

ENTREGABLE PROYECTOS— 2023-2024

Desarrollo de métodos de análisis, no destructivos y por teledetección, para la optimización de la explotación y mejora de la calidad de madera de *Pinus halepensis*

“WOODBYSAT”

Entregable 4.1: Informe de métodos/técnicas de evaluación de calidad de la madera. Fichas técnicas

Programa: Proyectos de I+D en colaboración con empresas

Número de proyecto: 22300053

Expediente: IMDEEA/2023/38

Duración: del 01/07/2023 al 30/09/2024



AIDIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO

ÍNDICE

1	<i>Introducción y objetivos del entregable</i>	1
2	<i>Estado del arte de métodos de evaluación de la calidad de la madera mediante técnicas convencionales y no destructivas</i>	2
3	<i>Estado del arte de métodos de evaluación de la calidad de la madera mediante técnicas de teledetección</i>	31
4	<i>Selección de métodos de evaluación de la calidad de la madera</i>	37
4.1	<i>Equipos de evaluación no destructiva</i>	37
4.2	<i>Métodos innovadores basados en la teledetección</i>	43
5	<i>Acciones de difusión y transferencia</i>	46
6	<i>Fichas técnicas</i>	52
7	<i>Conclusiones</i>	58
8	<i>Bibliografía</i>	59

1 Introducción y objetivos del entregable

El objetivo de este entregable es obtener la información necesaria para el proyecto, referente a los métodos convencionales, no destructivos y la teledetección para conocer la calidad de la madera que puedan ser interesantes para la obtención de datos relevantes a las masas forestales de *Pinus halepensis* y además, la aplicación de estas técnicas a dichas masas.

Por un lado, este entregable consta de la tarea 4.1.- Estado del arte de métodos de evaluación de la calidad de la madera, en ella se lleva a cabo una investigación sobre los métodos convencionales, no destructivos y de teledetección para la obtención de la calidad de la madera tanto aserrada como árboles en pie, abarcando desde las técnicas más innovadoras dedicadas al mundo forestal como aquellas tradicionales que se llevan utilizando desde hace tiempo.

Por otro lado, el entregable también desarrolla la tarea 4.2.- Selección de métodos innovadores para la obtención de datos de interés. En esta tarea se explica el motivo y qué métodos se eligen finalmente en el proyecto para llevar a cabo las investigaciones necesarias y obtener los datos de interés.

2 Estado del arte de métodos de evaluación de la calidad de la madera mediante técnicas convencionales y no destructivas

La madera es un material de origen natural que presenta múltiples diferencias respecto a otros materiales debido a su heterogeneidad. Esta particularidad dota a la madera de gran variedad en sus propiedades físicas y mecánicas, no solo entre especies, sino dentro de la misma especie.

La madera presenta un gran abanico de usos y aplicaciones, concretamente la madera de uso estructural se define como el conjunto de elementos de madera de sección transversal rectangular clasificada según la normativa vigente del lugar en el que se vaya a emplear. Actualmente en España el documento que recoge las especificaciones y marco normativo que deben de cumplir todas las edificaciones es el Código Técnico de la Edificación (CTE).

Dentro del CTE se encuentran diversos documentos básicos que indican la normativa y especificaciones a cumplir en función del tipo de construcción y material empleado. En el caso de la madera el documento que recoge todo ese marco teórico y legislativo es el *Documento Básico de Seguridad Estructural en Madera (DB SE M)*. Según este documento, la madera de uso estructural debe de estar clasificada y asignada a una clase resistente que especifica los valores propios de resistencia.

Propiedades		Clase resistente											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistencia (característica) en N/mm²													
- Flexión	f _{m,k}	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
- Tracción paralela	f _{t,0,k}	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
- Tracción perpendicular.	f _{t,90,k}	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
- Compresión paralela	f _{c,0,k}	16	17	18	19	20	22	22	23	25	26	27	29
-Compresión perpendicular	f _{c,90,k}	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
- Cortante	f _{v,k}	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Rigidez, en kN/mm²													
- Módulo de elasticidad paralelo medio	E _{0,medio}	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
- Módulo de elasticidad paralelo 5º-percentil	E _{0,k}	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
- Módulo de elasticidad perpendicular medio	E _{90,medio}	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
- Módulo transversal medio	G _{medio}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad, en kg/m³													
- Densidad característica	ρ _k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
- Densidad media	ρ _{medio}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Figura 1. Madera aserrada. Especies de coníferas y chopo. Valores de las propiedades asociadas a cada Clase Resistente. CTE DB SE M.

Para clasificar la madera y poder determinar su clase resistente, existen diversos métodos convencionales. Principalmente se emplea la clasificación visual de lotes y la clasificación mecánica. Ambos métodos están ampliamente aplicados e implantados en la industria, pero requieren que la madera a clasificar se encuentre aserrada y escuadrada a las dimensiones de

uso, en el caso de la clasificación mecánica, requiere de la rotura del elemento, dejándolo inservible para su uso. Ambos métodos realizan una clasificación por lotes estableciendo la clasificación estructural del lote analizado.

La clasificación visual de la madera se realiza según la norma UNE 56544:2022 (Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas) y UNE-EN 1309-3:2018 (Madera aserrada y madera en rollo. Métodos de medida. Parte 3: Singularidades y alteraciones biológicas).

Este método consiste en analizar y medir las diferentes peculiaridades y anomalías de la madera aserrada, para determinar la calidad mecánica y estructural de la misma. No solo se analiza la cantidad de estas características, sino que también el tamaño de estas, para saber cualitativamente como afectaran a sus propiedades mecánicas.

Estas singularidades o defectos son las siguientes:

- Fendas
- Nudos.
- Médula.
- Desviaciones en la dirección de la fibra de la madera.
- Curvaturas y Alabeos
- Entrecasco.
- Bolsas de resina
- Acebolladuras.

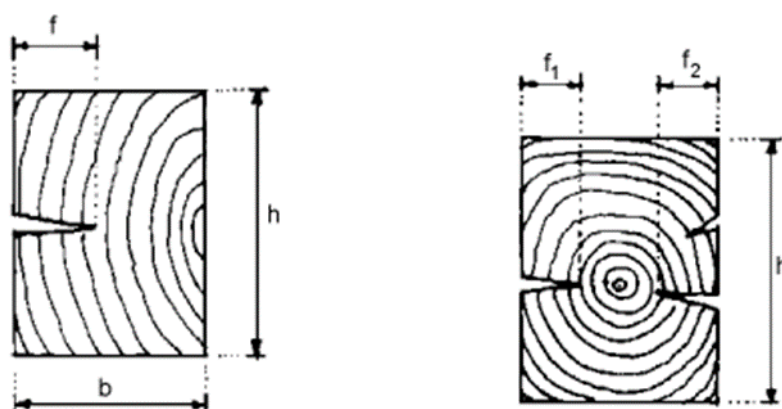


Figura 2. Medición de fendas según la norma UNE 56544:2022.

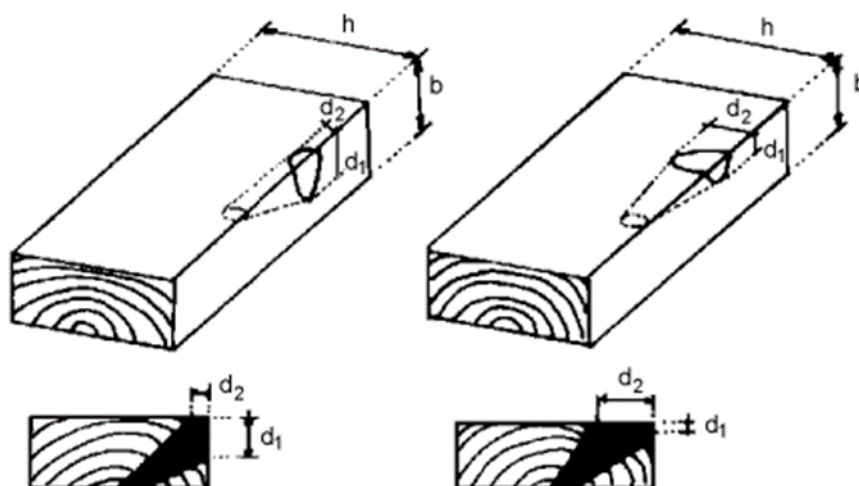


Figura 3. Medición de nudos según la norma UNE 56544:2022.

En función de las mediciones y controles realizados según las prescripciones de la norma, de determina la clasificación estructural de los lotes analizados en función del análisis y la especie.

Norma	Especie (Procedencia)	Clase resistente									
		C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	D35	D40
UNE 56544:2011	Pino silvestre (España)	-	-	ME-2	MEG	-	ME-1	-	-	-	-
	Pino pinaster (España)	-	-	ME-2	-	ME-1	-	-	-	-	-
	Pino insignis (España)	-	-	ME-2	-	ME-1	-	-	-	-	-
	Pino laricio (España)	-	-	ME-2	MEG	-	-	ME-1	-	-	-

Figura 4. Asignación de clase resistente para diferentes especies arbóreas según norma UNE 56544:2022

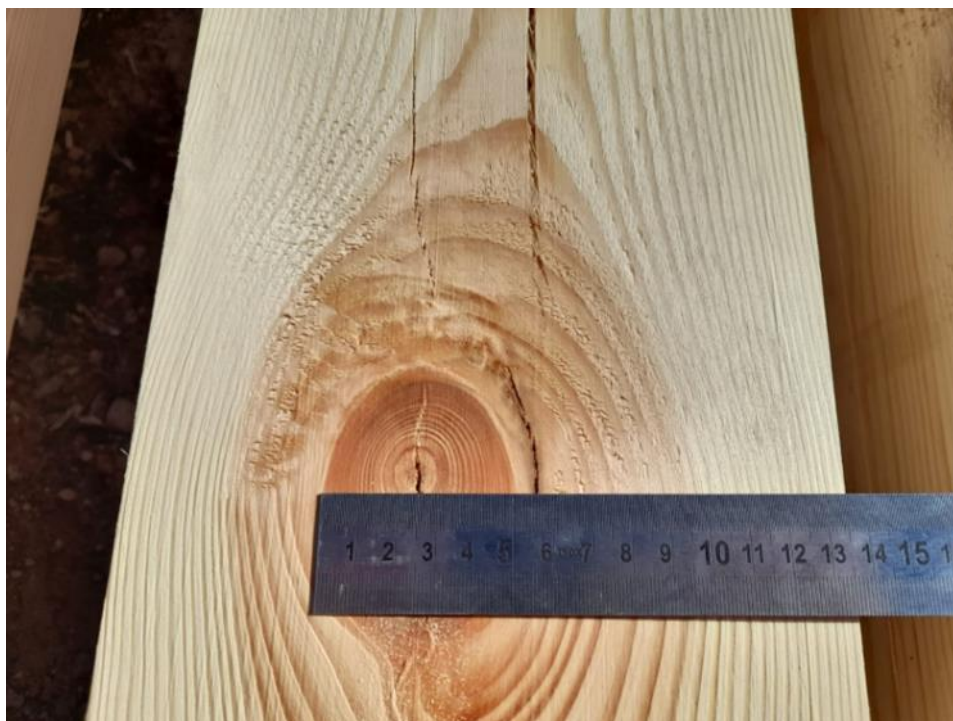
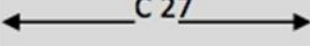


Figura 5. Medición de nudos.



Figura 6. Medición de fenda

Actualmente en España la especie *Pinus halepensis* no presenta ninguna clasificación estructural en base a ninguna norma. A diferencia de España, en otros países como Francia ya se incluye la madera de *Pinus halepensis* como madera de uso estructural y su clasificación se lleva a cabo mediante la norma NF B52-001-1 (Regulations governing the use of timber in structure - Visual classification for the use of softwood and hardwood species in structures - Part 1 : massive Wood). En esta norma se establece que la madera de *Pinus halepensis* de uso estructural parte de una clasificación visual de C14 llegando hasta una clasificación visual de C24.

	ST I	ST II	ST III	ST IV
Données du groupe des pins	C 30	C 24	C 18	C 14
Résultats pour le Pin d'Alep	(1)			C 18
Données intégrées dans la norme pour le pin d'Alep		C 24	C 18	C 14

(1) L'échantillon ne contenait pas suffisamment de planche en ST I pour que les résultats soient statistiquement valables. Mais ils sont très élevés.

Figura 7. Clasificación de la madera de *Pinus halepensis* según la norma NF B52-001-1. Fuente: NF B52-001-1.

En la figura anterior se puede observar que la norma francesa establece 4 niveles de clasificación denominados "ST" siendo el ST I el más alto y el ST IV el más bajo.

Para la determinación de la calidad estructural de los elementos de manera destructiva, se recurre a la norma europea 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).

En esta norma se recoge, entre otros, el método para la determinación módulo de elasticidad global en flexión y el método de la resistencia a la flexión axial, el cual será el que se utilice para la determinación de la calidad estructural por rotura de las muestras del proyecto.

La disposición de las vigas para su ensayo se realiza según las especificaciones de la propia norma tal y como se observa en la figura siguiente.

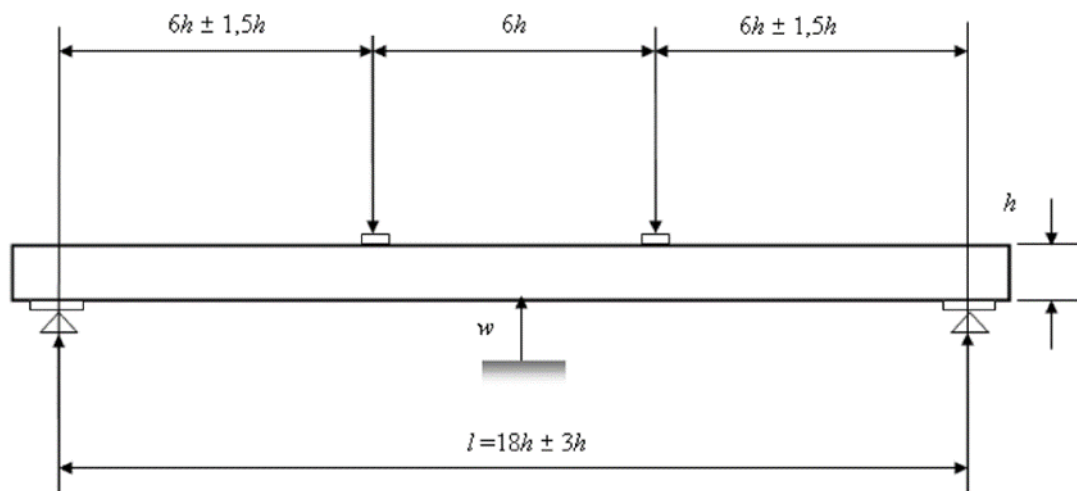


Figura 8. Disposición de ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión según norma UNE EN 408:2011+A1.

