23
PL-04-05	laricio	5	86,33	66,94	37,69	126,72	121,22	118,71	111,40
PL-05-05	laricio	5	86,14	64,82	38,86	141,93	135,47	132,45	124,32
PL-06-05	laricio	5	87,05	65,25	38,22	93,92	89,95	87,99	82,82
PL-07-10	laricio	10	88,37	65,38	38,06	107,48	106,74	104,46	94,70
PL-08-10	laricio	10	86,73	68,09	38,75	135,55	134,56	131,78	119,33
PL-09-10	laricio	10	87,24	65,69	38,19	122,77	121,89	119,41	108,00
PL-10-10	laricio	10	87,15	65,80	38,38	148,50	147,41	143,97	129,90
PL-11-10	laricio	10	86,48	65,52	38,42	113,27	112,42	110,00	99,11
PL-12-10	laricio	10	88,81	65,94	37,81	113,86	112,95	110,59	99,83
PL-13-15	laricio	15	88,47	66,22	37,90	108,28	111,59	109,09	95,19
PL-14-15	laricio	15	87,88	68,64	38,21	133,91	138,07	135,18	117,86
PL-15-15	laricio	15	88,61	65,98	38,85	95,86	98,13	96,01	84,40

Cód.	Esp.	HC	A	B	L	Ph	Pha	Phd	P0d
PL-16-15	laricio	15	88,31	65,96	38,25	95,15	97,38	95,24	83,90
PL-17-15	laricio	15	87,31	65,98	38,18	111,73	114,36	111,80	97,60
PL-18-15	laricio	15	87,88	68,65	38,64	135,16	139,22	136,41	119,06
PL-19-20	laricio	20	89,07	67,40	38,38	148,46	158,23	154,95	130,20
PL-20-20	laricio	20	90,36	67,72	38,31	107,63	116,01	113,78	94,64
PL-21-20	laricio	20	87,58	66,45	38,78	94,17	100,52	98,50	83,12
PL-22-20	laricio	20	89,69	68,19	38,98	108,29	116,92	114,69	95,23
PL-23-20	laricio	20	89,70	67,11	38,56	107,58	115,87	112,51	94,12
PL-24-20	laricio	20	90,54	67,88	38,72	106,41	114,73	112,50	93,63
PL-25-25	laricio	25	90,50	67,15	38,68	96,51	107,33	105,24	85,23
PL-26-25	laricio	25	91,43	68,46	38,22	112,42	126,51	124,12	98,61
PL-27-25	laricio	25	90,86	68,40	38,59	112,59	126,14	123,75	98,79
PL-28-25	laricio	25	89,91	68,27	38,23	150,77	167,95	164,60	132,18
PL-29-25	laricio	25	90,22	66,91	38,43	94,01	104,45	100,47	81,32
PL-30-25	laricio	25	90,14	68,51	38,37	125,61	140,96	138,09	110,34
E-01-05	Elondo	5	95,94	66,99	34,70	218,14	207,99	203,40	190,72
E-02-05	Elondo	5	95,71	66,99	33,92	215,74	205,34	200,78	188,63
E-03-05	Elondo	5	96,63	67,28	34,19	225,75	215,21	210,58	197,65
E-04-05	Elondo	5	96,04	67,05	38,85	249,01	237,17	232,53	218,51
E-05-05	Elondo	5	96,02	67,01	38,28	248,85	235,35	230,76	218,31
E-06-05	Elondo	5	96,20	67,09	38,42	244,33	230,67	226,13	214,19
E-07-10	Elondo	10	97,03	67,88	37,78	244,48	241,16	236,40	214,39
E-08-10	Elondo	10	97,37	68,29	34,05	221,15	218,09	213,47	193,72
E-09-10	Elondo	10	97,55	68,25	38,42	250,33	246,95	242,34	219,68
E-10-10	Elondo	10	97,97	68,23	38,01	250,32	246,93	242,18	219,30
E-11-10	Elondo	10	96,93	67,91	38,61	246,73	243,40	238,89	216,53
E-12-10	Elondo	10	97,25	68,01	37,96	246,22	242,84	238,22	216,06
E-13-15	Elondo	15	99,05	69,16	38,77	250,12	256,62	251,90	219,61
E-14-15	Elondo	15	98,85	69,11	37,88	251,21	257,10	252,28	220,02
E-15-15	Elondo	15	99,02	69,21	34,11	223,24	229,22	224,37	195,36
E-16-15	Elondo	15	98,92	69,16	38,20	247,28	253,92	249,13	217,02
