

# 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: INFORME DE RESULTADOS DEL PROYECTO**

**Programa:** Proyectos de I+D en colaboración con empresas

**Número de proyecto:** 22300053

**Expediente:** IMDEEA/2023/38

**Duración:** 01/07/2023 – 30/09/2024

**Coordinado en AIDIMME por:** Francisco Blasco



GENERALITAT  
VALENCIANA

IVACE+i INSTITUTO VALENCIANO  
DE COMPETITIVIDAD  
E INNOVACIÓN



Financiado por  
la Unión Europea

Este proyecto cuenta con el apoyo de la Conselleria d'Innovació, Indústria, Comerç i Turisme de la Generalitat Valenciana, a través del IVACE, y está financiado por la Unión Europea, a través del Programa FEDER Comunitat Valenciana 2021-2027.

**AIDIMME**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO



## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>PAQUETE DE TRABAJO 4</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PAQUETE DE TRABAJO 5</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>PAQUETE DE TRABAJO 6</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>PAQUETE DE TRABAJO 7</b>	<b>47</b>



## 1 PAQUETE DE TRABAJO 4

El objetivo del paquete de trabajo ha sido 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, se ha trabajado en 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, también se 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.

a) *Estado del arte de métodos de evaluación de la calidad de la madera mediante técnicas convencionales y no destructivas.*

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 afectarían a sus propiedades mecánicas.

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.

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.

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 Mor 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.

Existen en la actualidad diversos equipos de interés para clasificación de la madera.:

- 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.
- El equipo fakopp es otro equipo de emisión y recepción de ultrasonidos. A diferencia del equipo sylvatets, 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 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.
- Otro 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.
- Otro 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. El problema de este equipo es que no puede medir árboles en pie.
- 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.

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.

Como resultado de este estudio, 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

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. 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.

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) Una vez realizados los ensayos de ultrasonidos, se apearon 73 pies. 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). 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 de las técnicas de interés es 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.



*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.

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.

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

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.

c) Selección de métodos de evaluación de la calidad de la madera y herramientas de teledetección:

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, seleccionándose:

1. **Equipo sylvatest**
2. **Resistografo**
3. **Fractometro**
4. **Barrena pressler**

Por otr lado en cuanto a métodos innovadores basados en teledetección:

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 multiespectrales 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.

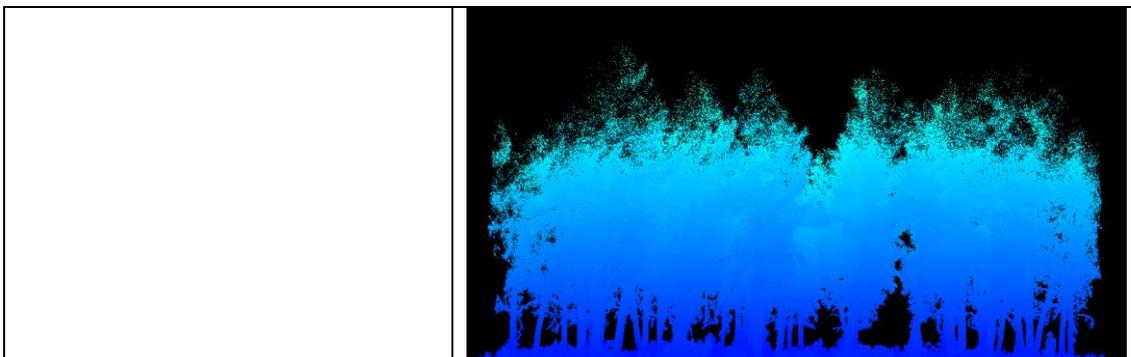
En cuanto a la **tecnología LiDAR terrestre, se ha optado por el láser escáner Leica BLK360**, es una herramienta de gran utilidad en el ámbito forestal debido a su capacidad para capturar nubes de puntos detalladas (680.000 puntos/segundo) y precisas de áreas boscosas. Su

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.

d) Elaboración fichas técnicas resumen:

De cada uno de las herramientas o métodos seleccionados se ha realizado una ficha:

<b>TLS – Leica BLK360</b>	
<b>Descripción</b>	
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 360° horizontales y 270° verticales, generando hasta 680.000 pts/s. La precisión depende del modo, la mejor precisión es 4 mm a los 10 metros.	
<b>Valores que se obtienen</b>	
<b>Ámbito de aplicación</b>	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.
El TLS posee la capacidad de registrar en detalle la estructura vertical y horizontal de una parcela de bosque, lo que le confiere una gran utilidad en la realización de inventarios forestales.	



## 2 PAQUETE DE TRABAJO 5

El este paquete de trabajo se ha realizado el análisis de las masas de *Pinus halepensis* de la Comunitat Valenciana, para seleccionar aquellas que tengan pies con alta calidad de madera, sean representativas y así obtener los parámetros y variables necesarias para modelos posteriores.

Se incluyen dos tareas, la primera de ellas, Tarea 5.1.- Análisis del estado de las masas de *P. halepensis* de interés. Composición específica y tipología de masas, que se basa en analizar las masas forestales de *P. halepensis* de la Comunitat Valenciana centrándose en qué características debe cumplir una masa forestal de esta especie en concreto para conseguir una adecuada calidad de madera. Además de obtener información que pueda tener relación con la calidad de madera de esas masas. De esta manera se consigue conocer las características que describen una masa de pino carrasco con calidad de madera aceptable.

Por otro lado, está la Tarea 5.2. - Selección de masas representativas de calidad de madera. En esta tarea se seleccionan las masas de *Pinus halepensis* donde se pueda encontrar una calidad de madera aceptable, tras un estudio y selección con herramientas SIG y gracias a las aportaciones del proyecto anterior (Woodforest Satellite) a este, que sirven de base y cuyos algoritmos ayudan a determinar las zonas con mayor volumen de este tipo de pino.

### a) Análisis del estado de las masas de *P. halepensis* de interés. Composición específica y tipología de masas.

El *Pinus halepensis* conocido comúnmente como pino carrasco es la especie de pino que ocupa una mayor superficie en España y, sin embargo, no se caracteriza por tener un notable aprovechamiento maderero debido a su madera generalmente considerada de baja calidad. El objetivo de este proyecto es revertir esa situación, y demostrar que este pino puede ofrecer madera de calidad y realizar así un aprovechamiento de su madera. Para ello, es necesario una caracterización de las cualidades que debe cumplir la madera para denominarse de calidad, un estudio de la historia de este pino y un análisis de la situación actual de su madera.

### Cualidades de la madera de calidad

La madera de calidad es aquella utilizada para usos generalmente estructurales, por tanto, será de calidad aquella madera que pueda resistir mayores esfuerzos estructuralmente y cuyas piezas puedan formar dimensiones lo suficientemente grandes como para formar estructuras.



*Figura 1. Madera para uso estructural de Pinus halepensis. Fuente: AIDIMME*

La madera, según el CTE (Código Técnico de la Edificación) se diferencia por clases resistentes en función de su resistencia, rigidez y densidad, la clasificación varía desde C14 hasta C50, de menor a mayor prestación:

**Tabla E.1 Madera aserrada. Especies de coníferas y chopo. Valores de las propiedades asociadas a cada Clase Resistente**

Propiedades		Clase resistente											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
<b>Resistencia (característica) en N/mm<sup>2</sup></b>													
- 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
<b>Rigidez, en kN/mm<sup>2</sup></b>													
- 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 5 <sup>o</sup> -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
<b>Densidad, en kg/m<sup>3</sup></b>													
- Densidad característica	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
- Densidad media	$\rho_{medio}$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Figura 2. Valores de las propiedades mecánicas asociadas a cada clase resistente. Fuente: CTE DB SE-M

Para que la madera tenga unos valores altos en esta clasificación, debe de estar libre, en la medida que sea posible, de defectos o singularidades. Sin embargo, la madera es un material natural que crece de forma aleatoria y, por ese motivo, siempre muestra alguna de estas singularidades. Cuando el objetivo es obtener madera de calidad se deben de reducir estas singularidades en las piezas seleccionadas para que la clasificación sea lo más alta posible.

### Historia del Pinus halepensis

Como se explica en el documento “La madera de pino carrasco – AITIM”, el Pinus halepensis tiene las masas actuales muy deterioradas por el efecto antrópico que ha recibido la especie a lo largo de la historia.

Ya en el siglo XVIII con la escasez de pinos tanto para construcción naval como para consumo local se ordena por orden del rey una serie de servicios de vigilancia para evitar ese tipo de deforestaciones. Sin embargo, para entonces el pino carrasco ya tenía poco valor para construcción naval debido al deterioro sufrido anteriormente. A pesar de ello, se seguía utilizando para forrar las embarcaciones de alquitrán o la obtención de carbón.

En el siglo XIX se sigue necesitando producto para la construcción naval y en este caso se utiliza como fuente de energía barata para herrerías, hornos, etc.

Todo este efecto antrópico hace que los pinares de carrasco se asentaran en suelo muy pobres y áridos, con una intensa antropización que dificultó ofrecer una madera similar a la del laricio o del silvestre.

A finales del siglo XIX los ingenieros de la época ya no la tenían en cuenta para construcción civil o naval, sin embargo, aun aprovechándola únicamente para traviesas de ferrocarril, combustible o cajas de embalaje, decían que, en buenas condiciones de suelo y espesura, adquieren un desarrollo normal y regular, ofreciendo un aprovechamiento de madera de sierra similar al de otras especies de pino.

Ya en la mitad del siglo XX ciertos investigadores explican que este pino suele presentar portes tortuosos y sus aplicaciones se limitan a cajerío o traviesas. Sin embargo, destacan que hay rodales en Alicante de este tipo de pino que sirven para madera de carpintería y construcción con unas características físico-mecánicas buenas.

Por todos estos motivos, no se puede caracterizar la madera de pino carrasco como mediocre o de mala calidad ya que ha sido el efecto antrópico el que ha deteriorado sus masas hasta tal punto que la calidad actual en algunas zonas es menor. Sin embargo, en zonas donde el deterioro no ha sido tan acusado siguen existiendo pinos que tienen unas características excelentes para la obtención de madera de calidad.

Además, este proyecto sirve para demostrar esa calidad y dar a entender que, si se realiza una gestión forestal sostenible de los montes, las masas de *Pinus halepensis* pueden mejorar y ofrecer un recurso económico muy interesante.

Este proyecto, también busca localizar esas masas donde no existe ese deterioro y deforestación tan acusada, la estación (suelo, temperatura, humedad, pendiente...) sigue siendo adecuada y, por tanto, en la actualidad aparecen pies de esta especie con una calidad de madera aprovechable.

La historia pasada y la visión actual del *Pinus halepensis* como ya se comenta anteriormente, no es buena, pero en muchas ocasiones no tiene fundamento. Sin embargo, provoca que normativas como CTE (Código Técnico de la Edificación) no la incluyan como especie que cumpla las características para utilizarse en construcción. Esto podría ser un indicador de ser una especie poco adecuada para ese fin, no obstante, la normativa francesa (NF B52-001-1) demuestra que la madera de pino carrasco sí que puede servir para construcción con unos valores buenos respecto a calidad de madera.

	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 27 →		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.*

Por tanto, en la norma española solo se necesita conocimiento sobre la especie y la calidad de madera que puede aportar para incluirla dentro del grupo de especies adecuadas para madera de calidad en España y así facilitar y promover su aprovechamiento forestal.

#### **Situación actual respecto a madera del *Pinus halepensis***

En este apartado se explica la situación del *Pinus halepensis* (pino carrasco) en España y en la Comunitat Valenciana en concreto.