Una vez realizado el ensayo, el módulo de elasticidad global a flexión se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb} \right)}$$

- a* distancia entre punto de carga y apoyo más próximo (mm)
- b* anchura de la sección de ensayo (mm)
- h* altura de la sección de ensayo (mm)
- l* longitud entre apoyos (mm)
- w* deformación (mm)
- G* módulo de elasticidad transversal (N/mm²)
- w₂-w₁* incremento de deformación correspondiente a *F₂-F₁* (mm)

Y la resistencia a flexión axial a partir de la siguiente formula:

$$f_m = \frac{3F_{m\acute{a}x}a}{bh^2}$$

- a* distancia entre punto de carga y apoyo más próximo (mm)
- b* anchura de la sección de ensayo (mm)
- h* altura de la sección de ensayo (mm)
- F_{máx}* carga máxima (Newtons)

A pesar de que la clasificación visual y mecánica proporcionan una clasificación estructural de la madera acorde a la normativa vigente, cada vez es más habitual ver el uso de herramientas y metodologías de clasificación más innovadoras, que permiten realizar la clasificación de la madera de forma más precisa y eficiente a lo largo de todo el proceso de transformación de la madera, desde la troza en monte hasta los elementos aserrados en destino final. Estas técnicas se dividen en la evaluación no destructiva mediante equipos de emisión y recepción de ultrasonidos, vibraciones inducidas, resistografía, entre otros. Y en la aplicación de metodologías innovadoras como son el LiDAR terrestre, aéreo y la teledetección.

Este conjunto técnicas y metodologías innovadoras pretenden poder clasificar la madera de una forma mucho más fácil y eficaz en cualquiera de las fases en las que se encuentre. Dependiendo del estado en el que se encuentre la madera (árbol en pie, troza o aserrada) se puede emplear una serie de equipos que nos permiten estimar las propiedades de la madera.

Una de las técnicas empleadas para la estimación del MOE y el MOR¹ de la madera de forma no destructiva es el de emisión y recepción de ultrasonidos. Existen diversidad de equipos que emplean esta técnica y que han sido ampliamente estudiados en la bibliografía de referencia.

Analizando la aplicación de los equipos de emisión y recepción de ultrasonidos, estos han sido ampliamente empleados tanto para la detección de anomalías y degradaciones en árboles y elementos estructurales como para la clasificación estructural de árboles en pie. En este último ámbito, estudios como el realizado por Fassola H. et al, 2020, desarrollan modelos predictivos de evaluación de madera para uso estructural a partir de la medición de ultrasonidos tanto de árboles en pie como de las trozas extraídas de una explotación forestal. Como resultado, se obtuvo que los métodos acústicos empleados, permiten identificar aquellos ejemplares que presentan propiedades de resistencia mecánica óptimas para su uso estructural.

El equipo Sylvatest emplea dos sondas conectadas vía bluetooth con una app. Este equipo mide la velocidad de propagación de una onda entre los sensores. El equipo permite llevar a cabo mediciones de forma directa e indirecta, por lo que puede aplicarse tanto en árboles en pie como en trozas y madera aserrada.

¹ Módulo Resistente a Flexión (MOR), el Módulo de Elasticidad Global (MOE)



Figura 9. Medición de árboles en pie y de trozas con equipo Sylvatest.

Tras realizar el ensayo el equipo registra la velocidad de propagación de la onda y el tiempo y determina una clasificación estructural. Esta clasificación debe de recalcularse con la densidad real del elemento analizado puesto que el equipo emplea una biblioteca de densidades tipo incorporada.

Medida

Humedad: 100 [%]

Distancia entre sondas: 99 [cm]

Medida indirecta: ☒

Medida Sylvatest

Digitalización de la señal: ☒



ST04-04-0033

OK

Tiempo de propagación: 223 [µs]

Desviación estándar: 1,0 [%]

Cuentas de disparos válidos: 9

Resultados

Velocidad bruta: 4.445 [m/s]

Velocidad corregida: 5.214 [m/s]

MOE: 10.552 [MPa]

MOR: 24,2 [MPa]

C24

Figura 10. Resultados de la medición con equipo Sylvatest.

El equipo FAKOPP es otro equipo de emisión y recepción de ultrasonidos. A diferencia del equipo SYLVATEST, este registra únicamente el tiempo que tarda la onda en ir de un sensor a otro y junto a la distancia entre sensores y la densidad se puede calcular el MOE y el MOR. El equipo incorpora 3 tipos de sensores en función de sobre qué elemento se vaya a realizar el ensayo.

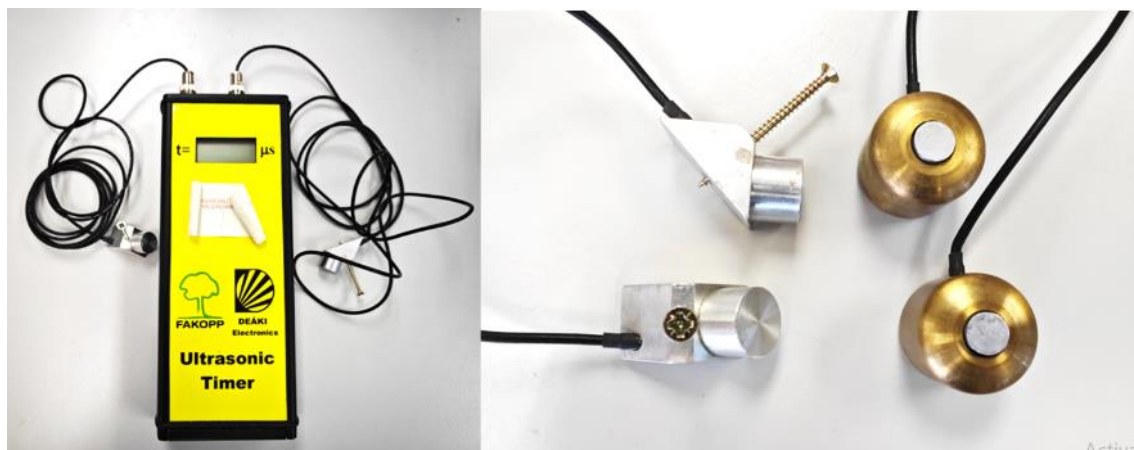


Figura 11. Equipo Fakopp y tipos de sensores que emplea.

En el estudio realizado por Ralph L. et al, 2015, comprobaron si el marco de plantación en plantaciones de pino piñonero afectaba a la calidad de la madera. Para ello realizaron mediciones en pie con el equipo de emisión y recepción de ultrasonidos FAKOPP sobre 54 pies en parcelas con 3 marcos de plantación diferentes.

La metodología empleada partía de un análisis visual de los pies, para determinar aquellos que presentaban mejores prestaciones para madera aserrada. Posteriormente se realizó el ensayo de ultrasonidos y se cortaron dichos ejemplares. Una vez cortados, se aserraron y clasificaron visualmente en verde en 3 categorías (1, 2 y 3 siendo 1 la calidad más alta y 3 la más baja) por un certificador autorizado. Tras la primera clasificación, se secaron las muestras aserradas y se realizó una segunda clasificación por el mismo certificador de las muestras de calidad 1 y 2 previamente asignadas. Como resultado de dicha clasificación se obtuvieron muestras de 2x4x80 pulgadas tanto de la parte interior como exterior de las trozas aserradas.

Con estas muestras reclasificadas, se realizó el ensayo de rotura para determinar la clasificación estructural y poder comparar los resultados con los obtenidos por el ensayo de ultrasonidos.

Table 1—Mean values of time-of-flight (TOF) acoustic velocities, modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) (standard deviation in parentheses) for sample boards sawn from 48 sample trees at age 27 years. Standard deviations are in parentheses

Planting density	Board position ^a	Number sample trees	Number sample boards	TOF	MOE	MOR
<i>trees ac⁻¹</i>				<i>m/s</i>	<i>10⁶ psi</i>	<i>psi</i>
1,210	Inside		10		1.345 (0.374)	6,749 (1,966)
	Outside		11		1.286 (0.276)	7,155 (1,796)
	All	12	21	3468 (339)	1.314 (0.319)	6,961 (1,843)
681	Inside		16		0.994 (0.316)	4,945 (1,774)
	Outside		15		1.116 (0.293)	5,626 (2,062)
	All	18	31	3580 (318)	1.053 (0.306)	5,275 (1,918)
302	Inside		16		0.832 (0.240)	4,713 (1,375)
	Outside		19		0.954 (0.261)	6,192 (2,067)
	All	18	35	3305 (327)	0.898 (0.255)	5,516 (1,912)

^aInside boards contained pith.

Figura 12. Tabla resumen de resultados obtenidos en el estudio. Ralph L. et al, 2015.

Como conclusiones del estudio se concretó que no se pudo encontrar una correlación entre los datos obtenidos por la medición de ultrasonidos con los ensayos de rotura. Entre las razones por las que se cree que no se alcanzó dicha correlación, se encuentra el tamaño de las muestras analizadas, que puede que no recogiera la gran en la estructura y propiedades de la madera. Otra de las razones es la medición de ultrasonidos, un mayor número de mediciones permitiría un mejor ajuste.

Otro estudio que valoraba la clasificación de árboles en pie es el realizado por Knowwles R. et al, 2004, en el que comparaba diversos equipos y técnicas no destructivas entre ellos que se encontraba el equipo IML Micro Hammer. En este estudio además de comparar las mediciones realizadas con los diversos equipos entre ellos, vieron que la edad del árbol en el momento de realizar la medición puede afectar a los resultados obtenidos, ya que la colocación de las sondas es muy superficial. De esto concluyeron no solo que los equipos de emisión y recepción de ultrasonidos son buenos predictores de la calidad de la madera, sino el rango de edad optimo del árbol para realizar la medición.

El equipo IML Micro Hammer emplea unos sensores que se atornillan en la madera y se fijan magnéticamente al quipo. A diferencia de los dos equipos descritos anteriormente, la excitación de las sondas se realiza mediante un martillo especial que incorpora el propio equipo. Al igual que los anteriores, registra el tiempo que tarda la onda de sondo en ir de un sensor a otro.



Figura 13. Equipo IML Micro Hammer.

Otro estudio realizado por MOORE J. et al, en el que se comprobaba la calidad de la madera de abeto en Reino Unido. Para ello se desarrolló el estudio en tres fases. En la primera fase se tomaron mediciones en campo de 10 árboles de 64 rodales mediante emisión y recepción de ultrasonidos con el equipo IML Hammer. En la segunda fase de la investigación, se seleccionaron 12 de estos rodales y se extrajeron 10 trozas de cada uno de estos rodales seleccionados que se analizaron mediante vibraciones inducidas con el equipo HM 200. En la última fase del estudio, se aserraron las trozas ensayadas y se repitió el ensayo de vibraciones inducidas y se realizó el ensayo destructivo de rotura.

Como resultados, se obtuvo una relación significativa tanto para mediciones individuales como para el promedio ($R^2=0.60$ individual $R^2=0.713$ promedio) entre los datos obtenidos por el equipo IML Hammer y el HM 200.

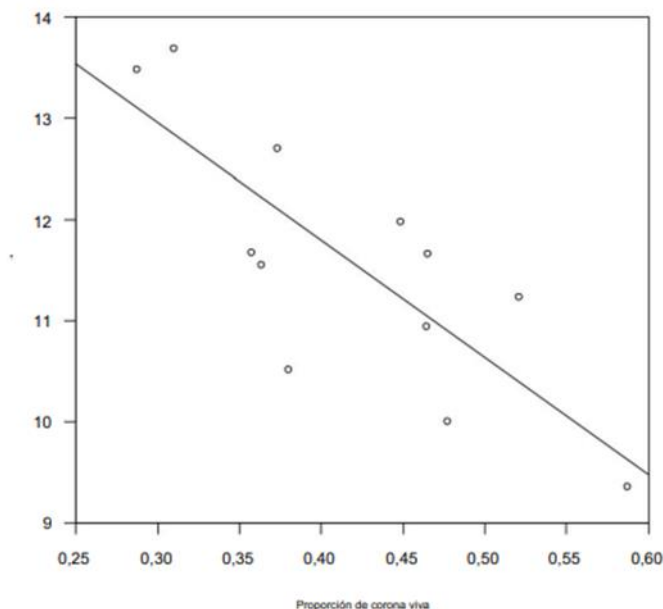


Figura 2. Relación entre la velocidad media de la onda de tensión medida en troncos de un sitio individual y la rigidez media a la flexión de la madera cortada de un sitio.

Figura 14. Relación entre mediciones con equipo IML Hammer y HM 200. MOORE J. et al.

Como conclusión del estudio, afirman que el empleo de este tipo de técnicas no destructivas permite la valoración y clasificación de la madera de forma eficaz a lo largo de la cadena de suministro, lo que permite llevar a cabo una gestión y explotación más efectiva de los recursos madereros.

Uno de los equipos más empleados en la medición de ultrasonidos, es el equipo Hitman ST300. Este equipo proporciona una medición directa de la velocidad de propagación de una onda acústica entre dos sensores dispuestos de forma indirecta en fustes de árboles en pie. A diferencia de otros equipos, este requiere de una excitación externa para producir la onda de sonido que se registra en un dispositivo conectado con las sondas.