E-17-15	Elondo	15	98,84	69,15	34,85	226,39	233,24	228,36	198,27
E-18-15	Elondo	15	98,46	68,82	37,79	241,95	249,89	245,12	212,11
E-19-20	Elondo	20	99,66	69,90	38,61	249,95	266,32	261,45	219,51
E-20-20	Elondo	20	99,86	69,87	38,46	248,94	266,81	262,05	218,26
E-21-20	Elondo	20	100,09	70,05	38,42	249,54	264,81	260,07	218,92
E-22-20	Elondo	20	100,05	70,05	38,91	246,45	262,89	258,09	216,28
E-23-20	Elondo	20	99,81	69,86	38,87	247,17	264,31	259,69	217,08
E-24-20	Elondo	20	100,09	69,96	37,38	245,58	260,60	255,93	215,64
E-25-25	Elondo	25	100,58	70,36	37,77	246,85	272,40	267,52	215,80
E-26-25	Elondo	25	100,39	70,42	38,88	245,62	272,50	267,75	214,90
E-27-25	Elondo	25	100,56	70,37	37,61	246,35	271,85	266,92	215,37
E-28-25	Elondo	25	100,56	70,37	38,70	250,48	277,27	272,35	218,96
E-29-25	Elondo	25	100,46	70,41	38,08	253,48	280,68	275,74	221,40
E-30-25	Elondo	25	100,61	70,39	38,67	250,75	279,28	274,28	218,58

Cód.	Prof.4	D4	Ph4	P04	Prof.5	D5	Ph5	P05
CE-01-05	46,97	8,31	1,09	1,03	64,96	7,25	1,26	1,19
CE-02-05	47,20	8,15	1,09	1,03	65,49	7,36	1,27	1,20
CE-03-05	47,06	8,21	1,15	1,08	65,99	7,29	1,26	1,20
CE-04-05	47,28	8,21	1,08	1,02	65,92	7,19	1,24	1,18
CE-05-05	47,06	8,21	1,13	1,07	65,62	7,34	1,27	1,21
CE-06-05	47,04	8,21	1,10	1,03	65,23	7,55	1,22	1,16
CE-07-10	47,35	8,21	1,11	1,03	65,58	7,31	1,25	1,16
CE-08-10	47,00	8,21	1,12	1,03	65,13	7,55	1,25	1,17
CE-09-10	47,30	8,21	1,09	1,01	65,20	7,47	1,27	1,19
CE-10-10	47,06	8,21	1,10	1,02	65,22	7,33	1,28	1,19
CE-11-10	47,35	8,21	1,12	1,04	65,04	7,40	1,25	1,16
CE-12-10	47,26	8,21	1,09	1,01	65,50	7,29	1,34	1,15
CE-13-15	47,15	8,21	1,08	0,98	65,12	7,15	1,20	1,04
CE-14-15	47,11	8,21	1,07	0,98	65,76	7,23	1,18	1,11
CE-15-15	47,14	8,21	1,11	1,01	65,20	7,22	1,18	1,09
CE-16-15	47,10	8,21	1,08	1,00	65,16	7,21	1,18	1,09
CE-17-15	47,25	8,21	1,07	0,96	65,25	7,22	1,15	1,05
CE-18-15	47,23	8,21	1,08	0,98	65,37	7,28	1,15	1,06
CE-19-20	47,17	8,21	1,04	0,92	65,10	7,45	1,18	1,06
CE-20-20	47,10	8,21	0,99	0,88	65,73	7,16	1,03	0,94
CE-21-20	47,19	8,21	1,05	0,94	65,10	7,32	1,07	0,98
CE-22-20	47,08	8,21	1,02	0,92	64,98	7,24	1,11	1,02
CE-23-20	47,10	8,21	1,03	0,92	65,08	7,34	1,12	1,03
CE-24-20	47,06	8,21	1,04	0,94	65,75	7,43	1,14	1,04
CE-25-25	47,56	8,21	1,04	0,91	65,16	7,30	1,16	1,03
CE-26-25	47,37	8,21	1,04	0,91	65,11	7,18	1,10	0,98
CE-27-25	47,10	8,21	1,10	0,96	65,30	7,13	1,09	0,97
CE-28-25	47,10	8,21	1,03	0,89	65,26	7,28	1,15	1,02
CE-29-25	47,30	8,21	1,03	0,89	65,18	7,39	1,09	0,97
CE-30-25	47,02	8,21	1,04	0,91	65,08	7,44	1,09	0,98
PL-01-05	47,38	8,21	1,39	1,28	65,08	7,21	1,69	1,57
PL-02-05	47,29	8,21	1,47	1,36	65,28	7,23	1,72	1,61
PL-03-05	46,63	8,21	1,47	1,37	65,98	7,24	1,69	1,58
PL-04-05	46,83	8,21	1,51	1,40	65,03	7,07	1,74	1,63
PL-05-05	46,96	8,21	1,69	1,55	65,97	7,26	2,01	1,88
PL-06-05	46,70	8,21	1,23	1,15	65,77	7,37	1,47	1,37