	Formación arbolada	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
<b>Coníferas</b>	Pinar de pino carrasco ( <i>P. halepensis</i> )	2.070.959	11
	Pinar de pino albar ( <i>P. sylvestris</i> )	1.056.203	5
	Pinar de pino pinaster región mediterránea	814.882	4
	Pinar de pino salgareño ( <i>P. nigra</i> )	742.335	4
	Mezclas de coníferas autóctonas	659.875	3
	Pinar de pino piñonero ( <i>P. pinea</i> )	438.622	2
	Enebrales y sabinares	380.157	2
	Otros pinares y abetales	193.335	1
<b>Mixtas</b>	Mezclas coníferas y frondosas autóctonas	1.190.911	6
<b>Frondosas</b>	Dehesas	2.828.868	15
	Encinares ( <i>Q. ilex</i> )	2.785.315	14
	Mezclas de frondosas autóctonas	1.237.555	6
	Melojares ( <i>Q. pyrenaica</i> )	850.218	4
	Otras frondosas dominantes	509.509	3
	Hayedos ( <i>Fagus sylvatica</i> )	389.622	2
	Quejigares ( <i>Q. faginea</i> )	333.576	2
	Alcornocales ( <i>Q. suber</i> )	269.446	1
	Bosque ribereño	268.229	1
	Robledales de <i>Q. robur</i> y/o <i>Q. petraea</i>	247.332	1
<b>Otras</b>	Repoblaciones productoras, que incluye:	1.352.532	7
	Eucaliptales ( <i>Eucalyptus spp.</i> )	569.677	42
	Pinares de <i>Pinus radiata</i>	248.155	18
	Pinares de <i>Pinus pinaster</i> en la región biogeográfica atlántica	223.828	17
	Especies de producción en mezcla	179.192	13
	Choperas y plataneras de producción	97.434	7
	Otras repoblaciones productoras	34.246	3
	Otras alóctonas y mezcla de autóctonas con alóctonas	118.329	3

El *P. halepensis* es la conífera que más superficie forestal arbolada ocupa en el territorio español, 2,07 millones de ha (11 % del total), solo lo superan en ocupación de superficie las frondosas que componen las dehesas (15 % del total) y los encinares (14 % del total).

Por otro lado, los usos de la madera de *Pinus halepensis* han sido variados a lo largo de la historia, como se explica en el documento “La madera de pino carrasco – AITIM” desde los siglos IV y III a.C hasta la actualidad ha llevado una serie de usos. Se utilizó para hacer barcos, para la

extracción de pez por su alto contenido en resina y también se le dio usos estructurales, la problemática vino porque sus poblaciones se esquilmaron. Entonces, las zonas donde se encontraban estos pinos quedaron desiertas y la erosión hizo que perdieran la calidad de estación (suelo, humedad, etc.). A raíz de ello provocó que los pinos que habitaban en esas zonas no podían ofrecer grandes desarrollos debido a las condiciones en las que se encontraban y por eso no ofrecían buena calidad de madera.

En la actualidad ocurre lo mismo ya que se viene heredando esa tendencia, en las zonas más degradadas y difíciles es donde ha proliferado el pino carrasco (por su capacidad de habitar condiciones difíciles) con las implicaciones que eso ha traído (una menor calidad de madera) ya que otras especies de pino no pueden habitar en esas zonas. Por tanto, no significa que el pino carrasco no tenga buena calidad de madera, sino que se deben buscar aquellas zonas donde aparezcan pinos de calidad estudiando nuevos métodos para identificar qué pies ofrecen una buena calidad de madera.

A pesar de todo el uso principal del *Pinus halepensis* es la astilla (el 44%) por falta de conocimiento sobre la calidad de su madera como demuestra la siguiente tabla.

Especie	Destino principal estimado	Porcentaje estimado
CONIFERAS	SIERRA	42%
<i>Pinus radiata</i>	SIERRA	48%
<i>Pinus pinaster</i>	TABLEROS	37%
<i>Pinus sylvestris</i>	SIERRA	49%
<i>Pinus nigra</i>	SIERRA	33%
<i>Pinus halepensis</i>	ASTILLAS	44%
<i>Pinus pinea</i>	SIERRA	41%

*Principales destinos de las especies representativas en España en 2021. Fuente: MITECO.*

Que el principal destino del *P. halepensis* sea la astilla y no la madera de calidad conlleva que su precio sea menor como se ve en la siguiente tabla donde es más barato que casi cualquier otro pino.

ESPECIE	Propiedad		TOTAL (m <sup>3</sup> cc)	Precio CC.AA. (€/m <sup>3</sup> cc)		Precios licitación pública (€/m <sup>3</sup> )
	Pública	Privada		En pie	En cargadero	
<i>Pinus radiata</i>	318.921	4.335.196	<b>4.654.117</b>	26,5	33,7	22,6
<i>Pinus pinaster</i>	533.889	2.347.457	<b>2.881.346</b>	21,7	40,8	18,0
<i>Pinus sylvestris</i>	797.138	601.082	<b>1.398.220</b>	27,7	51,6	17,2
<i>Pinus nigra</i>	295.857	219.401	<b>515.258</b>	21,2	38,2	12,7
<i>Pinus halepensis</i>	44.586	195.554	<b>240.140</b>	19,8	38,9	4,2
<i>Pinus pinea</i>	47.737	109.385	<b>157.122</b>	14,9	36,2	14,6
Otros pinos	119.819	83.037	<b>202.856</b>	17,4	36,9	13,8
Otras coníferas alóctonas	25.886	55.412	<b>81.298</b>	31,8	55,2	18,3
Otras coníferas	52.449	10.940	<b>63.390</b>	26,7	47,0	11,2
<b>TOTAL CONÍFERAS</b>	<b>2.236.283</b>	<b>7.957.46</b>	<b>10.193.747</b>	<b>24,6</b>	<b>38,9</b>	<b>16,8</b>
<i>Eucalyptus spp.</i>	204.909	6.609.264	<b>6.814.174</b>	27,0	41,7	24,0

Estimación de precios según especies de pino en España en 2021. Fuente: MITECO.

Esta tendencia de uso y este bajo precio del *P. halepensis* es lo que se espera revertir con este proyecto para que se destine a usos en los que se utilice madera de calidad, así aumentar su precio y que aporte una rentabilidad económica adecuada. Pues como se demuestra con los gráficos anteriores, en la actualidad, existe un extenso recurso que apenas se está utilizando y en los casos en que sí, se destina a astillas u otros destinos que impiden que suba el precio de este producto, todo ellos por falta de conocimiento sobre la especie, lo que puede aportar y la manera de encontrar ese recurso de calidad dentro de montes que en determinadas zonas tienen calidades dispares donde el recurso óptimo es más costoso de encontrar.

b) Selección de masas representativas de calidad de madera

El objetivo de este punto es seleccionar 6 parcelas, 2 en cada provincia de la Comunidad Valenciana, estas masas a elegir deben ser representativas de un monte de *P. halepensis* con una clase de edad ya desarrollada como es el fustal. Pues lo que se busca son parcelas que sean válidas para su inventariado y un posible aprovechamiento forestal en el futuro, para la selección se empleará una metodología típica de un Sistema de Información Geográfico (SIG).

El SIG funciona como una base de datos geográfica (datos alfanuméricos) asociada a los objetos existentes en un mapa digital y dan respuesta a las consultas interactivas, analizando y relacionando diferentes tipos de información con una sola localización geográfica. Esto es, conectando mapas con bases de datos. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos, e inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando la posibilidad de relacionar la información existente para la obtención de resultados.

Mediante un software GIS, se determinan las posibles zonas donde colocar las parcelas. La ubicación real final de las parcelas de estudio se determinará en campo a partir de la selección de masas forestales seleccionadas en este apartado ya que da una orientación bastante fiable de donde se encuentran esas masas.

Como se ha comentado anteriormente, el software SIG permite el uso de diferentes capas de información geográfica que permite el análisis de zonas concretas, en nuestro caso, la Comunitat Valenciana. El ámbito de estudio de este proyecto es el forestal, concretamente la selección de parcelas de masas puras de *P. halepensis* en unas condiciones concretas. Para la selección adecuada de estas parcelas se establecen una serie de criterios que deben cumplir las masas forestales:

- Masas puras de *Pinus halepensis*.
- Gestión de la Generalitat y la Diputación.
- Volumen con corteza estimado (datos propios).
- Cercanía a caminos.
- Pendiente.
- Tamaño de parcela.

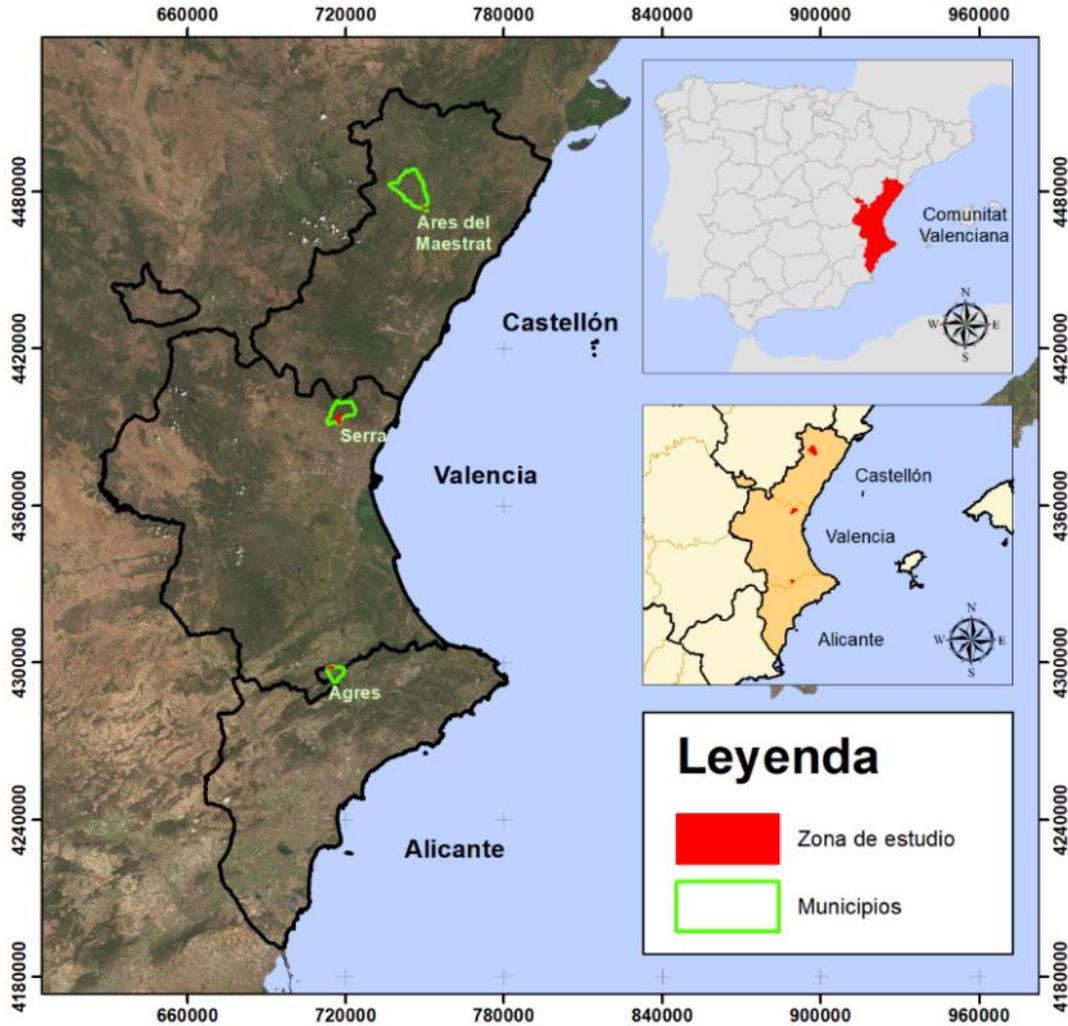
En resumen, de la extensión de 1.239 hectáreas de *Pinus halepensis* que se ha obtenido cumple con una serie de criterios específicos:

- Presenta un volumen con corteza superior a 100 m<sup>3</sup>/ha.
- Exhibe una pendiente menor al 25%.
- Se encuentra a menos de 200 metros de una carretera o camino.
- Tiene una superficie mínima de 1 hectárea

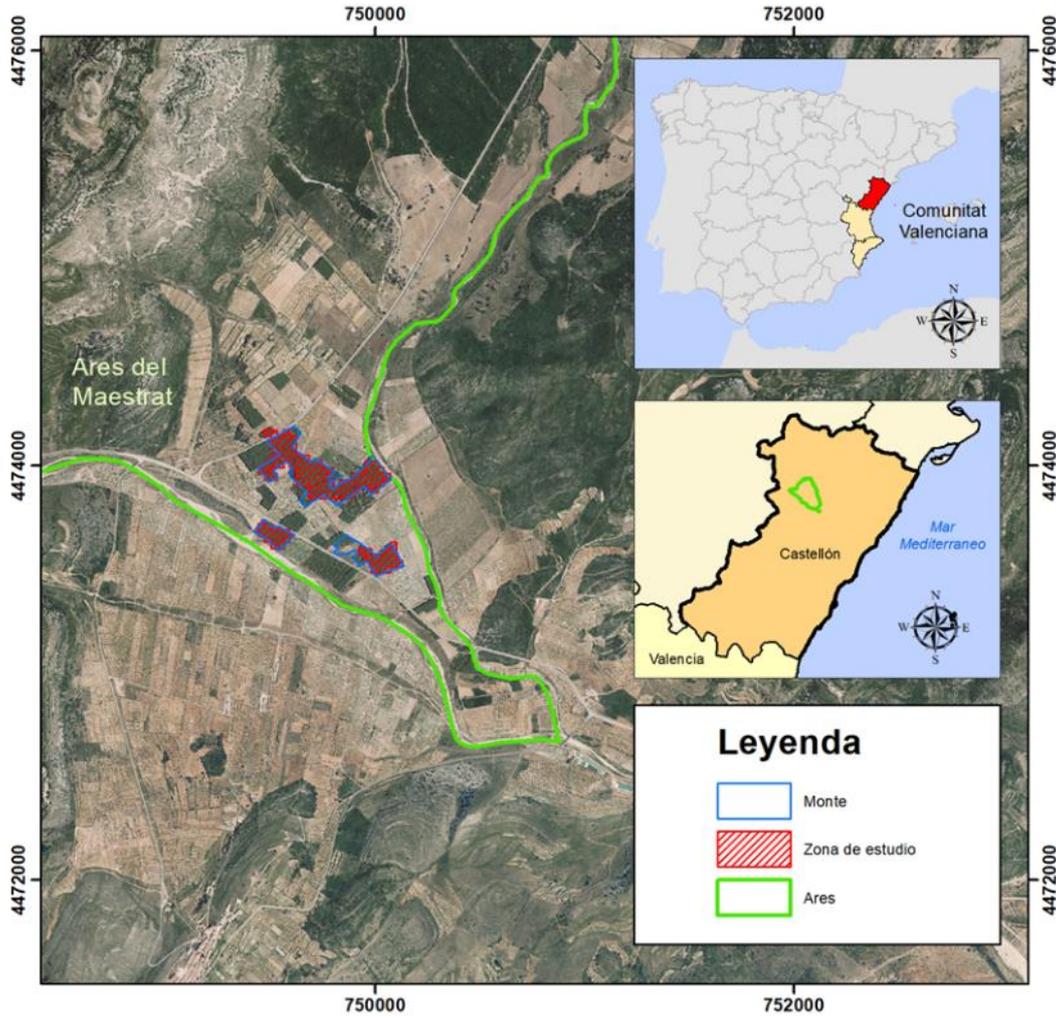
El objetivo principal de este proceso es identificar grandes áreas homogéneas que cumplan con los criterios mencionados anteriormente, con el fin de establecer 6 parcelas (2 por provincia) de 15 metros de radio en cada una. Es importante destacar que las parcelas actuales, conformadas por polígonos irregulares, no son las finales, sino las zonas donde se ubicarán las parcelas circulares de 15 metros de radio.

Se prioriza la selección de aquellas con mayor superficie inicialmente, para facilitar la disposición de las parcelas más pequeñas en etapas posteriores. Después de identificar las parcelas más extensas en cada provincia, se analizan para garantizar su separación entre sí y se verifica a través de imágenes satelitales si cumplen con las características de estudio, como masas puras y la presencia de caminos. Es importante tener en cuenta que este análisis es preliminar, ya que algunas características pueden no ser evidentes desde la vista satelital. La ubicación precisa se determinará durante las visitas de campo subsiguientes, cuyos resultados se reflejarán en entregables posteriores.

En las figuras siguientes se muestran las zonas seleccionadas:

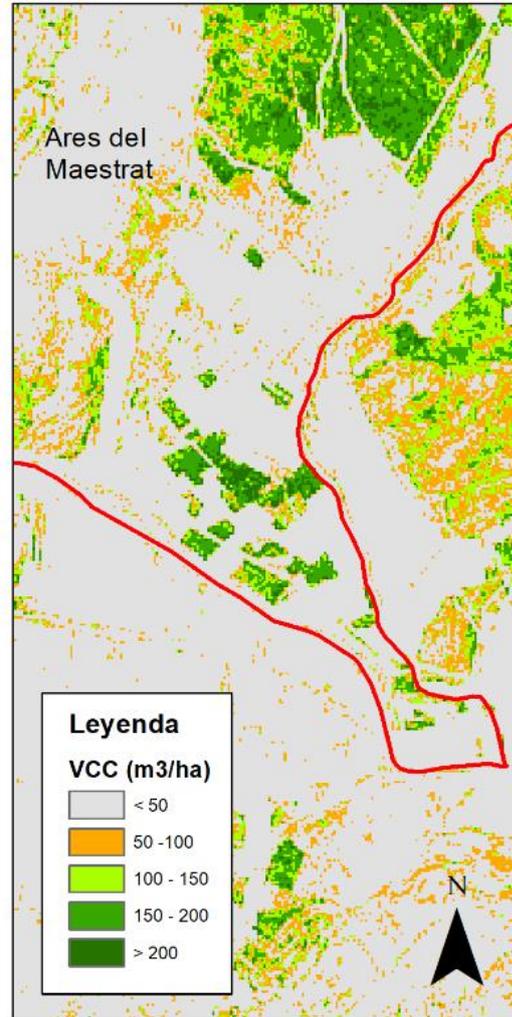


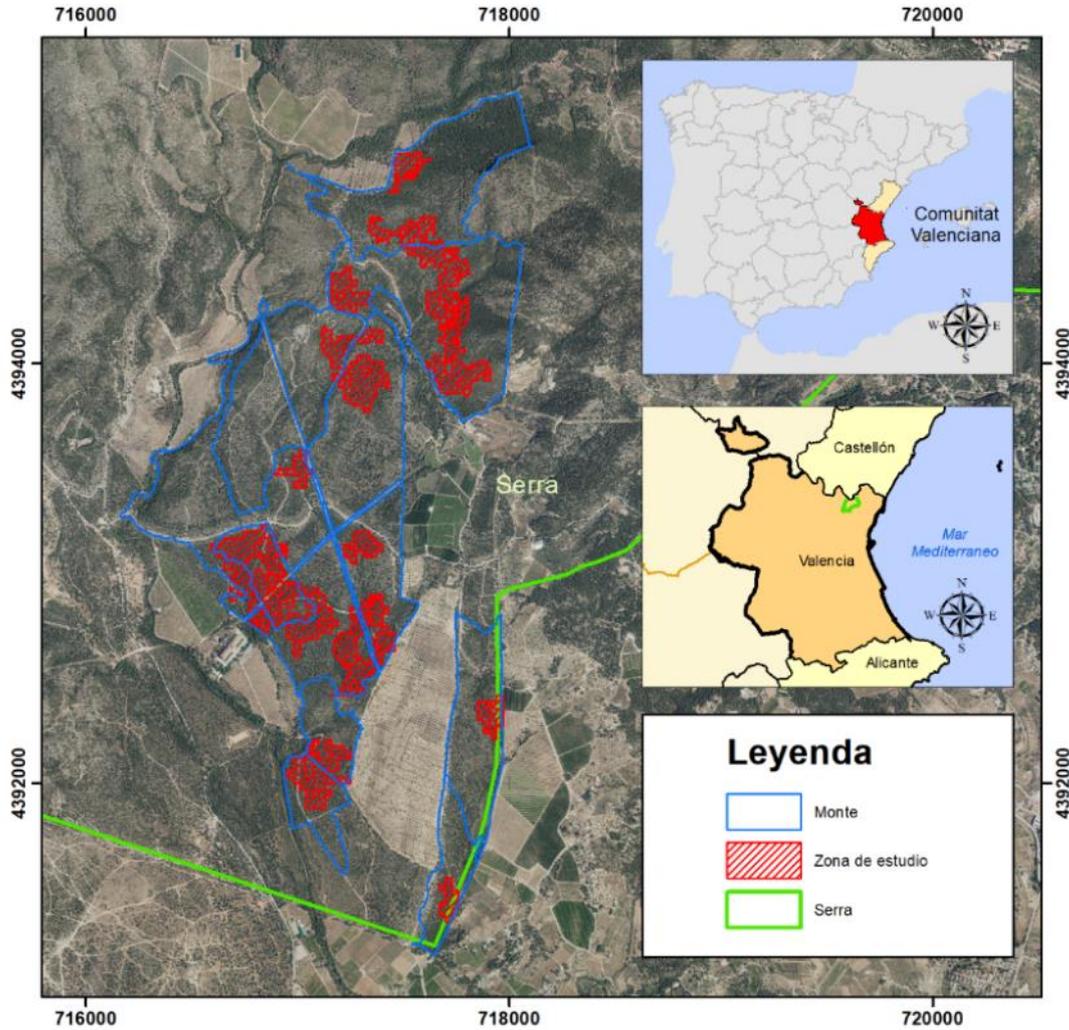
<b>AIDIMME</b> INSTITUTO TECNOLÓGICO		Mapa Zonas de estudio seleccionadas para la colocación de las 6 parcelas de estudio	
WOODBYSAT	Desarrollo de métodos de análisis no destructivos y por teledetección para la optimización de la explotación y mejora de la calidad de madera de <i>Pinus halepensis</i>		
Norte 	0 30 60 120 Kilometers 		Escala 1:2 000 000
	Sistema de referencia ETRS89	Proyección UTM	Huso 30



<b>AIDIMME</b> INSTITUTO TECNOLÓGICO		Mapa Zonas de estudio en la provincia de Castellón para la colocación de las parcelas de estudio	
WOODBYSAT	Desarrollo de métodos de análisis no destructivos y por teledetección para la optimización de la explotación y mejora de la calidad de madera de <i>Pinus halepensis</i>		
Norte 	0 0.375 0.75 1.5 Kilometers 		Escala 1:25 000
	Sistema de referencia ETRS89	Proyección UTM	Huso 30

OrtofototoPNOA de la zona de estudio Mapa de VCC de la zona de estudio





<b>AIDIMME</b> INSTITUTO TECNOLÓGICO		Mapa Zonas de estudio en la provincia de Valencia para la colocación de las parcelas de estudio	
WOODBYSAT	Desarrollo de métodos de análisis no destructivos y por teledetección para la optimización de la explotación y mejora de la calidad de madera de <i>Pinus halepensis</i>		
Norte 	0 0.375 0.75 1.5 Kilometers 		Escala 1:25 000
	Sistema de referencia	Proyección	Huso
ETRS89	UTM	30	3 \ 4

### 3 PAQUETE DE TRABAJO 6

La finalidad de este paquete de trabajo es conseguir una base de datos a través de la recogida de datos de campo, de teledetección y mediante técnicas convencionales que permita tener suficientes variables como para conocer la calidad de la madera en aquellas parcelas de interés.