Consultando la bibliografía de referencia, cada vez es más habitual ver el empleo de técnicas innovadoras de clasificación de madera en todas las fases de su producción, desde la propia gestión forestal hasta la industria de primera transformación.

Un ejemplo de este tipo de innovación es la realizada por Wang X. et al, 2007. En este proyecto se evaluaba mediante métodos acústicos la calidad de la madera de árboles y troncos individuales para evaluar el valor de rodales y bosques. Para ello se evaluaron mediante diversas técnicas no destructivas dos bosques de pino radiata bien diferenciados geográficamente de Nueva Zelanda.

Emplearon el equipo de ultrasonidos Hitman ST300 para la medición de árboles en pies, y el equipo de vibraciones inducidas Hitman HM220 para medir las trozas apeadas.



Figura 15. Medición de árboles en pie y trozas. Wang X. 2007.

Como resultado de esta investigación, se observó la alta relación de este tipo de técnicas no destructivas con la calidad de la madera, que proporciona una mejora y optimización en los procesos no solo de clasificación sino de toma de decisión y gestión de las masas a gestionar y explotar.

Al igual que los equipos de emisión y recepción de ultrasonidos, uno de los equipos que más se emplea para la determinación de la clasificación estructural de la madera son los equipos de vibraciones inducidas. Estos equipos registran la vibración que se emite por el fuste de forma automática o manual y determinan la clasificación estructural del elemento.

Hay diversos equipos que emplean este método en función de en qué fase de transformación se encuentren, pero todos ellos requieren que el elemento este apeado y no se puede realizar el ensayo en árboles en pie.

Uno de los equipos más empleados es el equipo Timber Grader MTG. Este equipo es compacto y tiene la particularidad de autoexcitarse para producir la onda y registrar los valores de transmisión de esta.



1. Emisor de ondas de impacto.
2. Receptor ondas de impacto.

Figura 16. Equipo de vibraciones inducidas



Figura 17. Ensayo con el equipo Timber grader MTG. Fuente: AIDIMME

Otros equipos muy usados e implantados en la industria son los equipos Hitman HM220, Hitman PH330 y Hitman LG640. Estos tres equipos emplean la medición por vibraciones inducidas en diversas fases del procesado. Desde el proceso de corta instalados en el cabezal de corte de la cosechadora hasta incorporado en la línea de aserrado.



Figura 18. Equipos Hitman. Fuente: Fibre-gen.

Hay diversos estudios de las aplicaciones y uso de los equipos de vibraciones inducidas. Estos equipos se emplean mayoritariamente en la industria en elementos de madera ya aserrados. Estudios como el realizado por Burawska-kupniewska I. et al 2019, relacionan la calidad de las trozas con la calidad estructural de la madera. Analizan de forma visual los pies y los clasifican por calidades (altura de fuste libre de nudos, diámetro, etc.). Una vez aserrados, y analizados con el equipo de vibraciones inducidas, concluyen que la calidad del árbol en pie está muy relacionada con la calidad estructural de los elementos aserrados.

Otro estudio realizado por Wang X. et al, 2007, desarrolla un estudio por el que relacionan las mediciones en campo mediante técnicas no destructivas con la calidad estructural de la madera. Para ello emplean los equipos Hitman de emisión y recepción de ultrasonidos y vibraciones inducidas. A través de este estudio concluyen la gran relación que hay en la medición con ambos equipos y a su vez con la calidad estructural de la madera. De esta forma se afirma que es posible llevar a cabo una clasificación estructural de la madera en pie para adecuar y explotar de forma más eficiente las masas forestales.

El estudio realizado por Auty D. y Achim A. en 2008, evalúa la relación que existe entre la medición mediante técnicas no destructivas acústicas en árboles en pie de pino silvestre y las propiedades mecánicas de la madera de diversos rodales con tratamientos silvícolas distintos.

El estudio se enfocó en dos fases en las que en la primera de ellas se tomaron medidas acústicas de árboles en rodales con ejemplares de la misma edad para posteriormente extraer probetas de algunos de esos ejemplares y someterlas a ensayos de flexión estática y poder comparar los resultados y la eficiencia del empleo de esta técnica en árboles en pie. Posteriormente, en la segunda fase del estudio se realizaron mediciones acústicas en árboles en pie de diversas edades y en rodales con tratamientos silvícolas distintos.

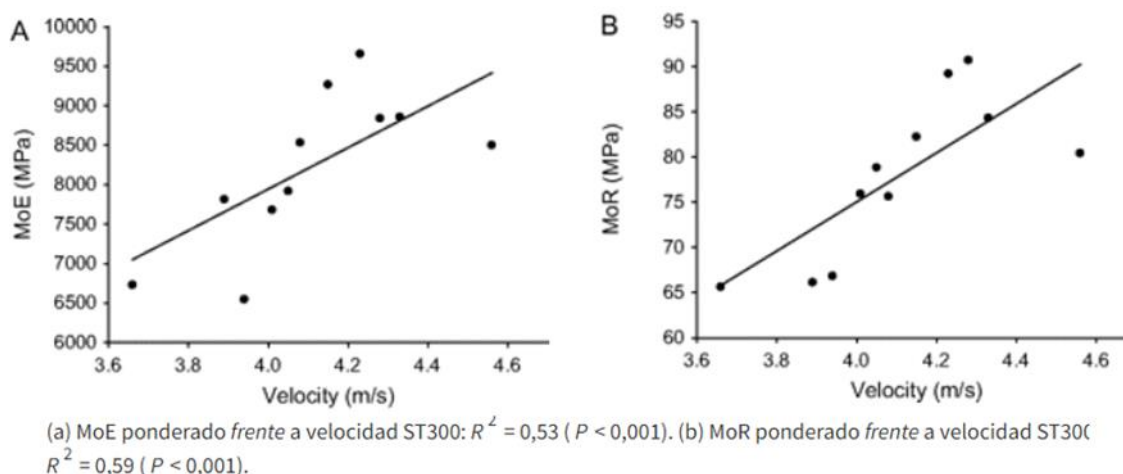


Figura 19. Relación entre las propiedades mecánicas y la velocidad acústica. Auty D. y Achim A. en 2008.

Como resultado de este estudio entre otras, concluyeron que la medición acústica en árboles en pie es un buen indicador de las propiedades mecánicas de la madera pero que al mismo tiempo debe de tenerse en consideración algunos factores como la edad y los tratamientos silvícolas aplicados.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de realizar ensayos de emisión y recepción de ultrasonidos sobre árboles en pie es la variación que puede sufrir la medición en función del eje radial y axial a lo largo y ancho del fuste debido a la heterogeneidad propia de la madera. En este aspecto, el estudio realizado por Van Duong D. et al. 2018 relacionaba las características propias de la madera con la velocidad de ultrasonidos medida en distintas partes del tronco de *Melia azedarach*. Para ello tomaron secciones a distintas alturas del fuste y a distinta distancia a la medula. De cada una de estas muestras se realizó el ensayo de emisión y recepción de ultrasonidos, la determinación de su densidad, longitud de fibra y resistencia a la compresión.

Variable	Description	n	V_u (m/s)	FL (mm)	AD (g/cm^3)	CS (MPa)
Radial position from pith (%)	10	30	3683 ± 72.37^b	0.87 ± 0.02^c	0.43 ± 0.01^c	33.14 ± 0.92^c
	50	30	4178 ± 34.87^a	1.10 ± 0.01^b	0.51 ± 0.01^b	38.85 ± 0.75^b
	90	30	4237 ± 33.97^a	1.19 ± 0.01^a	0.56 ± 0.01^a	42.92 ± 0.65^a
Height above the ground (m)	0.3	18	3955 ± 80.01^a	1.07 ± 0.04^a	0.51 ± 0.01^a	38.23 ± 1.57^a
	1.3	18	4047 ± 79.92^a	1.06 ± 0.04^a	0.50 ± 0.01^a	38.46 ± 1.52^a
	3.3	18	4042 ± 97.43^a	1.05 ± 0.04^a	0.50 ± 0.02^a	38.56 ± 1.33^a
	5.3	18	4048 ± 96.54^a	1.04 ± 0.04^a	0.49 ± 0.02^a	37.78 ± 1.31^a
	7.3	18	4074 ± 87.71^a	1.03 ± 0.04^a	0.51 ± 0.02^a	38.49 ± 1.30^a
Site	1	45	3893 ± 57.37^b	1.00 ± 0.02^b	0.49 ± 0.01^b	35.04 ± 0.80^b
	2	45	4173 ± 44.33^a	1.10 ± 0.02^a	0.51 ± 0.01^a	41.57 ± 0.65^a
Mean		90	4033 ± 38.98	1.05 ± 0.02	0.50 ± 0.01	38.30 ± 0.62

Figura 20. Tabla resumen de variables obtenidas. Van Duong D. et al. 2018.

Como resultados, se determinó que la altura a la que se había obtenido la muestra no influía significativamente a la medición mediante ultrasonidos. Por el contrario, la velocidad de ultrasonidos sí que se veía afectada por la distancia a la médula, siendo menor cuanto más cerca de la medula se realizaba el ensayo.

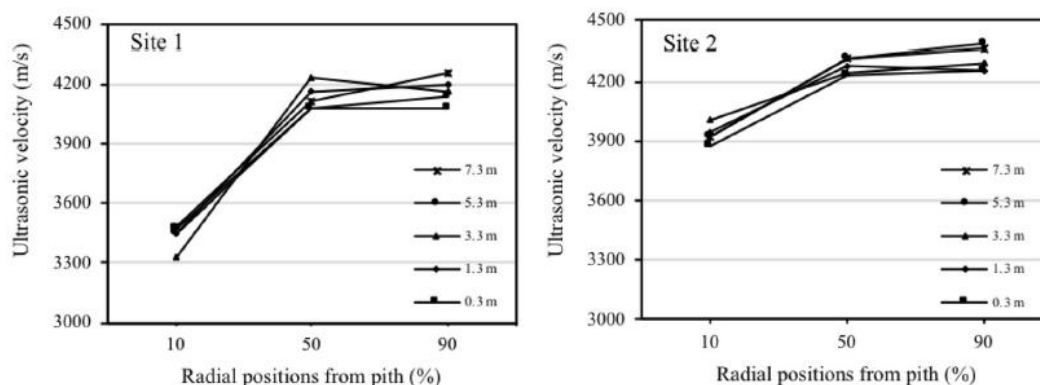


Figura 21. Gráficos de la variación de la velocidad de ultrasonidos radial y axial. Van Duong D. et al. 2018.

También se determinó que la velocidad de ultrasonidos estaba estrechamente relacionada con la densidad y la longitud de la fibra, siendo esta mayor a medida que aumentaban la densidad y la longitud de la fibra. Por último, la relación que presentaban la resistencia a la compresión y la velocidad de ultrasonidos estaba altamente relacionada, por lo que el empleo de ultrasonidos en sentido longitudinal puede emplearse para determinar la resistencia a la compresión.

Siguiendo la línea de como varia la estimación del MOE a lo largo del fuste, el estudio realizado por Yin Y. et al 2009, realizó un estudio sobre abeto chino con tres equipos no destructivos distintos, dos de emisión y recepción de ultrasonidos (Fakopp y Pundit 6) y uno de vibraciones inducidas (equipo propio). Para ello de cada árbol obtuvieron 3 trozas de 2,20 metros de longitud. Los ensayos se realizaron con los troncos recién apeados para simular la medición en pie. En plan de ensayos marcaba que sobre cada troza se realizaba 2 mediciones (una sobre la cara sur y otra sobre la norte) con cada uno de los equipos. Todas las mediciones se hacían a una distancia de 2,20 metros a excepción del fakopp que se hacía a 2 metros.

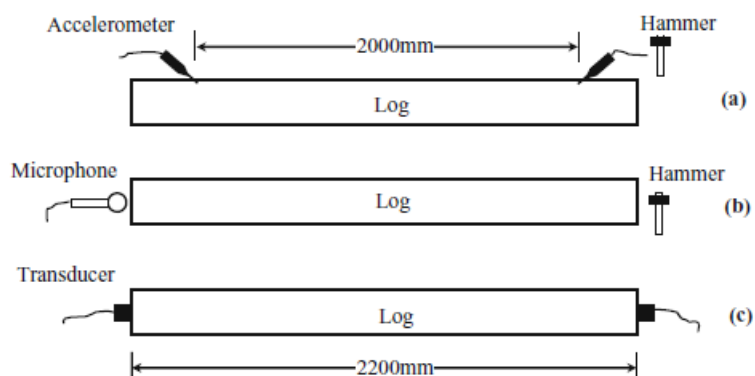


Figura 22. Disposición de los ensayos realizados con los tres equipos. Yin Y. et al 2009.

Una vez realizados los ensayos no destructivos, se extrajeron muestras de la cara norte y la sur de cada troza.

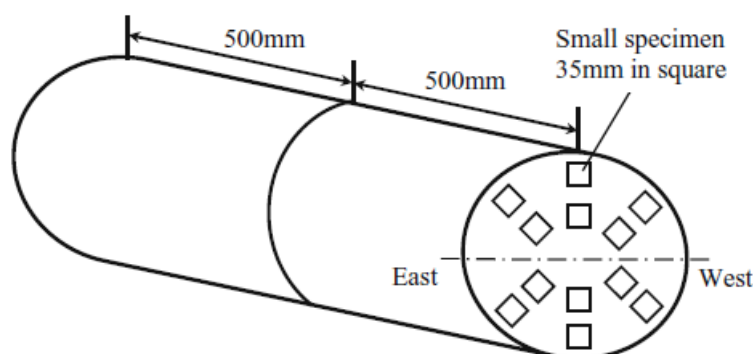


Figura 23. Patrón de aserrado para la extracción de probetas. Yin Y. et al 2009.

En cuanto a los resultados, se confirma que la técnica que mejor predice el MOE es la de vibraciones inducidas, pero la aplicación de esta técnica requiere de tener los árboles apeados. Para la predicción de árboles en pie y las variaciones de sus propiedades a lo largo de su longitud, la medición de la velocidad de ultrasonidos son técnicas muy eficaces con una correlación entre el 0,70-0,80.