PL-07-10	46,76	8,21	1,38	1,27	65,65	7,11	1,58	1,46
PL-08-10	46,71	8,21	1,57	1,43	65,11	7,24	1,87	1,71
PL-09-10	46,70	8,21	1,43	1,30	65,21	7,18	1,69	1,53
PL-10-10	46,89	8,21	1,80	1,65	65,48	7,23	2,22	2,02
PL-11-10	46,79	8,21	1,43	1,30	64,72	7,22	1,65	1,51
PL-12-10	47,15	8,21	1,38	1,26	65,59	7,28	1,65	1,49
PL-13-15	46,96	8,21	1,45	1,30	64,93	7,23	1,64	1,47
PL-14-15	46,78	8,21	1,66	1,46	66,05	7,17	1,81	1,63
PL-15-15	46,99	8,21	1,26	1,14	65,21	7,56	1,49	1,35
PL-16-15	47,08	8,21	1,28	1,15	64,82	7,31	1,56	1,39
PL-17-15	46,94	8,21	1,43	1,28	66,12	7,09	1,73	1,56
PL-18-15	46,86	8,21	1,66	1,47	65,03	7,29	1,82	1,64
PL-19-20	47,30	8,21	1,80	1,58	65,57	7,16	2,02	1,78

Cód.	Prof.4	D4	Ph4	P04	Prof.5	D5	Ph5	P05
PL-20-20	46,85	8,21	1,31	1,13	66,57	7,03	1,50	1,32
PL-21-20	46,88	8,21	1,26	1,10	65,31	7,16	1,35	1,20
PL-22-20	46,96	8,21	1,32	1,14	65,04	7,31	1,46	1,30
PL-23-20	47,01	8,21	1,31	1,15	65,68	7,10	1,45	1,28
PL-24-20	46,88	8,21	1,31	1,14	66,16	7,12	1,48	1,31
PL-25-25	46,61	8,21	1,27	1,07	64,97	7,04	1,31	1,13
PL-26-25	46,55	8,21	1,23	1,04	65,57	7,09	1,55	1,34
PL-27-25	47,46	8,02	1,53	1,32	65,21	7,18	1,71	1,48
PL-28-25	47,76	8,1	1,52	1,32	65,21	7,11	1,75	1,53
PL-29-25	47,86	8,2	1,30	1,13	67,19	7,10	1,38	1,20
PL-30-25	47,16	8,14	1,60	1,35	66,55	7,14	1,65	1,44
E-01-05	46,48	8,11	2,42	2,28	65,10	7,16	2,81	2,66
E-02-05	46,77	8,10	2,46	2,33	65,67	7,39	2,90	2,74
E-03-05	46,27	8,04	2,47	2,33	64,70	7,25	2,78	2,64
E-04-05	46,54	8,13	2,45	2,32	65,53	7,16	2,80	2,64
E-05-05	46,51	8,19	2,39	2,27	65,51	7,24	2,83	2,68
E-06-05	46,54	8,16	2,40	2,28	65,12	7,33	2,78	2,63
E-07-10	46,56	8,17	2,53	2,33	65,79	7,17	2,80	2,58
E-08-10	46,42	8,10	2,43	2,22	65,33	7,28	2,71	2,50
E-09-10	46,23	8,15	2,41	2,22	65,36	7,12	2,81	2,59
E-10-10	46,42	8,16	2,50	2,28	65,45	7,29	2,80	2,58
E-11-10	46,31	8,11	2,44	2,25	65,57	7,15	2,57	2,38
E-12-10	46,51	8,16	2,43	2,24	65,09	7,17	2,83	2,63
E-13-15	46,24	8,07	2,51	2,25	65,35	7,11	2,74	2,48
E-14-15	46,65	8,13	2,51	2,24	65,50	7,22	2,82	2,53
E-15-15	46,56	8,07	2,39	2,13	65,19	7,17	2,80	2,53
E-16-15	46,77	8,12	2,40	2,14	65,45	7,24	2,90	2,62
E-17-15	46,51	8,21	2,43	2,17	65,54	7,14	2,96	2,67
E-18-15	46,75	8,14	2,44	2,18	65,86	7,37	2,82	2,55
E-19-20	46,39	8,18	2,49	2,14	65,67	7,48	2,89	2,53
E-20-20	46,51	8,13	2,41	2,07	65,19	7,50	2,82	2,46
E-21-20	46,28	8,16	2,41	2,09	65,00	7,11	2,82	2,49
E-22-20	46,31	8,17	2,47	2,15	64,96	7,15	2,78	2,46
E-23-20	46,17	8,23	2,32	2,00	65,20	7,22	2,78	2,44
E-24-20	46,43	8,18	2,41	2,09	65,02	7,20	2,73	2,39
E-25-25	46,43	8,05	2,33	1,97	65,11	7,27	2,85	2,46
E-26-25	46,06	8,13	2,27	1,92	65,03	7,17	2,80	2,39
E-27-25	46,02	8,08	1,94	1,69	65,28	7,28	2,74	2,38
E-28-25	46,35	8,08	2,27	1,96	65,20	7,58	2,83	2,44
E-29-25	46,12	8,11	2,29	1,97	65,05	7,21	2,85	2,44
E-30-25	46,01	8,19	2,35	2,00	65,15	7,28	2,78	2,37