En primer lugar, se explican las zonas de donde se van a obtener los datos. Aquellas parcelas procedentes del estudio del entregable 5.1, las parcelas del proyecto anterior (WOODFOREST SATELLITE) y unas zonas con posibilidad de cortar pinos para la investigación.

Una vez conocidas las zonas de estudio y desarrollando la Tarea 6.1. Toma de datos en campo de los pies seleccionados se procede a recoger datos tanto de campo como de teledetección de las parcelas y lo árboles comentados en el párrafo anterior, diferentes variables dependiendo de cada uno de ellos.

A continuación, se procede a llevar a cabo la Tarea 6.2. Toma de datos mediante técnicas convencionales que se basa en la recogida de datos tras las pruebas convencionales que exige la normativa para madera estructural.

Finalmente, la Tarea 6.3 Generar una base de datos, consiste como su propio nombre indica, generar una base de datos con toda la información recogida en las tareas anteriores que posteriormente se utilizará para estudiar los modelos y variables del entregable 7.1.

- a) Selección de zonas de estudio y esquema de los trabajos realizados. Toma de datos.

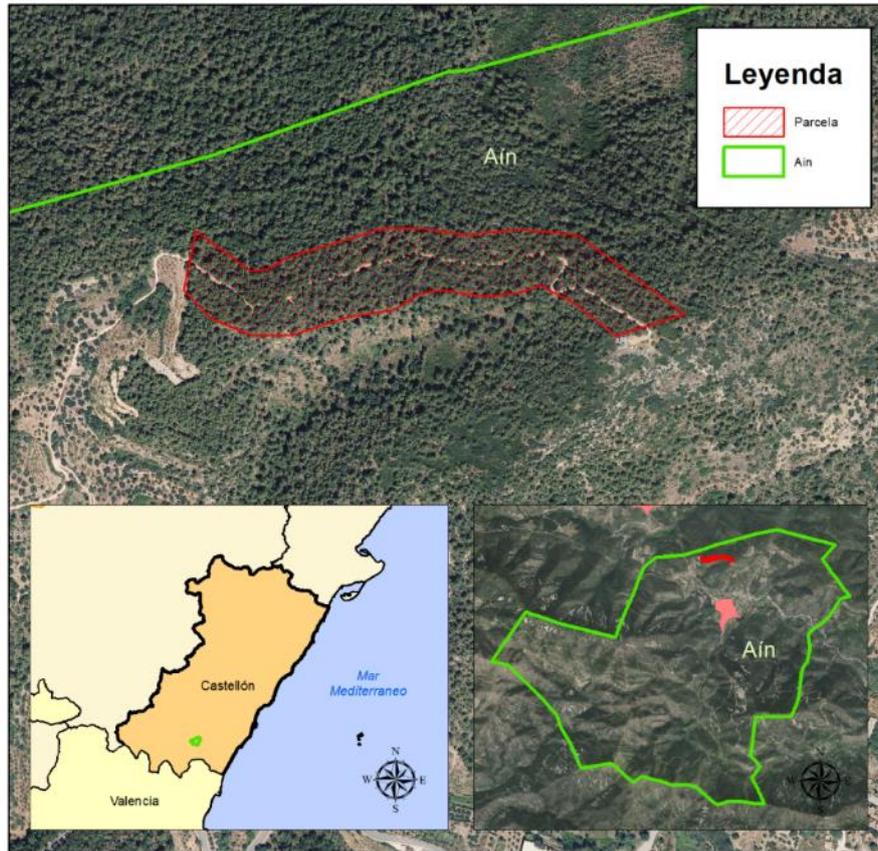
#### **Parcela de Ain.**

Las zonas de estudio están compuestas por 25 pinos que se estudian en una zona cortafuegos de Ain (Castellón) con posibilidad de extracción para el estudio de la madera, las 15 parcelas ya estudiadas en el proyecto anterior (WOODFOREST SATELLITE) del que este proyecto es continuación y 6 nuevas parcelas que aparecen tras el estudio realizado en el entregable 5.1.

Estas zonas de estudio seleccionadas se escogen cumpliendo los parámetros y premisas preestablecidos con el fin de incrementar y aumentar los datos y la información ya recogida en el proyecto anterior WoodForest Satellite.

Como novedad, se incluye una parcela o zona de muestreo en el término de Ain en el que se va a poder medir tanto las variables de los árboles en pie con técnicas convencionales y no destructivas, como las variables destructivas puesto que se van a poder apelar los árboles seleccionados. Con la obtención de estas nuevas variables, se pretende comparar los valores reales de rotura y calidad con los medidos mediante técnicas no destructivas e inventario para ajustar el modelo de calidad.

Dentro del plan de ensayo y trabajos a realizar en campo, se incorpora la medición mediante ultrasonidos en las 21 parcelas de estudio y en los pies analizados de Ain. Con la medición de emisión y recepción de ultrasonidos se pretende medir la calidad de la madera de los árboles en pie. Se complementa el inventario de las parcelas nuevas con inventario mediante TLS, con esta metodología, se pretende agilizar el proceso de inventario minimizando los tiempos de medición en campo. Otra novedad incorporada en el plan de ensayos es la de la medición de anillos de crecimiento mediante resistografía y extracción de barrena pressler. Ambas técnicas se consideran no destructivas o poco invasivas y con ellas se pretende determinar los crecimientos anuales de los árboles sin necesidad de apearlos y extraer una sección del fuste. Junto a los ensayos instrumentales, se realizan mediciones de la calidad visual de los árboles de cada parcela y de los analizados en Ain para determinar si la calidad visual guarda correlación con la calidad de madera de los mismos.



<b>AIDIMME</b> INSTITUTO TECNOLÓGICO		Mapa	
		Localización de 25 pinos en Ain para la extracción de la madera	
WOODBYSAT	Desarrollo de métodos de análisis no destructivos y por teledetección para la optimización de la explotación y mejora de la calidad de madera de <i>Pinus halepensis</i>		
Norte 	0    87.5    175    350 Meters 		Escala 1:5 000
	Sistema de referencia	Proyección	Huso
	ETRS89	UTM	30
			Nº Mapa

Previamente a efectuar ninguna prueba se localización los 25 árboles que cumplen con los requisitos para posteriormente realizar pruebas de rotura (dimensiones suficientes para formar vigas) y se marcan para facilitar la posterior realización de las pruebas y que los operarios que allí trabajan dejen trozas de unas dimensiones ligeramente superiores a 2 metros una vez cortados. Estas trozas de 2 metros son las que posteriormente se extraen del monte y se llevan al aserradero para formar vigas y realizar las pruebas.

Antes de realizarse la corta y con los árboles en pie se realizan las siguientes mediciones:

- Medición del diámetro.
- Calidad visual del árbol en pie.
- Mediciones indirectas con el Sylvatest 4 a 1 y 2 m.
- Fractómetro en los primeros 10 árboles.

Justo después de realizar la corta con el árbol en verde:

- Mediciones directas con el Sylvatest 4.
- Obtención de la densidad y cálculo del MOE y el MOR.
- Mediciones con el Fakopp.
- Resistógrafo en la parte inferior del árbol (para comparar anillos con rodaja en la que se ven los anillos).
- Corte de rodaja en la parte inferior del árbol.

Una vez medidos estos datos se procede a llevar las trozas a un aserradero que se ocupa de cortar y secar las trozas para que formen vigas de 10 x 7 cm.

Con las vigas secas y dimensionadas se realizan las siguientes pruebas:

- Mediciones directas con el Sylvatest 4.
- Rotura con métodos convencionales.

### **Parcelas proyecto WOODFOREST SATELLITE.**

En el proyecto WOODFOREST SATELLITE se estudiaron 15 parcelas a lo largo de la Comunitat Valenciana, 5 por cada una de las provincias.

En estas parcelas (en los 5 primeros árboles de cada una) se evalúa:

- Calidad visual del árbol en pie.
- Mediciones indirectas con ultrasonidos Sylvatest 4 a 1 metro.

En los 2 primeros árboles de cada una se evalúa:

- Extracción y almacenamiento de tubillón de crecimiento con barrena de pressler (a 1,3 m, altura estandarizada para el estudio de árboles en pie).
- Resistografías paralelas a tubillón de crecimiento (a 1,3 m)

### **Parcelas nuevas**

El estudio realizado en el entregable 5.1. sirve para localizar tres zonas (una por provincia) con facilidad para albergar calidad de madera, hasta este punto se tienen las zonas, pero para especificar el estudio se tienen que colocar dos parcelas por cada una de dichas zonas (Ares, Serra y Agres).

El resultado es el siguiente:

- Ares: parcelas 16 y 17.
- Serra: parcelas 18 y 19.
- Agres: parcelas 20 y 21.

Aquí se muestra un esquema de los trabajos y la toma de datos en las parcelas nuevas:

En los 5 primeros árboles de cada una se realiza:

- Marcado de la numeración con spray.
- Calidad visual del árbol en pie.
- Mediciones indirectas con ultrasonidos Sylvatest 4 a 1 metro.

En los 2 primeros árboles de cada una se evalúa:

- Extracción y almacenamiento de tubillón de crecimiento con barrena de pressler (a 1,3 m, altura estandarizada para el estudio de árboles en pie).

En un árbol representativo de la parcela:

- Muestra de densidad representativa de la parcela.

En toda la parcela:

- Inventario forestal con TLS.

Respecto a la teledetección, se obtienen los datos de sentinel y pnoa actualizados para posteriormente compararlos con los datos recogidos de campo.

### Trozas Incofusta

Se adquieren 17 trozas de *Pinus halepensis* por medio de la empresa Incofusta, S.L., para completar las trozas que se extrajeron de la parcela de Ain (de la 1 a la 25), las cuales se numeran a partir del último número de estas (de la 26 a la 42).

El objetivo de incluir estas trozas es el de complementar los ensayos destructivos de rotura con los no destructivos previos a la misma. En este caso no se pueden realizar las mediciones en el árbol en pies, pero si justo después de su apeo.



Una vez marcadas para distinguirlas, se les realiza los siguientes ensayos:

- Mediciones directas e indirectas con el Sylvatest 4.
- Obtención de la densidad, humedad y cálculo del MOE y el MOR, mediante corte de rodaja.
- Medición con resistógrafo en la parte inferior del árbol (para comparar anillos con rodaja en la que se ven los anillos)



Las mediciones con los equipos se muestran en las siguientes imágenes:

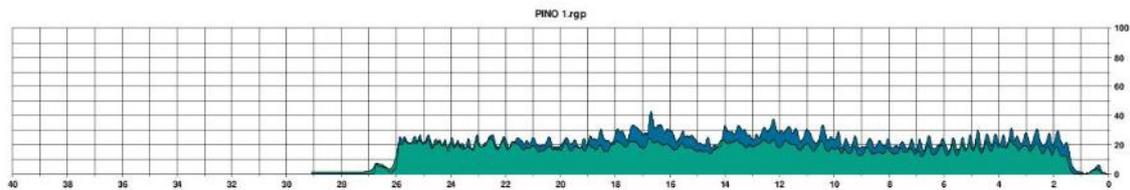




b) Procesado de los datos obtenidos con el resistógrafo

Se realiza una resistografía en la base de cada árbol apeado en Ain y se extrae una rodaja de la

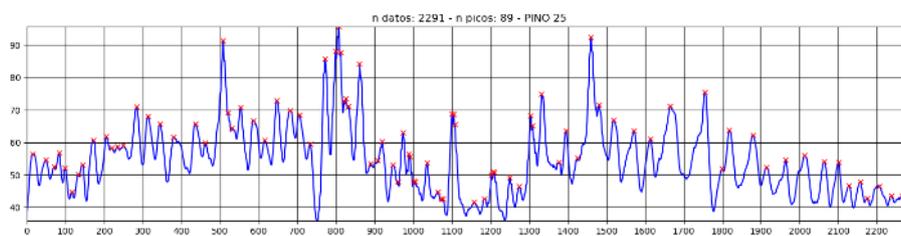
zona donde se realiza la resistografía. El resistógrafo genera un perfil resistográfico (gráfica) que registra el avance real de la broca y los cambios de densidad o resistencia al avance que ofrece la madera a la broca del equipo.