Otra aplicación de la emisión y recepción de ultrasonidos estudiada por Merlo, E. et al 2014 fue la de predecir el MOE a nivel de zona, árbol y viga. Para ello analizaron 10 rodales de *Pinus pinaster* en Galicia. Sobre los ejemplares seleccionados realizaron 3 mediciones de emisión y recepción de ultrasonidos (equipo IML Micro Hammer) con una diferencia menos a 100m/s en cada uno de los 4 puntos cardinales (total 12 mediciones por árbol). Una vez realizados los

ensayos de ultrasonidos, se aparearon 73 pies con fustes de 8 metros de los que se extrajeron trozas de 5 y 3 metros y una rodaja de la base de 10 cm de espesor. De las trozas de 3 y 5 metros se extrajeron vigas de 20x20 y 20x25 de 5 metros y 15x10 y 15x5 de 3 metros. Sobre las vigas aserradas se realizó una clasificación visual y clasificación mecánica (norma UNE EN 56544 y UNE EN 408). De las rodajas extraídas de la base, se sacaron tablillas de 5x2 mm en corte radial de la medula hasta la corteza para determinar la densidad, número y anchura de anillos y espesores de madera temprana y tardía.

Equation form and parameter estimates	R^2_{adj}	RMSE	MEF _{adj}
<i>Stand-level equations (n = 10)</i>			
(Model 1) $MOE_{site} = -21.9739 + 0.0023SWV + 36.8856WD + 0.6723SI$	0.9791	2.0876	0.9338
(Model 2) $MOE_{site} = -21.1544 + 0.0075SWV + 0.7820SI$	0.8853	4.5458	0.7801
<i>Tree-level equations (n = 73)</i>			
(Model 3) $MOE_{tree} = -13.5834 + 0.0038SWV + 17.04105WD + 0.4067H_0 - 0.1856N/P$	0.7373	3.0507	0.6801
(Model 4) $MOE_{tree} = 0.0047SWV - 6.0740BAL - 0.1056G + 0.5097SI - 0.0776DBH$	0.6921	3.1634	0.6195
<i>Board-level equations (n = 224)</i>			
(Model 5) $MOE_{board} = -14.1119 + 0.0035SWV + 18.5879WD + 0.1992H - 0.1777N/P + 0.2268H_0$	0.6033	2.3719	0.5709
(Model 6) $MOE_{board} = 0.0045SWV - 0.57942BAL - 0.0865G + 0.3746H_0 - 0.1259DBH$	0.5512	2.5229	0.5142

N/P: soil litter Nitrogenous-Phosphorus ratio. SI: site index, defined as the dominant height (m) at a reference age of 20 years. SWV: stress wave velocity (m/s). WD: wood density (g/cm³). H₀: dominant height (m). BAL is the basal area of largest trees (m²/ha). G: stand basal area (m²/ha). DBH: diameter at breast height (cm). H: total height of the tree (m).

Figura 24. Ecuaciones obtenidas a nivel de rodal, árbol y viga para la estimación del MOE. Merlo, E. et al 2014

Como resultado, se obtuvo que la medición mediante ultrasonidos en árboles en pie junto a variables propias del árbol y del rodal permite estimar de forma efectiva el MOE, pudiendo emplearse no solo para seleccionar los mejores ejemplares para la industria, sino para llevar a cabo tratamientos silvícolas de adecuación de la masa.

Otra técnica no destructiva que se ha empleado e investigado es la del uso del fractómetro. Este equipo permite medir la resistencia a la flexión y a la compresión a partir de una barrena extraída en sentido radial y tangencial.



Figura 25. Equipo fractómetro realizando ensayo de compresión y flexión.

Un ejemplo del uso del fractómetro es el estudio realizado por Chiu C.H. et al, 2006 en el que emplearon el fractómetro para determinar la resistencia de la madera y delimitar el cambio entre madera juvenil y madura de madera de Taiwania (Árbol típico de Taiwán).

Seleccionan los árboles de dos parcelas con dos clases de diámetro medio (clase A 33.6 cm y clase B 26.4 cm) y se extraen las barrenas a una altura de 1,30 m de la base. El ensayo de resistencia se realiza con el fractómetro a lo largo de la longitud de la barrena en secciones de 12 mm tal y como se muestra en la figura siguiente.

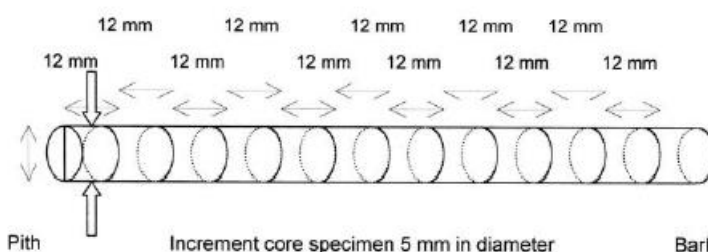


Figura 26. Seccionado de las barrenas para el ensayo con el fractómetro. Chiu C.H. et al, 2006.

A la hora de determinar la diferencia entre madera juvenil y madera madura, llevan a cabo un análisis de regresión segmentada en base a los datos obtenidos por el fractómetro. Según bibliografía, afirman que la madera juvenil es muy cambiante desde la médula hasta la madera madura, mientras que la madera madura es mucho más estable en sus propiedades. De esta forma y expresando los datos gráficamente determina el cambio de madera juvenil a madura.

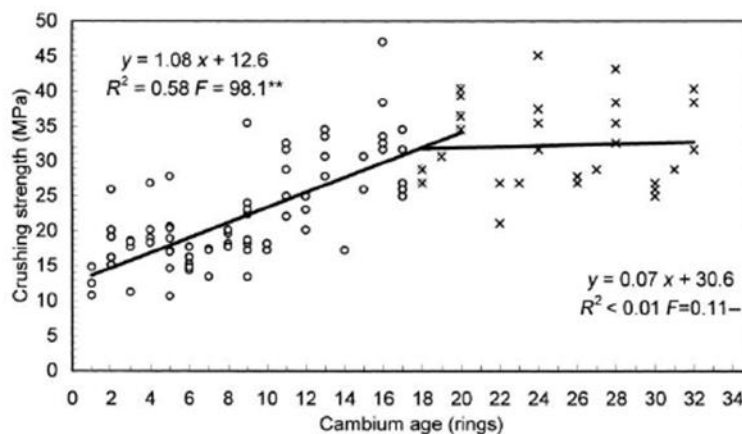


Fig. 2. La región de la madera juvenil determinada mediante análisis de regresión segmentada para determinar la resistencia al aplastamiento en muestras tipo A.

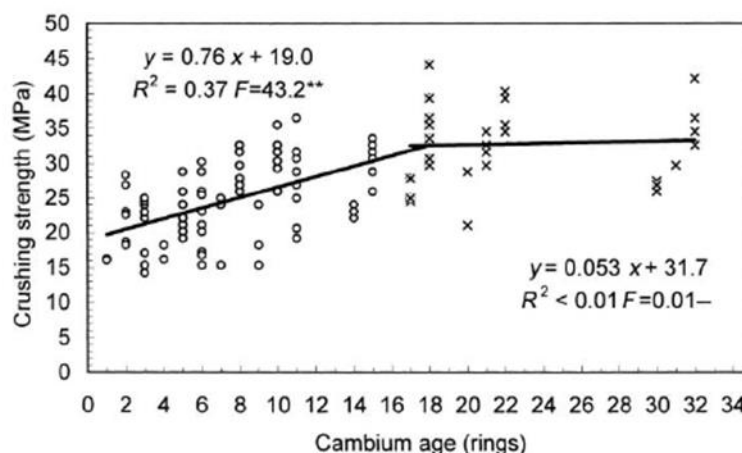


Fig. 3. La región de la madera juvenil determinada mediante análisis de regresión segmentada para determinar la resistencia al aplastamiento en especímenes tipo B.

Figura 27. Determinación de madera juvenil para la clase A y B mediante regresión segmentada. Chiu C.H. et al, 2006.

Como conclusiones, se afirma que el empleo del fractómetro permite mediante regresiones segmentadas delimitar la madera juvenil y la madura. Al mismo tiempo determinan que la resistencia evaluada con el fractómetro aumenta conforme aumenta la distancia a la medula.

Dentro de las técnicas no destructivas de la evaluación de la madera, se encuentra el resistógrafo. Este equipo se ha empleado para analizar tanto el estado interno de árboles como

de elementos estructurales de la madera.

El equipo de resistografía IML-RESIS PD se emplea para el análisis del estado de la madera en todos sus ámbitos (arbolado, madera de uso estructural y no estructural) mediante el avance de una broca de 3 mm de diámetro y longitud de 200 a 1000 mm de longitud dependiendo del modelo del equipo.



Figura 28. Ensayo equipo de resistografía sobre arbolado

El ensayo mide de forma gráfica la resistencia que ofrece la madera al avance de la broca en centímetros reales de avance. Previo al ensayo, se fijan los parámetros de velocidad de giro y de avance en función de la madera sobre la que se vaya a realizar el ensayo.

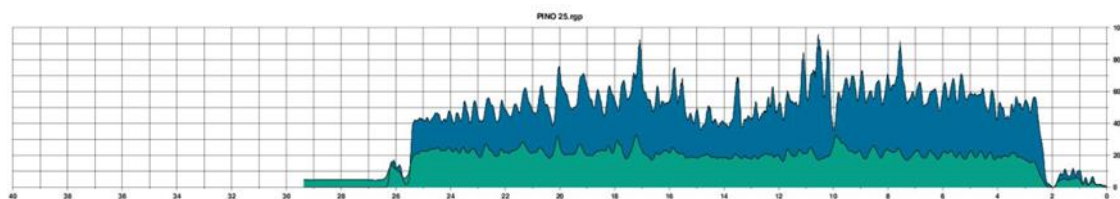


Figura 29. Gráfica que registra el equipo de resistografía

Otro equipo de resistografía es el patentado por Frank Rinn (Inventor del resistografo) y comercializado por la empresa Rinntech, Resistograph 6500. El funcionamiento de este equipo en esencia es muy similar a los producidos por IML, midiendo la resistencia que ofrece la madera al avance de la broca.



Figura 30. RESISTOGRAPH 6500. Versión más actual comercializado por Rinntech. Fuente Rinntech.

Diversos estudios reflejan que hay una relación muy alta entre la densidad de la madera y los valores obtenidos mediante la resistografía. Uno de estos estudios es el realizado por Gendvilas V. et al, 2023. En este estudio llevan a cabo la predicción de la densidad sobre árboles en pie teniendo en cuenta las variables del equipo empleado y el operario que realiza la medición. Para ello emplearon 7 equipos de resistografía IML PD y a dos operarios experimentados en el uso del equipo en seis zonas de muestreo y análisis.

La metodología empleada se basa en la realización de 7 resistografías sobre cada árbol con cada uno de los equipos IML y la extracción de una probeta de 12mm de diámetro y 50 mm de longitud para determinar la densidad de forma convencional.

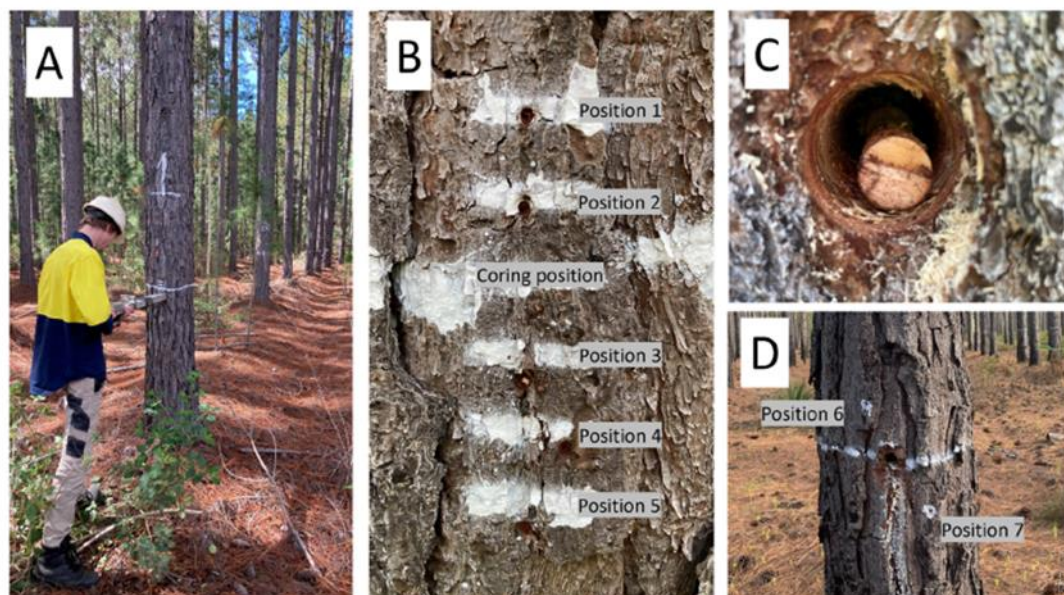


Figure 1. (A) Sampling trees at DBH 1.3 m with Resi in the plot. (B) Allocated sampling and coring positions on the tree with visible Resi holes. (C) Drilled 12 mm diameter and 50 mm length core in the outerwood in the tree. (D) Additional Resi sampling positions added after the core has been taken.

Figura 31. Metodología de muestreo empleada en el estudio. Gendvilas V. et al, 2023.

Como resultados, se determinó que ni el operario ni el equipo IML empleados presentaban diferencias significativas en las mediciones tomadas. Se determina que la relación entre la amplitud medida con los equipos IML y la densidad es del orden de un R^2 entre 0.82 y 0.91 con la particularidad de que las amplitudes deben estar entre un 20-50%. Por encima y por debajo de esos valores, la relación disminuye ligeramente. Como solución a esto, se pueden modificar los parámetros de velocidad de giro y avance de la broca del equipo IML para que la amplitud se mantenga dentro de ese rango.