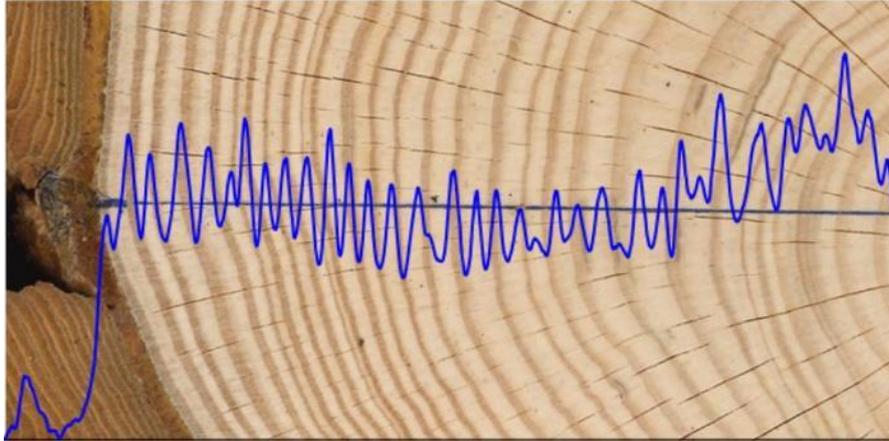
Tal y como se observa en la gráfica anterior, el perfil muestra crestas y valles que corresponden con los anillos de crecimiento del árbol que presentan variedad de densidad producidos por la madera temprana y tardía presentes en cada anillo. Este tipo de crestas y valles son generadas fundamentalmente por los anillos de crecimiento, no obstante, se pueden dar picos que no correspondan a estos anillos sino, a la presencia de nudos o anomalías y a agrupación de anillos por crecimientos bajos o anillos dobles presentes en esta especie.

Para poder mejorar la predicción y medición de anillos de crecimiento, se emplea un programa en lenguaje Python. A través de dicha programación, se pretende detectar de forma más exhaustiva los cambios de densidad producido por el desarrollo de los anillos de crecimiento.

El programa se configura para detectar los cambios bruscos de densidad con tres niveles de sensibilidad que permitan detectar tanto anillos muy bien marcados y diferenciados como aquellos que por crecimientos más bajos están muy juntos y presentan una menor diferencia entre los picos y los valles. Además, se establece una línea de código que detecte el primer cambio brusco de densidad que delimita la corteza con la madera para evitar mediciones erróneas de anillos en la corteza.



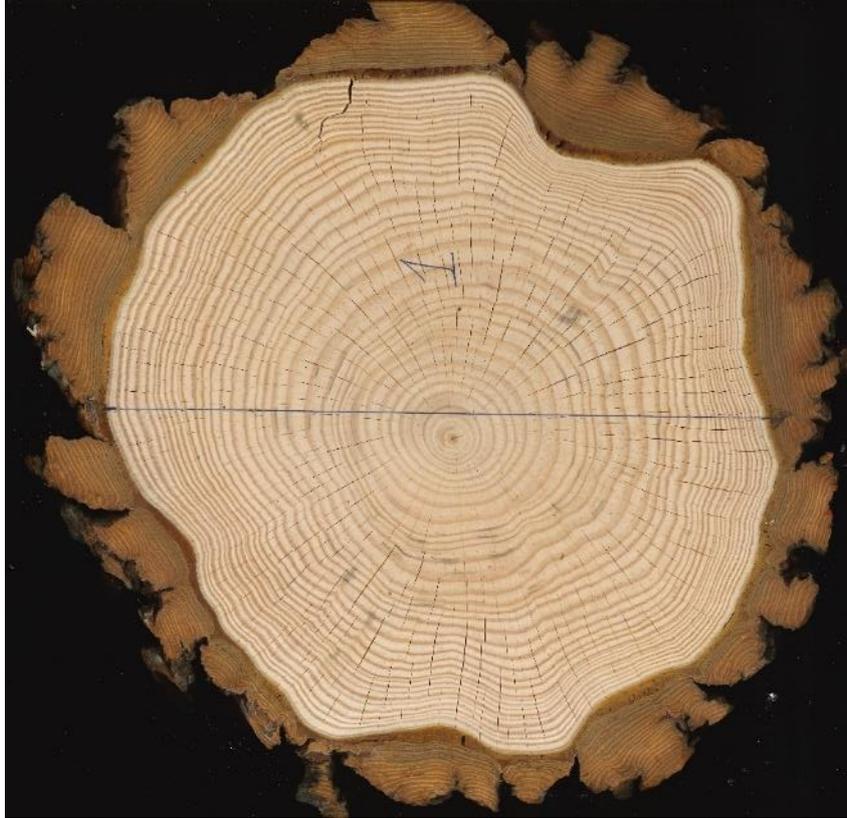
Cabe destacar que el programa identifica los picos marcados por la gráfica de la resistografía. Observando las imágenes siguientes, vemos que para anillos bien marcados el resistógrafo representan de forma muy clara los picos y los valles, pero a medida que la resistografía se acerca a la zona central o pasa por zonas donde los anillos están muy agrupados, esta no es capaz de marcar de forma tan precisa estos picos. De esto se deduce que la precisión del equipo de resistografía no permite identificar anillos con un espesor inferior a 1-2mm.



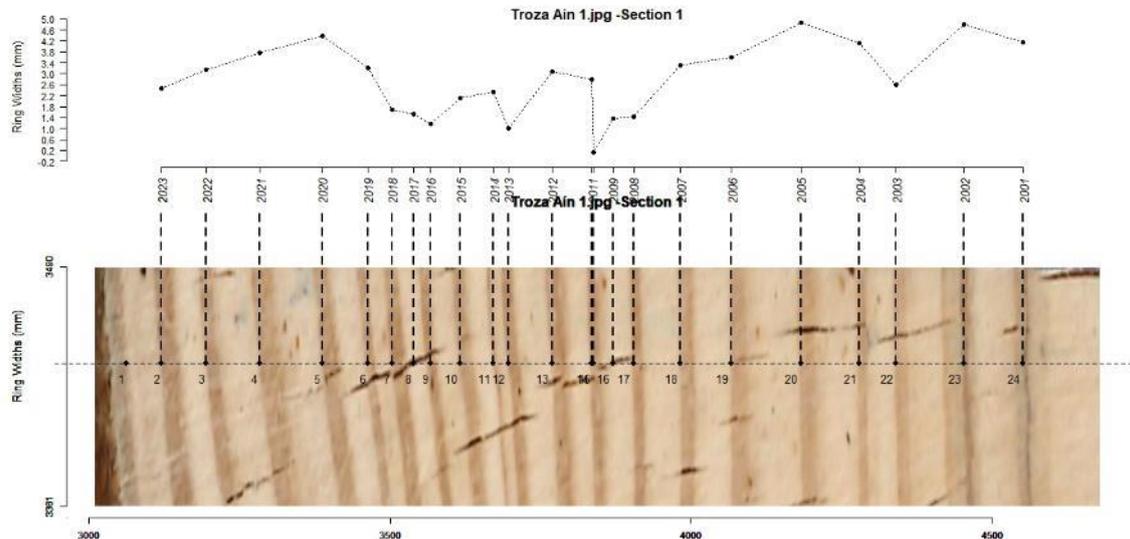
#### Procesado de los datos de las rodajas

Una vez obtenidas las rodajas de los 25 pinos seleccionados en Ain, estas se secan en estufa hasta alcanzar la humedad de equilibrio higroscópico y se lija una de las caras, en la que posteriormente se marca la dirección de entrada y de salida del ensayo de resistografía realizado en campo.

Una vez acondicionada la cara de las rodajas, estas se escanean y fotografían a escala 1:1 para poder analizarlas con el programa MtreeRing. Este programa se emplea para el procesado de imágenes de forma semiautomática para la medición de anillos de crecimiento de las muestras seleccionadas. Dada la particularidad del crecimiento de la madera que en función de la estación en la que se encuentre tendrá unos crecimientos distintos, el programa permite modificar la sensibilidad de detección y a su vez permite trabajar desde línea de comando como a través de una interfaz gráfica.



Una vez introducida la imagen de la sección de muestreo, se debe de delimitar la zona de análisis. Se establece una caja en sentido radial sobre la que el programa establece el conteo de anillos en función del grado de sensibilidad marcado. Una vez ejecutado el programa, es necesario llevar a cabo un último ajuste de forma manual. Al trabajar con imágenes el programa selecciona aquellos puntos de mayor contraste, no obstante, la sección puede presentar ciertas particularidades o anomalías que pueden ser identificadas como anillos, tales como manchas de resina, fendas producidas por el secado etc. Otro aspecto que destacar es la presencia de anillos dobles en esta especie, que puede dar lugar al conteo de dos anillos cuando en realidad es solo uno. Con este último ajuste manual, se corrige esos posibles errores y se marcan aquellos anillos que por presentar menor distancia entre ellos el programa no es capaz de identificar.



c) Toma de datos de teledetección

En el entregable E4.1 se describen las tres técnicas de toma de datos basadas en la teledetección, estas son: imágenes satelitales (Sentinel-2), nubes de puntos tomadas por ALS (LiDAR-PNOA) y nubes de puntos tomadas por TLS (Leica BLK360). La metodología TLS ya se ha explicado en el anterior apartado 3.3.2 “Inventario forestal con TLS”, por lo tanto, solamente se detallan las técnicas restantes.

1. Sentinel-2

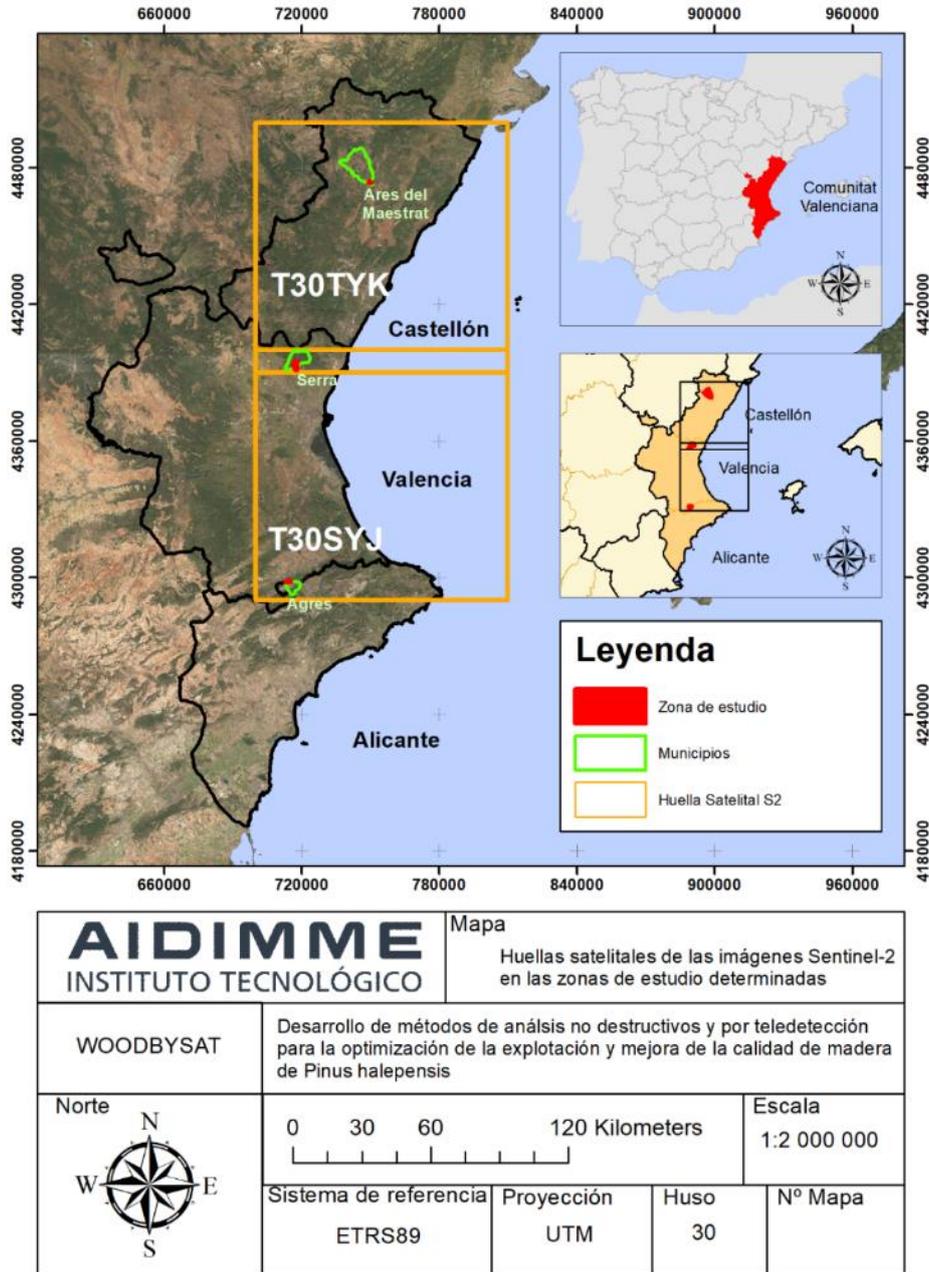
Las imágenes satelitales de Sentinel-2 tienen como objetivo recopilar información multispectral y multitemporal de las parcelas seleccionadas. Las imágenes multispectrales que se van a emplear son las generadas por los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B, desarrollados y lanzados por la Agencia Espacial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