Otro estudio que empleaba la técnica de resistografía es el realizado por Downes G. y Lausberg M. en 2016. Este estudio pretendía identificar que variables dentro del perfil resistográfico obtenidas de trozas o árboles en pie podían emplearse para la predicción de valores obtenidos por vibraciones inducidas con el equipo Hitman HM200.

Para ello se analizaron un total de 2009 troncos y árboles en pie sobre los que se realizó la resistografía, de los cuales un porcentaje de ellos también se habían ensayado con el equipo HM200.

Para extraer las variables de los perfiles resistográficos, se delimitó en los perfiles la zona del cambium, la medula y los anillos de crecimiento. Para posteriormente poder obtener una ecuación que recogiese el conjunto de variables obtenidas tanto por resistografía como por

vibraciones inducidas.

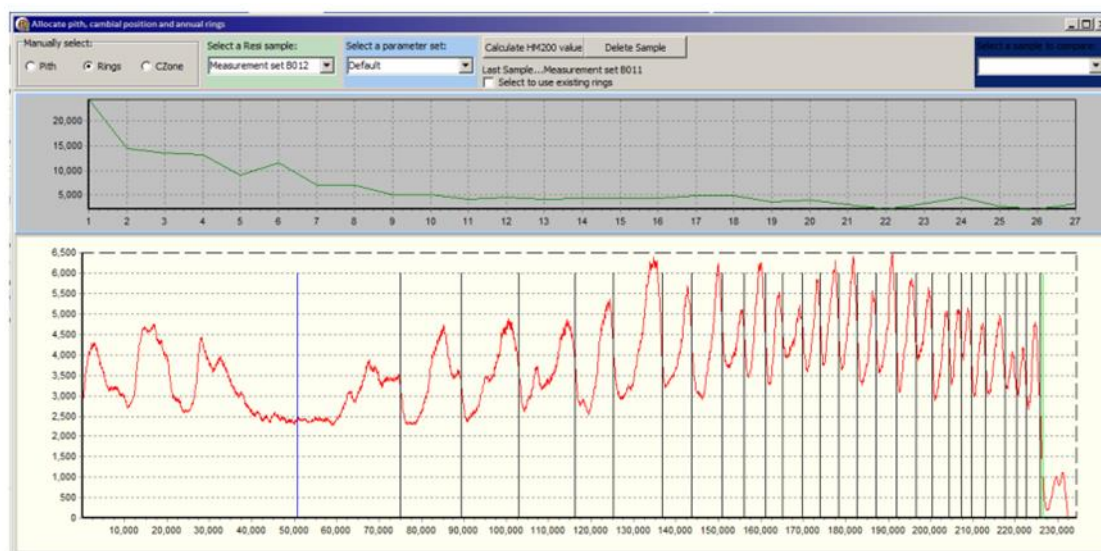


Figure 1. For each RESI trace the position of the pith, annual ring boundaries and underbark cambial zone was marked.

Figura 32. Análisis de los perfiles resistográficos. Downes G. y Lausberg M. en 2016

Se analizaron diversos modelos en los que se tenían en cuenta todas las procedencias de las muestras y posteriormente se separaban según su procedencia (árbol en pie o trozas apeadas)

Como resultado, se obtuvo que la ecuación empleada debe de ser distinta para mediciones en pie o sobre trozas apeadas. También se observó una gran relevancia en el número de anillos y el diámetro de la troza, estando estas dos variables altamente relacionadas con la densidad.

Otra aplicación que se ha visto en bibliografía para el resistógrafo es la de la estimación de la edad de árboles en pie. En el estudio realizado por Pan H. et al, en 2021, empleaban el resistógrafo para estimar la edad de alerce de una región del norte de china. Para ello realizaron 4 resistografías por árbol a la altura normal (130 cm desde la base) y extrajeron 2 muestras con la barrena pressler a la misma altura (opuestas una a la otra)

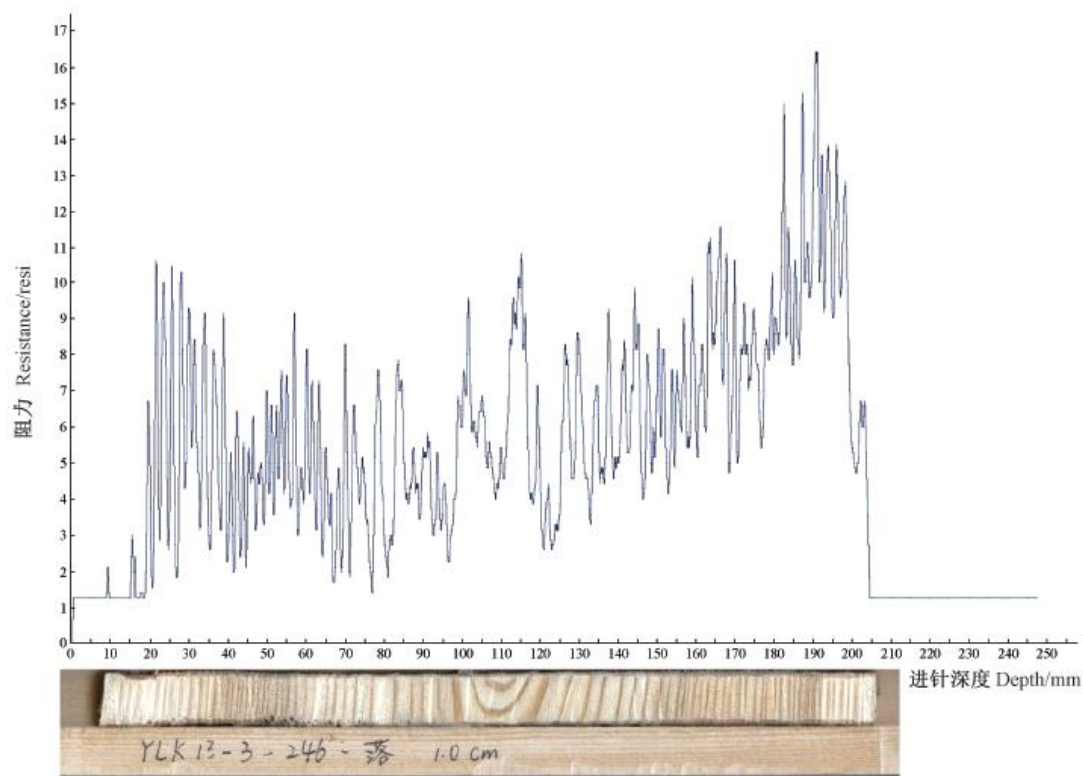


图 1 活立木抗钻阻力剖面与树芯年轮对比

Figura 33. Comparación del perfil resistográfico con la probeta extraída. Pan H. et al, en 2021

Una vez disponían de los perfiles resistográficos y de las probetas, delimitaron los anillos de crecimiento del perfil resistográfico con el software WinDENDRO y contaron visualmente los anillos en las probetas. Comparando la determinación de anillos de forma visual con la automática del programa, observaron que había diferencias entre ambos métodos. Para poder ajustar la medición automática, emplearon el filtro Kalman para corregir las variaciones entre la medición por resistografía y la real. Como resultado del estudio, concluyen que el empleo del filtro Kalman mejora la predicción de la edad de árboles en pie a partir de resistografía generando un daño mínimo sobre el mismo.

En la misma línea de estimación de crecimientos a través de la medición de anillos de crecimiento mediante resistografía, está el estudio realizado por Hu, X. et al en 2020. El estudio se realizó sobre discos de alerce y abeto. A diferencia de otros autores, en este estudio desarrollaron su propio equipo de resistografía dado que la bibliografía existente referida a este campo de aplicación concluyó que la precisión de los equipos comerciales existentes tenía una precisión baja en la medición de anillos llegando a infraestimar entre 6 y 10 años de media.

Se estableció un muestreo por el que se realizaron 4 perforaciones por disco en los 4 sentidos (norte, sur, este y oeste). En total se realizaron 48 mediciones sobre 12 discos de alerce y 12 de abeto.



Figura 34. Medición de anillos sobre discos con equipo de perforación. Hu, X. et al en 2020.

Los parámetros de perforación establecidos en el equipo fueron de 3000 rpm para la velocidad de rotación y 10 cm/min de velocidad de avance. Una vez realizadas las mediciones, procesaron los datos obtenidos con un algoritmo propio denominado FIR programada en Matlab.

Como resultado del estudio, obtuvieron que para el conjunto de muestras analizadas se podía estimar los crecimientos de los discos con una precisión del 95,28% para el alerce y un 84,16% para el abeto.

3 Estado del arte de métodos de evaluación de la calidad de la madera mediante técnicas de teledetección

La teledetección se refiere al proceso de adquisición de información sobre la superficie terrestre mediante sensores remotos, como satélites o aviones no tripulados, que capturan datos en diferentes longitudes de onda. Estos datos son luego procesados para generar imágenes que representan características específicas del terreno, como la cobertura vegetal, el uso del suelo, la topografía, entre otros. Por otro lado, los SIG son sistemas informáticos diseñados para capturar, almacenar, analizar y visualizar datos geográficos, lo que permite la creación de mapas y la realización de análisis espaciales.

La combinación de la teledetección y los SIG en el ámbito forestal ofrece una serie de ventajas significativas. En primer lugar, permite la generación de información detallada y actualizada sobre los recursos forestales, incluyendo su distribución espacial, estado de salud, cambios en el tiempo, entre otros aspectos clave. Esto proporciona a los gestores forestales una visión completa del territorio en cuestión, lo que facilita la toma de decisiones informadas y la planificación de actividades de manejo y conservación.

Además, la integración de estas tecnologías puede aplicarse a una amplia gama de campos dentro del sector forestal. Por ejemplo, se pueden realizar inventarios forestales utilizando datos de teledetección para estimar la cantidad de biomasa y la densidad de árboles en una determinada área. También se pueden analizar cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo, lo que ayuda a identificar áreas de deforestación o degradación forestal. Asimismo, la teledetección y los SIG son herramientas valiosas para la detección y el monitoreo de incendios forestales, así como para la planificación de rutas de acceso y transporte en áreas forestales remotas.

En general, existe muy poca información en los estudios acerca de los métodos de cálculo de la calidad de la madera sobre el terreno, pero como se ha comentado anteriormente existen varios estudios relacionados con variables relacionadas con la calidad (Biomasa, densidad, salud, altura, etc.)

Las tecnologías de teledetección que permiten estos análisis se pueden agrupar en dos grandes grupos, teledetección pasiva, que reciben la señal del sol reflejada en las superficies observadas y activa, que emiten su propio pulso energético y no dependen de la luz solar.

- En el grupo de teledetección pasiva destacan los satélites ópticos, que pueden a su vez clasificarse según su resolución espacial, es decir, el mínimo detalle discernible en un píxel de la imagen.

En primer lugar, los satélites de muy alta resolución espacial, con una capacidad menor a 1 metro, son capaces de obtener imágenes con un nivel de detalle extraordinario. Estos satélites

pueden identificar características pequeñas como vehículos individuales o árboles con precisión. Ejemplos notables son los satélites de la serie WorldView-3 y WorldView-4 de Maxar Technologies, así como los satélites Pleiades de Airbus Defence and Space. En Heasari et al. (2019) se examinó cómo la combinación de datos espectrales de los satélites Pleiades con información adicional impacta en las estimaciones de volumen y área basal en Sari, Irán. Los resultados revelaron que la integración de ambos conjuntos de datos condujo a una reducción del Error Cuadrático Medio (RMSE) del 5% en la modelización del volumen y del 1% al 3% en la modelización del área basal. Esto sugiere que la inclusión de datos espectrales de alta resolución de los satélites Pleiades junto con datos complementarios puede mejorar la precisión de las estimaciones de volumen y área basal en el contexto específico de Sari, Irán. La disminución del RMSE indica una mayor precisión en las predicciones de los modelos, lo que indica que esta metodología podría ser beneficiosa para el monitoreo y gestión de los recursos forestales en la región.



Figura 35. Figura x. Pléiades satellite. Fuente: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/pleiades>

En segundo lugar, los satélites de alta resolución espacial, con una capacidad entre 1 y 30 metros, ofrecen una resolución adecuada para el monitoreo de áreas extensas, pero aún pueden detectar características relativamente pequeñas en la superficie terrestre. Esto incluye campos agrícolas o áreas urbanas. Ejemplos destacados de esta categoría son los satélites Landsat de la NASA/USGS y los satélites Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA). Mediante imágenes de Sentinel-2 en Mantas et al. (2022) se detectan a escala regional la decadencia de árboles por causa del nematodo de la madera del Pino (NMP) responsable de la enfermedad de su marchitamiento. Se obtuvo un algoritmo preoperacional a las imágenes de Sentinel-2 para la identificación de las zonas afectadas, los resultados del modelo alcanzan una precisión del 95% en zonas de amplia afección.

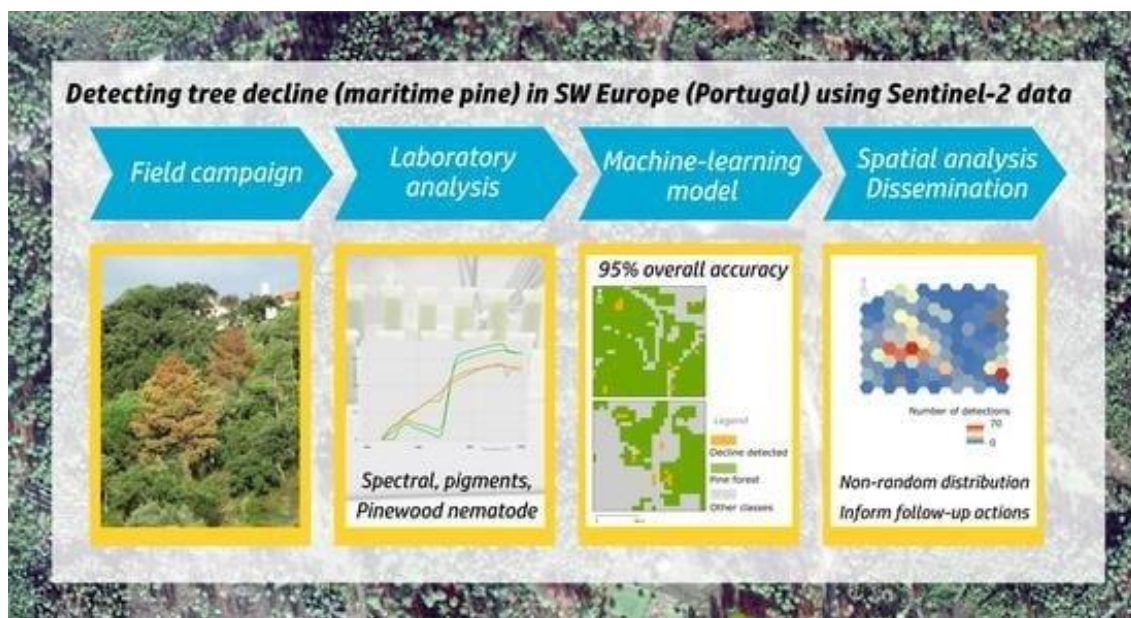


Figura 36. Flujo de trabajo para la detección de la decadencia de árboles. Fuente: <https://doi.org/10.3390/rs14092028>

Otro estudio que emplea satélites de alta resolución es el realizado por Reis et al. (2018b) donde se enfocó en estimar y mapear el área basal y el volumen de rodales de eucaliptos en Brasil mediante la integración de inventarios forestales, teledetección y métodos de predicción espacial. En concreto se emplearon imágenes de Landsat 5 y diferentes métodos estadísticos y algoritmos de aprendizaje automático para realizar estas estimaciones. Los resultados mostraron que el método de random forest fue el más efectivo para la predicción espacial y el mapeo del área basal y el volumen. El estudio sugiere que la combinación de métodos empleados proporciona un marco sólido para la integración de datos de campo y teledetección, lo que podría mejorar el monitoreo de plantaciones de rápido crecimiento.



Figura 37. Landsat 5. Fuente: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-5/>

Por último, los satélites de moderada resolución espacial, con una capacidad mayor a 30 metros, son útiles para el monitoreo de cambios a gran escala en la cobertura terrestre, como la expansión de bosques o la deforestación a gran escala. Ejemplos comunes incluyen los satélites MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de la NASA y los satélites SPOT de Airbus Defence and Space. Estos satélites tienen como objetivo es el monitoreo global y por tanto la resolución de estos satélites no es suficiente para realizar estudios relacionados con la masa forestal y sus características en detalle.

- En el grupo de teledetección activa destacan los sistemas LiDAR terrestres (TLS) y los aerotransportados (ALS).

El TLS es capaz de capturar modelos digitales tridimensionales muy detallados de las copas de vegetación gracias a sus altas densidades de puntos. Los sistemas TLS pueden ser montados en trípodes o ser instrumentos de escaneo móviles, y existen dispositivos de escaneo de puntos con un campo de visión parcial o completo. Estos instrumentos pueden capturar una estructura detallada hasta una distancia radial de hasta 100 m. Hasta la fecha, los escáneres TLS disponibles comercialmente pueden registrar uno, dos o varios retornos discretos por pulso láser emitido. El TLS de retorno discreto se ha utilizado ampliamente para medir la estructura de la vegetación en diversos ecosistemas forestales.

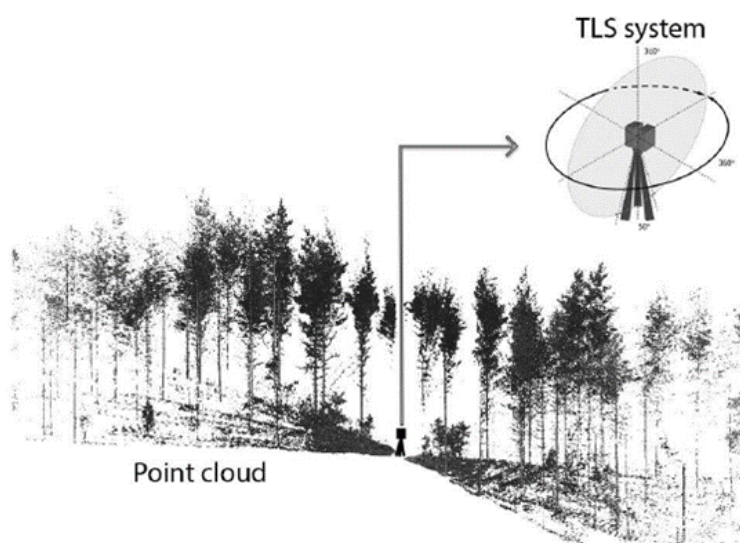


Figura 38. Diagrama del sistema TLS. Fuente: <https://doi.org/10.14214/df.195>

Por ejemplo, en Pyörälä et al. (2018) utilizaron datos de escaneo láser terrestre de 52 pinos escoceses para mejorar la adquisición de madera en aserraderos. Descubrieron que la precisión de la geometría de los troncos y su relación con la calidad de la madera eran similares a los datos de los aserraderos, pero la incertidumbre en la definición de la inclinación y la vinculación de la

calidad de la madera podrían limitar su viabilidad.

En Kankare et al. (2014) se estudió aplicación de tecnología de TLS en la evaluación de la calidad y clasificación de árboles en bosques de pino escocés. Al proporcionar estimaciones precisas de atributos de calidad externos, como el diámetro del tronco, la rectitud y la calidad general del árbol, esta técnica tiene el potencial de transformar la manera en que se lleva a cabo la gestión forestal. Los resultados mostraron la capacidad de clasificar árboles maduros de manera eficiente y precisa con el objetivo de conseguir una planificación más efectiva de la recolección, optimizando así las cadenas de suministro de madera y mejorando la gestión de los recursos forestales en general. Esta mejora en la precisión y eficiencia en la evaluación de árboles individuales puede tener un impacto significativo en la industria forestal, contribuyendo a una gestión más sostenible y rentable de los bosques.

El ALS se ha utilizado ampliamente para generar modelos digitales de elevación del suelo desnudo (DEMs) y para estimar atributos del inventario forestal, y está siendo rápidamente adoptado en la gestión forestal operativa. Típicamente, el ALS es un instrumento de escaneo de retorno discreto con un tamaño de huella de 0.1 a 2 metros, y puede lograr una alta precisión de las alturas de la superficie del terreno. El error para medir la altura de árboles individuales desde el ALS suele ser menor a 1 metro, y varía con la altura del dosel y la distribución de alturas. Cuando se estima la altura máxima o media del dosel dentro de parcelas y con el cierre completo del dosel, este error suele ser menor a 0.5 metros. Las estimaciones de altura de árboles del ALS son consideradas por algunos como más precisas que las mediciones manuales de campo.

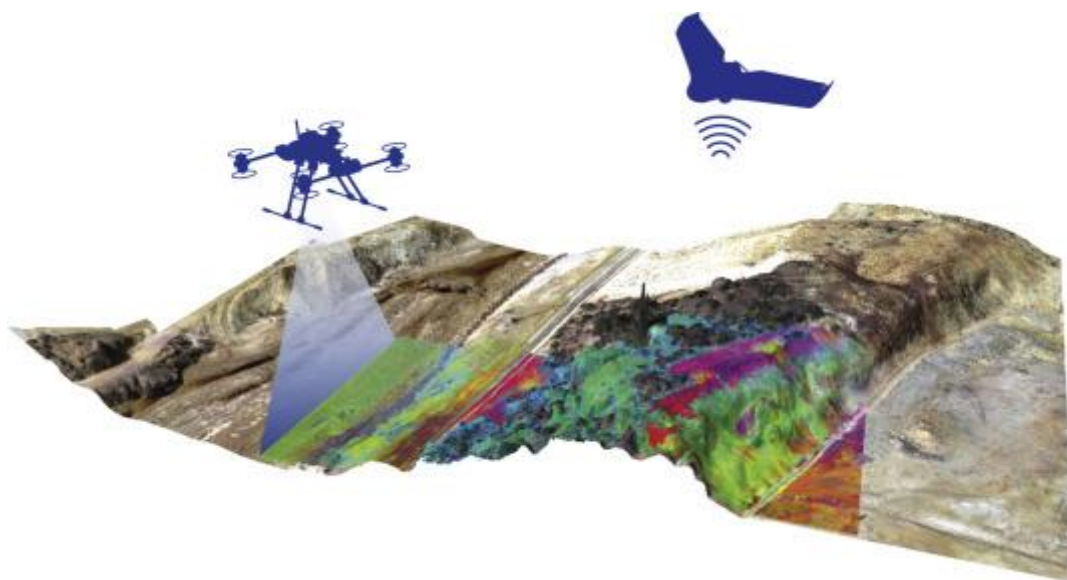


Figura 39. Esquema del funcionamiento del ALS. Fuente: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/airborne-laser-scanning>

El ALS se ha utilizado con éxito en una variedad de aplicaciones forestales para la recuperación de atributos estructurales de coronas y dosel, como el ancho, la longitud, la altura hasta la primera rama viva y la biomasa y la variación de la biomasa en el tiempo. En Suarez et al. (2010) demuestran el uso de LiDAR aerotransportado combinado con modelado de crecimiento de árboles para analizar la jerarquía de dominancia en rodales forestales que posteriormente se vincula a un modelo que estima cambios en las propiedades de la madera como la densidad de la madera y la rectitud del tronco. Estos resultados muestran fuertes relaciones entre la dominancia de los árboles y el índice de sitio y los parámetros de calidad de la madera.

También en Luther et al. (2013) se intenta predecir atributos de cantidad y calidad de madera de bosques de abeto balsámico y picea negra utilizando datos de ALS. Los resultados mostraron que los modelos explicaban del 52% al 90% de la variación en los atributos de estructura y del 18% al 53% de la variación en los atributos de fibra.

4 Selección de métodos de evaluación de la calidad de la madera

4.1 Equipos de evaluación no destructiva

Una vez realizada la revisión bibliográfica de que equipos se han empleado para la determinación de la clasificación estructural de árboles en pie y que resultados se han obtenido, se lleva a cabo la selección de aquellos que pueden dar mejor resultado para el proyecto que se está llevando a cabo.

A la hora de realizar los ensayos de emisión y recepción de ultrasonidos, el equipo fakopp presenta ciertas limitaciones por el tipo de sensor a emplear y por dar como resultado únicamente el tiempo de propagación de la onda. Además, el uso de cables para conectar los sensores limita mucho el uso práctico del equipo en campo y la longitud máxima de ensayo. Al igual que el equipo fakopp, el equipo IML Micro Hammer presenta limitaciones en cuanto a la longitud de ensayo a realizar y que requiere de una excitación externa para producir la onda, por lo que su uso en campo lo hace menos práctico que otros equipos.

Por otro lado, el equipo sylvatest en su cuarta versión, dispone de dos sondas conectadas vía bluetooth que no limitan la longitud de ensayo. El equipo en esta última versión incorpora una app en la que se dispone la longitud del ensayo la disposición de los sensores (directos o indirectos) la humedad y especie sobre la que se realiza el ensayo, recopilando todos los parámetros establecidos y dando el MOE y MOR de cada análisis que posteriormente se puede ajustar externamente con la densidad real del elemento analizado.



Figura 40. Equipo ultrasonidos Sylvatest 4.

A la hora de realizar los ensayos con el equipo sylvatest se debe realizar un taladro con una broca especial con la forma cónica de las sondas que permita colocar la sonda en el interior de la madera con la mayor superficie de contacto.



Figura 41. Broca que se emplea para la colocación de la sonda Sylvatest 4

Para poder determinar los crecimientos del árbol marcados por los anillos de crecimiento se va a emplear el equipo IML Resis PD400. Este equipo registra la resistencia al avance de una pequeña broca de 3 mm. El equipo permite realizar múltiples mediciones sin ocasionar apenas daño al árbol en comparación con otros métodos que requieren del apeo para extraer una sección transversal completa o la extracción de una barrena que ocasiona un orificio mayor.

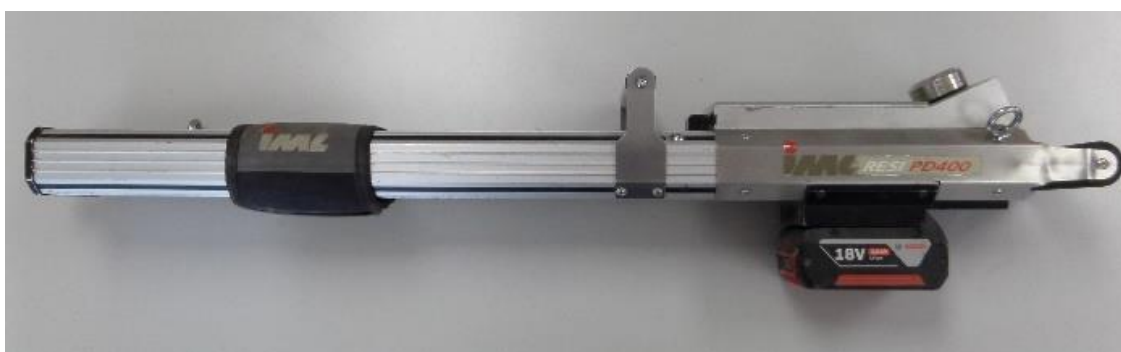


Figura 42. Equipo IML Resis PD400.



Figura 43. Broca que emplea el equipo IML Resis PD400.

El equipo de resistografía registra una gráfica en la que se muestra el avance de la broca en centímetros y el porcentaje de amplitud que es un valor interno del propio equipo por el que se expresa el consumo o energía empleado para el avance de la broca en la perforación.