Las distintas bandas de las imágenes Sentinel-2, nos permite generar variables explicativas del comportamiento de las masas forestales de cada una de las parcelas seleccionadas. Concretamente las características de la vegetación que influyen en las bandas de las imágenes son, los niveles de pigmentación, el contenido de agua de las hojas y su estructura.

Una vez geolocalizadas las parcelas de estudio se procede a programar el script para la descarga de las imágenes satelitales a través del portal Google Earth Engine (GEE). La estructura del código programado sigue la siguiente estructura:

- 1) Selección de la colección de imágenes Sentinel-2.
- 2) Selección del periodo de recopilación de datos (2019 - 2023).
- 3) Enmascaramiento de las imágenes mediante algoritmo S2Cloudless.
- 4) Incorporación de la localización de las parcelas de estudio.
- 5) Cálculo de los índices espectrales.

6) Creación de archivo CSV con los valores para los diferentes periodos.



## 2. LiDAR PNOA

Mediante sensores LiDAR el proyecto PNOA-LiDAR obtiene una representación tridimensional del territorio español, empezando la primera cobertura el año 2008 y actualmente habiendo terminado la segunda cobertura y a fecha de 2023 comenzando la tercera cobertura. Los datos

LiDAR son datos abiertos, con uso gratuito y licencia de distribución gratuita, proporcionados por el Centro de Nacional de Información Geográfica (CNIG).

En este caso se trabaja con un total de 6 archivos de nubes de puntos en formato LAZ, que es el archivo obtenido de la compresión de un archivo LAS. La mayor parte de sistemas y aplicaciones LiDAR trabajan con un mismo formato, el formato LAS, cuya especificación se desarrolla por la American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS), y que se ha convertido en el estándar para trabajar con nubes de puntos LiDAR.

LAS es un formato de archivo público que permite el intercambio de ficheros que contienen información de una nube de puntos tridimensional. El formato LAS es un archivo binario que mantiene toda la información procedente del sistema LiDAR y conserva la misma según la propia naturaleza de los datos y del sistema de captura.

Estos 6 ficheros están distribuidos generalmente en teselas de 2x2 km de extensión, pertenecientes a tres lotes de vuelo:

- VAL: correspondiente a la provincia de Valencia, tomada el año 2015 con una densidad de puntos de 0,5p/m<sup>2</sup>, y sistema de referencia de coordenadas ETRS89 UTM Huso 30.
- MUR-VAL-CLM: correspondiente a la provincia de Alicante, Murcia y parte de Castilla la Mancha, tomada en 2016 con una densidad de puntos de 0,5p/m<sup>2</sup>, y sistema de referencia de coordenadas ETRS89 UTM Huso 30.
- CLM-CAS: correspondiente a la provincia de Castellón y parte de Castilla la Mancha, tomada el año 2017 con una densidad de puntos de 1 p/m<sup>2</sup>, y sistema de referencia de coordenadas ETRS89 UTM Huso 30 y 29 en las zonas correspondientes.

Un ejemplo de nomenclatura de archivo LiDAR-PNOA es el siguiente;

Archivo LiDAR: PNOA\_2015\_VAL\_652-4334\_ORT-CLA-CIR.laz

Donde la primera parte corresponde al año de captura (2015), la segunda al lote al que pertenece (VAL: Valencia), los dos números siguientes indican las coordenadas en kilómetros de la esquina superior izquierda del fichero (X=652, Y=4334) y las últimas tres siglas indican:

- ORT: Las altitudes son ortométricas.
- CLA: El fichero se encuentra clasificado automáticamente según los estándares del ASPRS.
- CIR- Los puntos tienen información de Infrarrojo procedente de otro vuelo en la misma zona. Las otras opciones, para este apartado son: IRC- Los puntos tienen información de Infrarrojo procedente tomada en el mismo momento que los datos LiDAR. RGB- Los puntos tienen información de color (RGB) procedente a la ortofoto tomada en el mismo momento que los datos LiDAR. COL- Los puntos tienen información de color procedente a la ortofoto correspondiente del PNOA-Imagen.

FUSION 4.40 es un software gratuito para el tratamiento de datos LiDAR desarrollado por el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), proporciona un entorno de visualización 3D para el examen y valoración de datos geoespaciales. Combina imágenes, datos LiDAR, capas SIG, datos de campo y modelos de superficie.

Además, dispone de una herramienta denominada FUSION-LTK, que funciona a través de líneas de comandos ejecutables a través del símbolo del sistema. Esta herramienta proporciona gran cantidad de procesos, como filtrado de puntos de suelo, filtrado de puntos erróneos, evaluación de calidad de datos LiDAR, entre otros. Además, cada uno de los programas tienen disponibles switches que permite modificar los parámetros ajustables de los mismos. Entre los programas disponibles, se han creado un flujo de trabajo con el uso de los siguientes programas:

- MergeData: combina varios archivos de nubes de puntos en un único archivo. Se crea un archivo de texto con la ruta a los 6 archivos LAZ y se introduce como dato de entrada para el programa,

MergeData [switches] DataFile OutputFile

MergeData ListaArchivosLiDAR.txt Union\_LiDAR.LAZ

- PolyClipData: realiza un recorte de la nube de puntos según una geometría poligonal en el formato ESRI shapefile. Genera un único archivo que contiene todos los puntos que se encuentran dentro de los polígonos, sin embargo, al aplicar el switch multifile se genera uno por cada polígono. El archivo de polígonos corresponde a las 15 parcelas circulares de 15 metros de radio y el archivo a recortar es el generado de la unión (figura 23).

PolyClipData [switches] PolyFile OutputFile DataFile

PolyClipData [/multifile] Parcelas.shp Clip\_Union\_LiDAR.LAZ Union\_LiDAR.LAZ

- Catalog: genera un conjunto de reportes descriptivos de los datos LiDAR empleado para la evaluación de las nubes de puntos y para comprobar el número de puntos y densidad (Tabla 5).

Catalog [switches] datafile [catalogfile]

Catalog Clip\_Union\_LiDAR.LAZ Catalog\_Woodforest

- CloudMetrics: genera un conjunto de parámetros estadísticos descriptivos del conjunto de datos LiDAR. Para la generación de las estadísticas emplea los valores de elevación e intensidad. Las estadísticas que genera por cada parcela son las siguientes:

Para el cálculo de las alturas, además de todo lo explicado y ejecutado con el programa Fusion, se genera un Modelo Digital de Elevación (MDE), para ello se utilizan los datos clasificados por

el PNOA como suelo y a continuación se genera una superficie mediante la interpolación de dichos puntos. Este MDE representa la superficie del suelo, pero también contiene los datos de altitud de cada punto, de este modelo se puede obtener pendiente, orientación, curvas de nivel, etc.

Después de este MDE, se genera un Modelo Digital de Superficie (MDS), en el cual se utilizan los datos de los primeros retornos (valores con elevación máxima), los cuales representan las copas de los árboles.

Una vez obtenido el MDS y el MDE, se procede a normalizar esta nube de puntos, este proceso se ejecuta de la siguiente manera MDS –MDE, debido a que el MDS, tiene los datos de las copas con la altitud sobre el nivel del mar y no sobre el suelo. Al restarle el MDE, este factor se elimina generando el modelo digital de superficies normalizado con respecto al terreno (nMDS), también llamado modelo de alturas de vegetación en aplicaciones forestales.

d) Toma de datos convencionales en laboratorio

Además de los ensayos realizados en campo, se realizan una serie de ensayos de laboratorio en las instalaciones de AIDIMME. Dado que solo se ha podido apearse árboles en la zona de Ain, los ensayos de laboratorio solo se realizarán sobre las trozas de esta parcela y las suministradas por incofusta.

Una vez seleccionadas y clasificadas las trozas, se procede a su aserrado y escuadrado para obtener las vigas de 10x7cm de sección y 2 metros de longitud. El proceso se lleva a cabo en varias fases, en las que en primer lugar se obtienen tablones de un espesor superior al espesor final deseado, puesto que después del proceso de secado se produce una merma del material a consecuencia de la pérdida de humedad hasta llegar a la humedad de equilibrio higroscópico (8-12%).

Una vez obtenidos los tablones, estos se seccionan longitudinalmente para dar lugar a vigas de sección ligeramente superior a 10x7 cm que se empaquetan y se llevan a secadero.



Las vigas se marcan con el número de identificación correspondiente a la troza de la que han sido extraídas.



Se recibe las tozas en las instalaciones de AIDIMME ya escuadradas a las dimensiones indicada y secas hasta alcanzar la humedad de equilibrio higroscópico comprendida entre el 8-12% tanto de las trozas de Ain como de las trozas suministrada por incofusta.



Sobre las vigas recibidas, se establece el siguiente plan de ensayos de laboratorio:

- Medición directa con Sylvatest 4
- Ensayo de rotura según norma UNE-EN 408:2011+A1:2012

#### **Medición directa Sylvatest 4**

Sobre las vigas extraídas de las trozas seleccionadas, se lleva a cabo la medición de ultrasonidos de forma directa. Con el fin de poder comparar los valores obtenidos en verde con los obtenidos con la madera seca y la rotura real. Para ello se disponen las vigas sobre un banco de trabajo y se realizan los orificios para alojar los sensores y realizar la medición.

Previo a su medición, las vigas se retestean todas a la longitud de 2 metros para que los ensayos realizados posteriormente sean todos con los elementos a la misma longitud y sección.