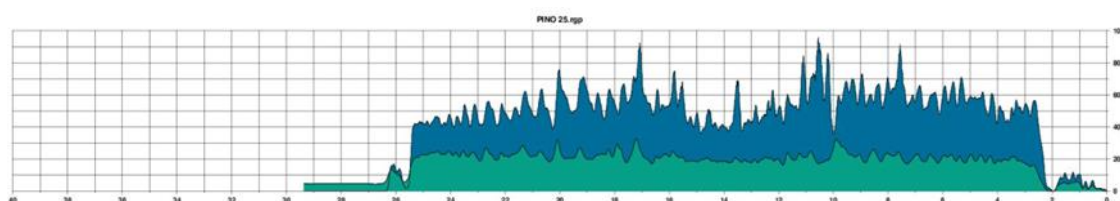


Figura 44. Gráfica que registra el equipo de resistografía

En las gráficas se observan picos de subida y bajada que reflejan el cambio de densidad dentro de un anillo de crecimiento (cambio entre madera temprana y madera tardía) a lo largo de todo el perfil resistográfico. Las resistografía se realizan de forma pasante haciéndolas coincidir con el eje radial del árbol y pasando por la médula. De esta forma se consiguen perfiles que contemplen la totalidad de los anillos de crecimiento que tiene los árboles a analizar.



Figura 45. Ensayo de resistografía sobre árbol en pie.

Otro equipo que se va a emplear para la estimación de la clasificación estructural de árboles en pie es el Fractómetro. El fractómetro, es un equipo de medición de los valores característicos de la resistencia a flexión y compresión de la madera en verde. Este equipo pequeño y portátil emplea pequeñas probetas de madera extraídas de árboles en pie mediante barrena pressler.



Figura 46. Extracción de probeta con barrena pressler.

Una vez extraída la muestra, se lleva a cabo la medición de flexión o compresión colocando la probeta en el equipo y accionándolo de forma manual hasta establecer la fuerza máxima de rotura.

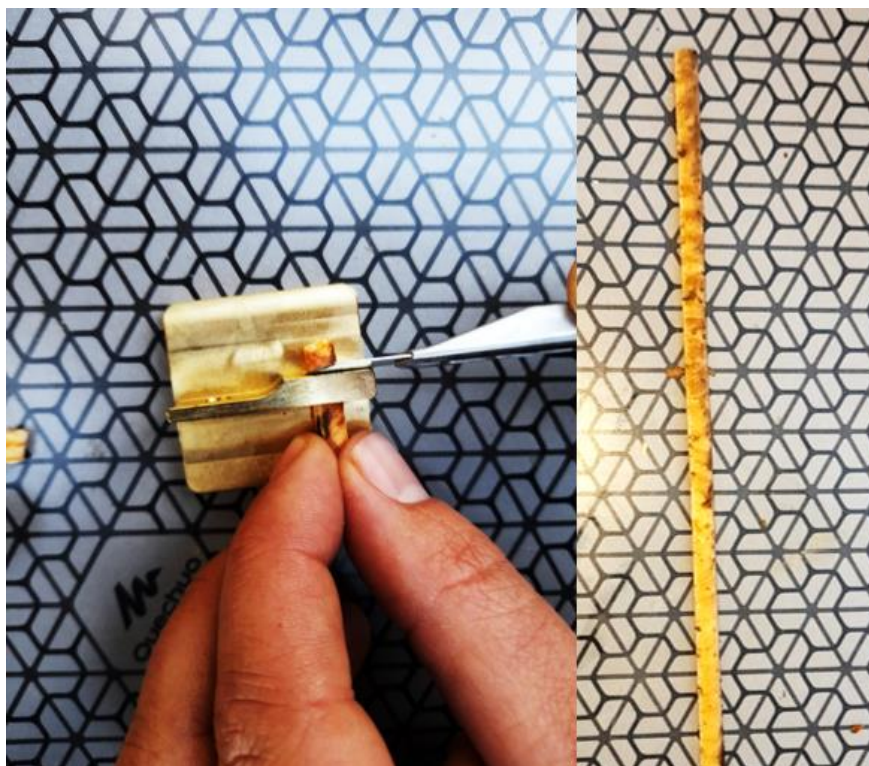


Figura 47. Preparación de la muestra para el ensayo con fractómetro.



Figura 48. Ensayo de compresión con fractómetro.

4.2 Métodos innovadores basados en la teledetección

Como se ha comentado en el apartado 3 de este entregable, respecto a los instrumentos de teledetección ópticos, existe gran variedad de satélites multispectrales, en este proyecto se ha seleccionado trabajar con las imágenes tomadas por el satélite multispectral de alta resolución Sentinel-2. Entre los otros candidatos, los satélites de muy alta resolución podrían haber sido una buena opción, pero su alto coste y, sobre todo, la poca disponibilidad de imágenes no permite realizar un estudio adecuado. En cuanto a los satélites de resolución intermedia, su peor resolución espacial respecto al Sentinel-2 no permite el detalle necesario en el estudio forestal en nuestra área de estudio, ya que el propósito principal de estos satélites es para análisis globales.

Las imágenes multispectrales que se van a emplear son las generadas por los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B, desarrollados y lanzados por la Agencia Espacial Europea (ESA) en 2015 y 2017 respectivamente. Estos satélites proporcionan imágenes cada 5 días. Las imágenes de Sentinel-2 (S2) contienen 13 bandas que van desde el espectro visible hasta el infrarrojo cercano, con resoluciones espaciales que varían entre 10 y 60 metros.



Figura 49. Imagen Sentinel-2 de la Comunitat Valenciana de 2022/10/02 en color verdadero (RGB) y en falso color infrarrojo (IRG) de 10 m de resolución. Fuente: Copernics sentinel Data – ESA

En cuanto a la tecnología LiDAR terrestre, se ha optado por el láser escáner Leica BLK360, es una herramienta de gran utilidad en el ámbito forestal debido a su capacidad para capturar nubes de puntos detalladas (680.000 puntos/segundo) y precisas de áreas boscosas. Su portabilidad (155x80mm y 850g) nos permite llevarlo fácilmente a áreas remotas o de difícil acceso, donde realizar escaneos rápidos y eficientes del terreno. Esto resulta especialmente útil para la evaluación de la estructura del bosque, la densidad de la vegetación y la topografía del terreno.

La alta precisión del BLK360 garantiza mediciones exactas (4 mm a 10 m), lo que es crucial para la gestión forestal, la planificación de la conservación y la monitorización de cambios en el paisaje forestal a lo largo del tiempo. Además, su integración con software especializado permite generar modelos tridimensionales detallados que facilitan el análisis y la toma de decisiones.



Figura 50. Láser escáner Leica BLK360.

Después de realizar el estudio bibliográfico se puede concluir que la tecnología LiDAR aerotransportada (ALS) de pulsos discretos ha establecido su posición como un método confiable para obtener información topográfica precisa y georreferenciada en el ámbito forestal. Su utilidad en el análisis forestal ha sido demostrada, siendo equiparable al uso de imágenes ópticas. Dado que el sector forestal a menudo requiere estimaciones de variables dasométricas que pueden ser costosas en términos de tiempo y recursos, el LiDAR se presenta como una alternativa viable. En este sentido, los datos públicos del LiDAR-PNOA son una opción que merece ser considerada, ya que las imágenes de puntos generadas de esta forma muestran resolución de entre 25 y 50 centímetros en toda la península y permite la generación de modelos digitales de elevaciones (MDE) y de superficies (MDS) ampliamente usados en el análisis forestal.



Figura 51. Ejemplo del mapa LiDAR en infrarrojo. Fuente: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea - PNOA

5 Acciones de difusión y transferencia

Durante el desarrollo del paquete de trabajo correspondiente a este entregable, se han realizado diversas reuniones con las empresas colaboradoras.

Dentro de este entregable se han desarrollado la tarea 4.1 “Estado del arte de métodos de evaluación de la calidad de la madera” y la tarea 4.2 “Selección de métodos innovadores para la obtención de datos de interés”

Dentro de estas tareas han colaborado las empresas

- OFFSET TRAIL

La empresa OFFSET TRAIL colabora con la tarea 4.2. En las visitas realizadas tanto en las instalaciones de la empresa como en las visitas a las parcelas objeto de estudio, la empresa colaboradora muestra gran interés por las técnicas de evaluación no destructivas empleadas por los técnicos de AIDIMME. A su vez los responsables de OFFSET TRAIL, muestran a los técnicos de AIDIMME las técnicas que emplean ellos para la gestión e inventario forestal como el vuelo con dron.



Figura 52. Demostración de técnicas empleadas por la empresa OFFSET TRAIL.

- SIDO MADERA

La empresa SIDO MADERA colabora con la tarea 4.1. En las visitas realizadas a sus instalaciones, muestran a los técnicos de AIDIMME la diversidad de productos que emplean en el desarrollo de su actividad que van desde vigas de madera maciza y laminada, tablas, tabloneros y diversos tipos de tableros. Especifican que para evaluar o determinar la calidad de los productos que emplean, se cercioran de que todos ellos se reciben con su correspondiente fecha técnica que especifica las prestaciones de cada material que emplean. A su vez realizan una comprobación visual de aquellos elementos con mayor enfoque estético o decorativo, eliminando aquellas piezas que aun cumpliendo las especificaciones técnicas no cumplan con los estándares propios de calidad y estética.

Aprovechando la visita de los técnicos de AIDIMME, la empresa nos muestra su interés en el aprovechamiento de la madera de *Pinus halepensis*

- CONTRACHAPADOS LUBADI

La empresa contrachapados Lubadi colabora con la tarea 4.1. En las visitas realizadas a sus instalaciones, el personal cualificado muestra a los técnicos de AIDIMME la metodología y procedimientos empleados para la clasificación tanto de las chapas y tableros que emplean.

La empresa nos indica que el procedimiento se basa principalmente en inspección y clasificación visual de la materia prima que les llega a sus instalaciones y que hay una falta de industrialización en el proceso desde origen. Nos indican que una buena clasificación en monte optimizaría los procesos de clasificación posterior una vez se realiza la primera transformación de la madera. A su vez muestran gran interés en poder emplear especies de pino procedentes de montes cercanos tanto por disponibilidad como por reducción de costes de suministro de materia prima.



Figura 53. Reunión con la empresa Contrachapados Lubadi.

- TABLEROS FOLGADO

La empresa Tableros FOLGADO colabora con la tarea 4.1. En las visitas realizadas a sus instalaciones, el personal cualificado muestra a los técnicos de AIDIMME la metodología y procedimientos empleados para la clasificación tanto de las chapas y tableros que emplean.

Los responsables de calidad de la empresa nos muestran en sus almacenes la tipología y calidades de madera que emplean. Nos indican que el procedimiento es mayormente visual, en el que se comprueba que los lotes adquiridos presentan la calidad requerida para la fabricación de sus productos.



Figura 54. Explicación de evaluación de la calidad por los técnicos de Tableros Folgado..

- TABLEROS PICO

La empresa tableros Pico colabora con la tarea 4.1. En las visitas realizadas a sus instalaciones, el personal cualificado muestra a los técnicos de AIDIMME la metodología y procedimientos empleados para la clasificación tanto de las chapas y tableros que emplean.

En una de las visitas a sus instalaciones, los responsables técnicos muestran a los técnicos de AIDIMME la metodología de clasificación de las chapas empleadas para la fabricación de tableros. El gerente nos indica que el grueso de su producción se destina a tableros específicos que se destinan a la exportación. Al mismo tiempo muestra gran interés en poder disponer de materia prima de cercanía que le permita reducir los costes y aumentar la competitividad de sus productos en el mercado.



Figura 55. Reunión con el responsable de tableros Pico.

Además de las reuniones con las empresas, se han ido desarrollando acciones de difusión de diversos tipos. Entre ellas se encuentran los boletines informativos en los que se han ido publicado los avances del proyecto.

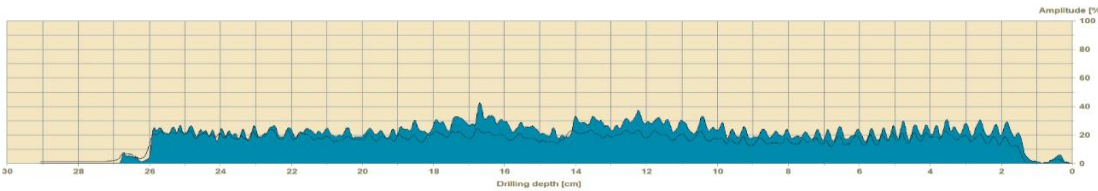


Biomateriales Boletín #179

Desarrollo de métodos de análisis, no destructivos, y por teledetección, para la optimización de la explotación y mejora de la calidad de madera de Pinus halepensis

*Figura 56. Publicación de inicio de proyecto aidimmeinforma.
<https://actualidad.aidimme.es/2023/10/04/woodbysat-inicio/>*

6 Fichas técnicas

RESISTOGRAFO IML-RESIS PD400	
Descripción Equipo para la medición de la resistencia a la penetración o perforación que ofrece la madera. El equipo está compuesto por un taladro que realiza la penetración con una broca de un diámetro de 2-3 mm, y un medidor de la fuerza que se necesita para esta perforación/penetración. El equipo registra de forma gráfica cada resistografía realizada en su memoria interna. Posteriormente la gráfica se traslada por bluetooth o cable a un software de análisis en un PC.	
Ámbito de aplicación Se emplea en campo, en árboles en pie para determinar el porcentaje de decaimiento por patologías bióticas, la edad contando los anillos de crecimiento y la densidad de la madera.	Valores que se obtienen Se obtienen graficas con valores de resistencia a la penetración y al avance en milímetros en la madera. Esta grafica sirve, tanto para determinar la cantidad de anillos de crecimiento (años), como el crecimiento anual de los mismos (mm). También puede servir como guía para poder determinar la densidad de la madera, pero sin ofrecer un valor numérico y únicamente pudiendo ser comparada con otras muestras similares e incluso, obteniendo datos de densidad reales.
	

ULTRASONIDOS SYLVATEST 4

Descripción

Equipo compuesto por emisor y receptor de ultrasonidos, además de un software, para realizar la determinación del módulo de elasticidad (MOE) y módulo de rotura (MOR). La conexión entre los sensores y el software se realiza mediante ondas bluetooth.



Ámbito de aplicación

Análisis de la calidad estructural en árboles en pie, para estimarla antes de realizar las cortas.



Medida

Humedad: 100 [%]
 Distancia entre sondas: 104 [cm]
 Medida indirecta: ☒
 Medida Sylvatests: ☒
 Digitalización de la señal: ☒
 ST04-04-0033
 OK
 Tiempo de propagación: 242 [µs]
 Desviación estándar: 1,2 [%]
 Cuentas de disparos válidos: 10

Resultados

Velocidad bruta: 4.298 [m/s]
 Velocidad corregida: 5.067 [m/s]
 MOE: 9.623 [MPa]
 MOR: 20,5 [MPa]

C18

Valores que se obtienen

El equipo mide el tiempo que tarda una onda de ultrasonido en viajar entre el emisor y el receptor. A partir de dicha medición y con la distancia entre sensores, el equipo determina el MOE y MOR en medidas longitudinales y el porcentaje de decaimiento de la densidad cuando se realiza en sentido radial del árbol.

FRACTÓMETRO IML II

Descripción

Dispositivo de medición mecánica, utilizado para calcular los valores característicos de la resistencia a la flexión y compresión de la madera. Para ello se extrae una muestra de 5 mm de espesor y de la longitud igual al radio del árbol analizado, mediante una barrena Pressler.

Para la resistencia a flexión la muestra se coloca en el dispositivo de sujeción del equipo y se alinea según la dirección de sus fibras. Se aplica una carga en sentido perpendicular a las fibras hasta que la madera falle. La carga máxima transmitida se considera la carga de rotura.

Para la resistencia a la compresión se corta una muestra pequeña de la barrena extraída y se comprime hasta su rotura.

Ámbito de aplicación

Es una herramienta usada en la industria forestal y la silvicultura para evaluar la calidad de la madera y la salud de los árboles, antes del talado de los mismos.

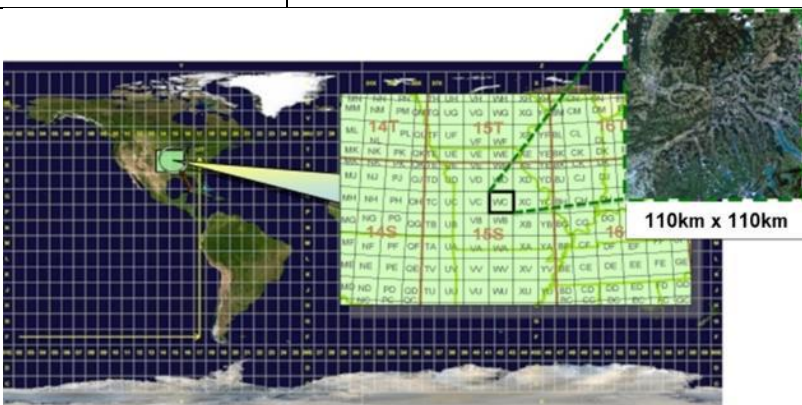


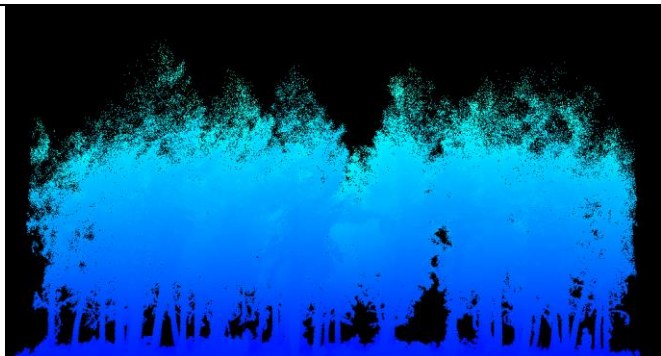
Valores que se obtienen

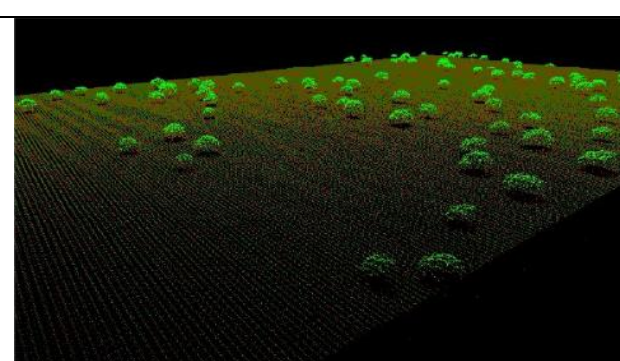
Medición de la resistencia a la flexión y compresión de la madera de árboles vivos.

Evaluación de la posible pudrición o degradación y destrucción de lignina de la madera del árbol.



Sentinel-2	
Descripción	
La misión Sentinel-2 de Copernicus está compuesta por una pareja de satélites (S2A y S2B) desfasados 180º permitiendo de esta forma un tiempo de revisita de 5 días, cuenta con un instrumento óptico que captura 13 bandas, 4 de ellas a 10m, 6 a 20 metros y 3 a 60 m de resolución. Está desarrollado por la ESA dentro del programa Copernicus.	
Ámbito de aplicación	Valores que se obtienen
Los principales usos de las imágenes multispectrales generadas por los satélites Sentinel-2 son la clasificación de masas forestales, seguimiento de la evolución de masas, detección de cambios (incendios, deforestación) y determinación de la biomasa.	Las imágenes que genera Sentinel-2, son imágenes multibanda, concretamente 13, abarcan desde el espectro visible (VIS) y el infrarrojo cercano (NIR) hasta el infrarrojo de onda corta a resoluciones espaciales entre 10 y 60 metros. Estas imágenes abarcan zonas de una extensión concreta (110x110 km²) en proyección UTM.
	

TLS – Leica BLK360	
Descripción	
El sistema TLS Leica BLK360 permite la obtención de una nube de puntos XYZ de una zona de entre 0,5 y 45 metros de distancia en un campo de visión de 360º horizontales y 270º verticales, generando hasta 680.000 pts/s. La precisión depende del modo, la mejor precisión es 4 mm a los 10 metros.	
Ámbito de aplicación	Valores que se obtienen El producto que se obtiene de la realización de los escaneos son nubes de puntos de alta densidad que permiten la generación de modelo tridimensionales de parcelas forestal, y de esta forma poder obtener mediciones de alta precisión de los árboles y su caracterización. 

ALS – PNOA-LiDAR	
Descripción	
El proyecto PNOA-LiDAR consiste en la cobertura del territorio español mediante una nube de puntos georreferenciados usando sensores LiDAR ALS. En 2009 comenzó la primera cobertura y en 2021 terminó la segunda. La nube de puntos tiene una densidad de 0,5 puntos con una precisión altimétrica de 20 centímetros	
Ámbito de aplicación	Valores que se obtienen Colección de puntos que incluyen sus coordenadas tridimensionales, así como otros parámetros adicionales. Los puntos se encuentran clasificados en diferentes categorías, asignándolos a diferentes clases que definen el tipo del objeto que refleja el pulso laser (edificios, vegetación, suelo...)
El ámbito forestal es uno de los campos en el que mayor potencial tiene la tecnología LiDAR. Esta tecnología permite "penetrar" la vegetación, obteniendo diferentes retornos de la señal emitida (copas de los árboles, del terreno y de vegetación intermedia). Los sensores ópticos no permiten este tipo de uso.	

7 Conclusiones

- La forma convencional de clasificación de la madera para uso estructural es mediante las normas UNE 56544:2022 y UNE-EN 1309-3:2018 para su clasificación visual y la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012 para su clasificación mecánica.
- La bibliografía estudiada muestra gran amplitud de técnicas no destructivas que permiten determinar las propiedades mecánicas de la madera tanto en árboles en pie como en apeados. La técnica más empleada y versátil por su utilización tanto en árboles en pie como apeados es la de emisión y recepción de ultrasonidos que permite predecir el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de rotura (MOR)
- El empleo del resistógrafo permite medir las diferencias de densidad interna del árbol y la determinación de anillos de crecimiento de forma poco agresiva e invasiva para arboles en pie.
- El fractómetro es un equipo de determinación de la clase resistente in situ de pequeñas muestras extraídas en campo de árboles en pie.
- En lo referente a las técnicas innovadoras basadas en la teledetección se decide emplear el Sentinel-2 puesto que su base de datos se actualiza cada 5 días y los datos son públicos, lo que permite llevar a cabo un seguimiento más exhaustivo de las masas analizadas.
- Se incorpora el uso del TLS – Leica BLK360 como sustitutivo del inventario tradicional por las posibilidades y mayor numero de datos que contempla la nube de puntos que genera en su medición.
- Se emplea los datos del ALS – PNOA-LiDAR, a pesar de que los datos que se encuentran actualmente disponibles son de 2009, se espera que a lo largo de este 2024 se incorporen los nuevos datos que se comenzaron a tomar en 2021 y se puedan incluir en el proyecto.

8 Bibliografía

Fassola, H. Galaret D. Winck R.A. (2020) Factibilidad de la clasificación de árboles en pie y rollizos de pinus taeda por sus aptitudes estructurales mediante métodos acústicos.

Wang, S. Carter, P. Ross, R.J. Brashaw, B.K. (2007) Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials - A path to increased profitability

Auty, D., & Achim, A. (2008). The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands. *Forestry* (London, England), 81(4), 475–487. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn015>

Moore, J. Lyon, A. (2009) The Use of Acoustic-Based NDT to Predict the Wood Properties of UK-Grown Sitka Spruce at Different Stages in the Wood Supply Chain

Ralph L. Amateis and Harold E. Burkhart. (2015). Use of the fakopp treesonic acoustic device to estimate wood quality characteristics in loblolly pine trees planted at different densities

Chiu, C.-M., Wang, S.-Y., Lin, C.-J., Yang, T.-H., & Jane, M.-C. (2006). Application of the fractometer for crushing strength: juvenile-mature wood demarcation in Taiwan (Taiwan cryptomerioids). *Journal of Wood Science*, 52(1), 9–14. <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0723-x>

Gendvilas, V. Lee, D.J. Kain, D.P. Kumar, C. Downes, G.M. Lausberg, M. and Harrington, J.J. (2023) Predicting Wood Density Using Resistance Drilling: The Effect of Instrument and Operator

Downes, G.M. Lausberg, M. (2016) Evaluation of the RESI Software tool for the prediction of HM200 within pine logs sourced from multiple sites across New Zealand and Australia

Hong, P. Jun, L. Xiangdong, L. Xuzhan, G. Jianfeng, Y. Shouzheng, T. (2021). Tree Age Estimation Based on Resistograph Stationary Kalman Filter

Hu, X., Zheng, Y., Liang, H., & Zhao, Y. (2020). Design and test of a microdestructive tree-ring measurement system. *Sensors* (Basel, Switzerland), 20(11), 3253. <https://doi.org/10.3390/s20113253>

Merlo, E., Alvarez, J. G., Santaclara, O., & Riesco, G. (2014). Modelling modulus of elasticity of *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain with standing tree acoustic measurements, tree, stand and site variables. *Forest systems*, 23(1), 153. <https://doi.org/10.5424/fs/2014231-04706>

Van Duong, D., Hasegawa, M., & Matsumura, J. (2019). The relations of fiber length, wood density, and compressive strength to ultrasonic wave velocity within stem of *Melia azedarach*. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 16(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s13196-018-0227-0>

Yin, Y., Nagao, H., Liu, X., & Nakai, T. (2010). Mechanical properties assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantation wood with three acoustic-based nondestructive methods. *Journal of Wood Science*, 56(1), 33–40. <https://doi.org/10.1007/s10086-009-1067-8>

Heasari, M. Z., Fallah, A., Shataee, S., Kalbi, S., & Persson, H. J. (2019). ESTIMATING THE FOREST STAND VOLUME AND BASAL AREA USING PLEIADES SPECTRAL AND AUXILIARY DATA. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W18, 1131–1136. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-4-w18-1131-2019>

Mantas, V., Fonseca, L., Baltazar, E., Canhoto, J., & Abrantes, I. (2022). Detection of Tree Decline (*Pinus pinaster* Aiton) in European Forests Using Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, 14(9), 2028. <https://doi.org/10.3390/rs14092028>

Reis, A. a. D., Carvalho, M. C., De Mello, J. M., Gomide, L. R., Filho, A. C. F., & Acerbí, F. W. (2018). Spatial prediction of basal area and volume in Eucalyptus stands using Landsat TM data: an assessment of prediction methods. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 48(1). <https://doi.org/10.1186/s40490-017-0108-0>

Pyörälä, J., Kankare, V., Liang, X., Saarinen, N., Rikala, J., Kivinen, V., Sipi, M., Holopainen, M., Hyypä, J., & Vastaranta, M. (2018). Assessing log geometry and wood quality in standing timber using terrestrial laser-scanning point clouds. *Forestry (London)*, 92(2), 177–187. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy044>

Kankare, V., Joensuu, M., Vauhkonen, J., Holopainen, M., Tanhuanpää, T., Vastaranta, M., Hyypä, J., Hyypä, H., Alho, P., Rikala, J., & Sipi, M. (2014). Estimation of the Timber Quality of Scots Pine with Terrestrial Laser Scanning. *Forests*, 5(8), 1879–1895. <https://doi.org/10.3390/f5081879>

Suarez, J.C., Gardiner, B.A., Di Luca, M., Goudie, J., Polsson, K., 2010. Consequences of stand structure on timber quality. In: *Silvilaser 2010*, September 14–17, Freiburg, Germany.

Luther, J. E., Skinner, R., Fournier, R., Van Lier, O. R., Bowers, W. W., Côté, J., Hopkinson, C., & Moulton, T. P. (2013). Predicting wood quantity and quality attributes of balsam fir and black spruce using airborne laser scanner data. *Forestry (London)*, 87(2), 313–326. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt039>

AIDIMME

INSTITUTO TECNOLÓGICO

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)

46980 Paterna. Valencia (España)

Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —

Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)

46980 Paterna. Valencia (España)

Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

aidimme@aidimme.es

www.aidimme.es