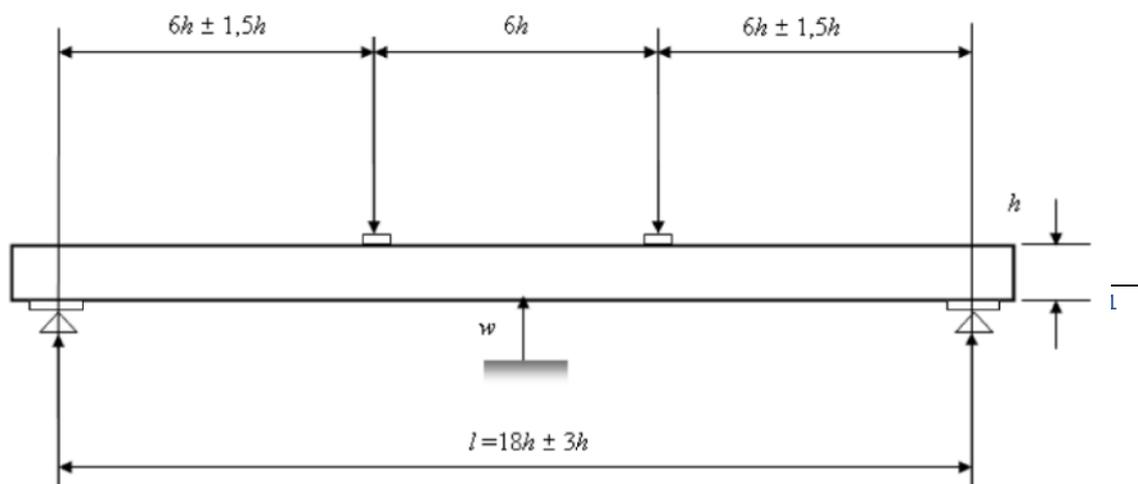
Una vez se tienen todas las vigas a la misma longitud y sección, se realiza en ensayo de emisión y recepción de ultrasonidos de forma directa en todas ellas.



Con los valores obtenidos, se recalcula los valores de MOE y MOR con la densidad real de los elementos y se recopilan en la base de datos.

**Ensayo de rotura según la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012, clasificación según norma UNE EN 384:2016 y asignación de clase resistente según norma UNE EN 338:2016**

La disposición de las vigas para realizar el ensayo se dispone según las especificaciones de la norma UNE-EN 408:2011+A1:2012, en ella se especifican las distancias de los apoyos de la flexión a cuatro puntos en función de la escuadría de los elementos a analizar.





e) Base de datos

El objetivo de este paquete de trabajo es finalmente procesar y organizar toda la información obtenida de los trabajos de campo, satelital y ensayos de laboratorio.

La base de datos generada permitirá en el siguiente entregable relacionar estadísticamente las variables de cada una de las técnicas empleadas. Los valores recogidos en esta base de datos son valores medios de variable por parcela.

Debido a la extensión de dicha base de datos, se explica de forma resumida aquellas variables que cada herramienta ofrece e incluye en la base de datos (tras el procesado de los datos).

**TLS**

El TLS tras el procesado de datos, aporta a la base de datos 6 variables, todas ellas a partir de los datos del TLS:

- Área basimétrica TLS (m<sup>2</sup>/ha).

- VCC (Volumen Con Corteza) TLS (m<sup>3</sup>/ha).
- VSC (Volumen Sin Corteza) TLS (m<sup>3</sup>/ha).
- Diámetro medio con corteza medio TLS (mm).
- Altura media (m).
- Altura máxima (m).

### Sentinel

De esta herramienta satelital se extraen 500 variables por parcela para la base de datos.

Hay 25 variables:

- Las bandas espectrales (con un valor por banda): B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B9, B11 y B12.
- Los índices (con un valor por índice): NDVI\_B5, NDVI\_B6, NDVI\_B7, NDVI\_B8, NDVI\_B8a, SAVI, RVI, MSI, EVI, EVI2, TCW, TCB y TCG.

Se coge la media de cada una de esas variables por trimestre durante 5 años, entonces 4 trimestres por 5 años son 20 trimestres. Las 25 variables por los 20 trimestres hacen un total de 500 variables que añadir a la base de datos.

### Lidar

A partir del software Fusion se han obtenido 85 parámetros, 13 de ellos indicando el conteo de retornos y el resto estadísticos descriptivos de las dos medidas del LiDAR, la elevación (Elev) y la intensidad del retorno (Int). Para cada parámetro Elev existe uno Int.

- Total return count
- Return 1 count
- Return 2 count
- Return 3 count
- Return 4 count
- Return 5 count
- Return 6 count
- Return 7 count
- Return 8 count
- Return 9 count
- Other return count
- Elev minimum
- Elev maximum
- Elev mean
- Elev mode
- Elev stddev
- Elev variance
- Elev CV
- Elev IQ
- Elev skewness

- Elev kurtosis
- Elev AAD
- Elev MAD median
- Elev MAD mode
- Elev L1
- Elev L2
- Elev L3
- Elev L4
- Elev L CV
- Elev L skewness
- Elev L kurtosis
- Elev P01
- Elev P05
- Elev P10
- Elev P20
- Elev P25
- Elev P30
- Elev P40
- Elev P50
- Elev P60
- Elev P70
- Elev P75
- Elev P80
- Elev P90
- Elev P95
- Elev P99
- Canopy relief ratio
- Elev SQRT mean SQ
- Elev CURT mean CUBE
- Profile area

### Mediciones en campo

Dentro de los trabajos de inventario de campo, se incorpora la medición mediante técnicas no destructivas o poco invasivas en árboles en pie. Estas mediciones son:

- Clasificación visual de árboles en pie.
- Medición de ultrasonidos indirecto en pie a 1 metro.
- Medición de ultrasonidos indirecto en pie a 2 metro.
- Medición de ultrasonidos directos de troza apeada a 2 metros.
- Resistografía del tronco a 1,30 m de altura.
- Extracción de barrena pressler a 1,30 m de altura.

### Ensayos de laboratorio

Complementarios a los ensayos y trabajos realizados en campo, se realizan diversos ensayos de laboratorio, estos ensayos son:

- Medición de ultrasonidos directos a 2 metros de las vigas escuadradas.
- Realización de ensayo de rotura según norma UNE EN 408:2011+a1:2012.
- Cálculo de la densidad de cada parcela.
- Medición de crecimientos en tubillones
- Medición de crecimientos con resistografía
- Clasificación estructural de las vigas ensayadas.

A continuación, se muestran algunos de los valores medios por provincia de forma resumida del inventario mediante TLS.

*Tabla 1. Resumen de base de datos por provincia variables generales de inventario.*

Provincia	Á.basimét (m2/ha)	VCC (m3/ha)	VSC (m3/ha)	Diámetro medio (mm)	Hmedia (m)	Densidad (pies/ha)
Castellón	33.35	154.43	116.74	227	13.3	772
Valencia	26.89	126.99	95.79	235	11.6	592
Alicante	34.38	145.01	108.92	211	9.7	816

En la tabla anterior, podemos observar como la densidad de pies por hectárea tiene una relación directa con la altura y el diámetro, siendo mayores estos valores cuanto menor es la densidad. A su vez se observa que la densidad no tiene una relación directa con el VCC ni con el VSC, esto es indicativo de que en esas zonas donde la densidad es mayor, también es mayor el volumen de madera a extraer, pero no es indicativo de que esta sea de mayor calidad, sino que hay un mayor número de pies susceptibles de ser aprovechados.

Otro valor obtenido, es el de clasificación visual de los árboles de cada parcela. Esta valor se media individuo a individuo y posteriormente se hacia la media por parcela. A continuación se muestra un atabla resumen de los valores de clasificación por provincia y los pinos analizados de Ain por separado.

Provincia	Clasificación visual
Ain	D
Castellón	A

Valencia	B
Alicante	C

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores más altos de calidad se obtienen de las parcelas de Castellón, cabe destacar que estos valores son medios de las 7 parcelas analizadas en cada provincia. Uno de los aspectos más relevantes o significativos dentro de los parámetros de clasificación, es la presencia/ausencia de ramas vivas o muertas en los primeros 2 o 4 metros del fuste. En aquellas parcelas que se ha llevado un buen tratamiento selvícola de conformación de la masa, los valores de clasificación visual han sido superiores respecto a las que no. Además de tener importancia si han recibido tratamientos o no, también influye las condiciones meteorológicas y edáficas que permiten que el desarrollo de la especie dependiendo de su localización sea más elevado (ejemplo de las parcelas de Castellón) o más lento (ejemplo de las parcelas de Alicante).

Con el conjunto de datos y variables obtenidas, en el siguiente paquete de trabajo(7) se realizará un estudio de la base de datos generada y se buscarán relaciones estadísticas entre las variables que permitan identificar cuáles de ellas son mejores para determinar la calidad de la madera.

## 4 PAQUETE DE TRABAJO 7

La finalidad de este entregable es obtener modelos para las variables de interés obtenidas de los pies de *Pinus halepensis* mediante los métodos descritos en el entregable E6.1, para las 6 parcelas de estudio analizadas. En el entregable E6.1 partimos de una base de datos con indicadores descriptivos de las diferentes parcelas forestales, se pretende realizar una selección más representativa de las variables que estén más relacionadas con indicadores de calidad de la madera y el volumen.

Para ello el entregable se divide en tres partes, en primer lugar, se realiza un análisis de los datos disponibles en la base de datos se seleccionan las variables que puedan ser más representativas para la obtención de calidad de madera, se busca que estas variables presenten características de facilidad de obtención y fiabilidad y considerando los diferentes métodos de obtención de datos.

En segundo lugar, se realizan los análisis de las relaciones directas entre las diferentes variables, diferenciando las parcelas de Aín e Incofusta con las parcelas de Serra, Agrés y Ares, donde las primeras nos permiten relacionar las variables de calidad de la madera con métodos destructivos, y las segundas con variables obtenidas mediante Sentinel y TLS. Estas relaciones nos permitirán generar modelos de regresión entre estas variables.

Finalmente, se evaluarán los modelos obtenidos y se evaluarán para obtener que variables obtenidas por métodos de evaluación de calidad de madera pueden ser más representativas de la calidad de los pies de *Pinus halepensis* con mayor potencial de explotación maderero. Estos modelos obtenidos se pondrán en uso para la comprobación de su fiabilidad mediante técnicas estadísticas aplicables a esta tipología de datos.

#### a) Obtención de variables de interés

Uno de los métodos no destructivos empleados para la determinación de la calidad de la madera es mediante el uso de la herramienta sylvatest, que nos permite estimar variables de calidad estructural de la madera mediante los indicadores MOE y MOR.

En primer lugar, los pies de *Pinus halepensis* de Aín e Incofusta han sido sometidos a las mediciones mediante sylvatest tanto en verde, como en seco. Esta herramienta, habitualmente, se utiliza para madera seca, sin embargo, en este caso es necesario evaluar la relación entre las variables MOE y MOR en verde frente a la seco y evaluar la relación existente entre ambas mediciones.

El valor de MOE y MOR de 33 pies son los empleados para realizar los análisis estadísticos para definir la relación entre los valores en verde y seco. Las principales relaciones estudiadas son:

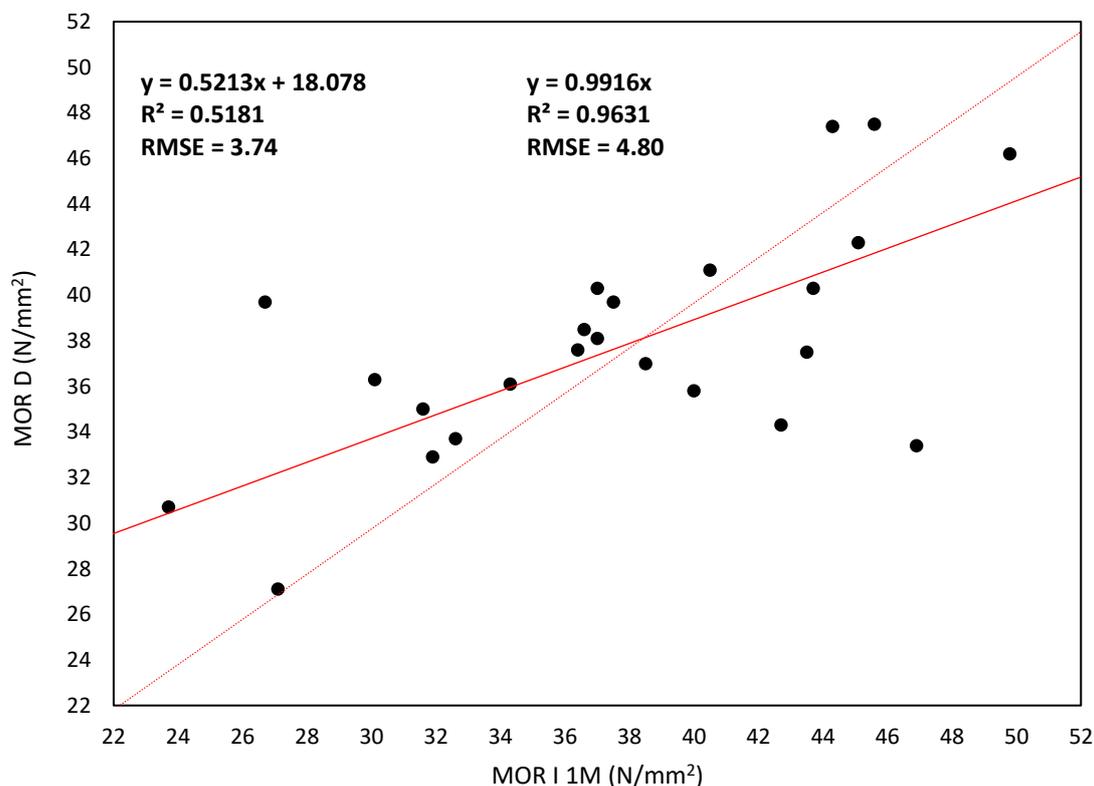
- (MOR I – MOR DS): Los valores de MOR indirectos (toma de datos no destructiva) en verde frente a los valores de MOR directos en seco.
- (MOR DV – MOR DS): Los valores de MOR directo (toma de datos destructiva) en verde frente a los valores de MOR directos en seco.

El objetivo es obtener una relación lineal lo suficientemente significativa y fiable para poder aplicarla a mediciones en verde donde únicamente se empleen métodos no destructivos, en nuestro caso se aplicará la relación obtenida los pies de *Pinus halepensis* en las parcelas donde se han realizado tala de pies, es decir, en las parcelas de Serra, Agrés y Ares del maestrat. De esta forma a partir de las mediciones obtenidas mediante métodos no destructivos (en este caso sylvatest) podemos obtener valores de MOE y MOR en seco sin necesidad de realizar una tala para obtener la medición directa.

Antes de empezar a realizar los análisis estadísticos es importante recordar la obtención de los valores del MOE y el MOR, como se explicó en el entregable E6.1, ya que estos valores dependen de la densidad y la velocidad corregida proveniente de la herramienta sylvatest. Esta relación entre ambas variables indica que son variables dependientes y, por lo tanto, no tiene sentido realizar los análisis de ambas variables. En este caso se ha decidido emplear el MOR como variable indicativa de la calidad estructural de la madera.

- MOR indirecto vs directo (seco)

Según los valores de MOR obtenidos mediante el método indirecto en verde (MOR I 1M) los valores se encuentran entre 20,50 y 49,80 N/mm<sup>2</sup>, y entre 18,70 y 47,50 N/mm<sup>2</sup> para el método directo en seco (MOR DS). Se puede observar una pequeña diferencia entre los valores máximos y mínimo respetando el rango de valores en ambas mediciones. En la figura se pueden observar la distribución de las mediciones realizadas en estos dos métodos, exceptuando un par de casos, se puede observar una tendencia clara representada por la ecuación  $y = 0.5213x + 18.078$  con un valor de  $R^2 = 0.52$  y un  $RMSE = 3.74$ . A la hora de analizar la regresión lineal entre estas dos variables es posible forzar la recta de ajuste por el origen (0,0) indicando que si en el caso que el valor sea 0 en un método ocurre lo mismo en es otro. Esto genera una ecuación diferente  $y = 0.9916x$  que permite observar la relación directa entre ambos métodos y valor de  $RMSE = 4.80$  algo superior debido a forzar la recta.

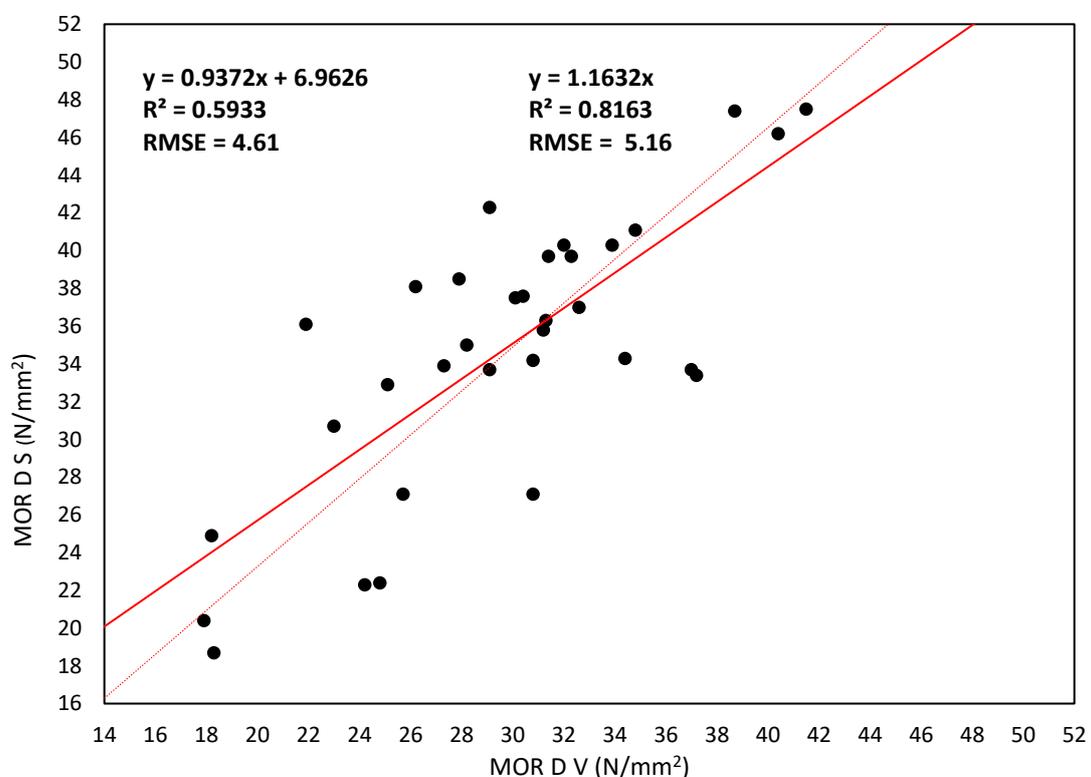


Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR I V – MOR D S)

- MOR directo (verde) vs directo (seco)

Según los valores de MOR obtenidos mediante el método directo en verde (MOR D V) los valores se encuentran entre 17.90 y 41.50 N/mm<sup>2</sup>, y entre 18,70 y 47,50 N/mm<sup>2</sup> para el método directo en seco (MOR D S). Se puede observar una pequeña diferencia entre los valores máximos y

mínimo observando que el método en verde subestima ligeramente a los valores obtenidos en seco. En la figura se pueden observar la distribución de las mediciones realizadas en estos dos métodos, se puede observar una tendencia clara representada por la ecuación  $y = 0.9372x + 6.9626$  con un valor de  $R^2 = 0.59$  y un  $RMSE = 4.61$ . A la hora de analizar la regresión lineal entre estas dos variables es posible forzar la recta de ajuste por el origen (0,0) indicando que si en el caso que el valor sea 0 en un método ocurre lo mismo en es otro. Esto genera una ecuación diferente  $y = 1.1632x$  que permite observar la relación directa entre ambos métodos, esta ecuación también es indicadora de la subestimación de les método en verde y valor de  $RMSE = 5.16$  algo superior debido a forzar la recta.



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D V – MOR D S)

La relación lineal obtenida del análisis estadístico ente el MOR verde y el MOR en seco permite el cálculo del MOR en seco en aquellas parcelas donde no se ha realizado métodos de medición destructivos, concretamente estos casos son los correspondientes a las parcelas de Serra, Agrés y Ares, donde si se han realizado las mediciones indirectas.

A continuación, en el siguiente apartado se pretende realizar más relaciones entre las variables indicativas de calidad de madera (MOR) y las variables restantes obtenidas en el entregable E.6.1

### b) Estudio de las relaciones 1 a 1 entre variables

En este apartado se analizará la relación de las variables de la base de datos frente a tres indicadores clave:

- Volumen con corteza (VCC)
- Calidad estructural de la madera (Calidad)

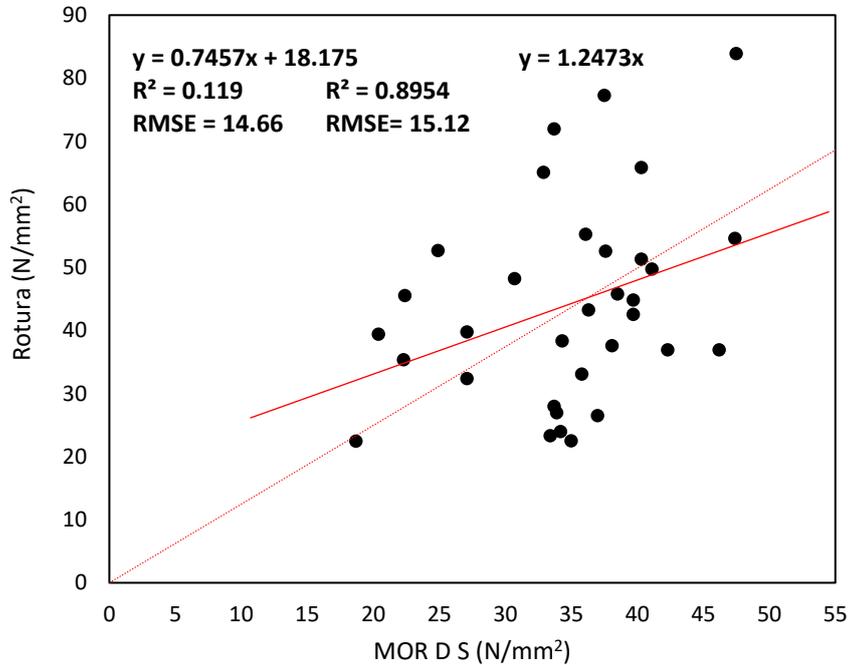
#### **Aín - Incofusta**

En primer lugar, como se ha comentado anteriormente los pies de Aín e Incofusta han sido talados para ser sometidos a métodos destructivos para la obtención de variables indicativas de la calidad de la madera, estos son el MOE, MOR y la Resistencia de flexión axial.

En el apartado anterior se ha realizado la relación lineal entre la variable MOR indirecta en verde frente al MOR directo en seco, obteniendo resultados adecuados para generar un modelo de verde a seco, a continuación, se realiza un proceso estadístico similar para relacionar estas variables con la variable de resistencia obtenida del proceso de rotura y analizar si este otro indicador muestra una mejor relación entre ellas.

- MOR directo (seco) vs Rotura

En la figura siguiente se pueden observar la distribución de la mediciones realizadas en estos dos métodos, los puntos en la gráfica muestran una dispersión muy alta y un ajuste de la recta poco prometedor tal y como se puede observar en la ecuación  $y = 0.7457x + 18.175$  con un valor de  $R^2 = 0.119$  y un  $RMSE = 14.66$ . A la hora de analizar la regresión lineal entre estas dos variable es posible forzar la recta de ajuste por el origen (0,0) indicando que si en el caso que el valor sea 0 en un método ocurre lo mismo en es otro. Esto genera una ecuación diferente  $y = 1.2473x$  que permite observar la relación directa entre ambos métodos y valor de  $RMSE = 15.12$  algo superior debido a forzar la recta.



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D S – Rotura)

Debido a la mala relación obtenida entre el MOR directo en seco y los valores de la rotura, se decide emplear el valor del MOR como variable indicativa de la calidad de la madera.

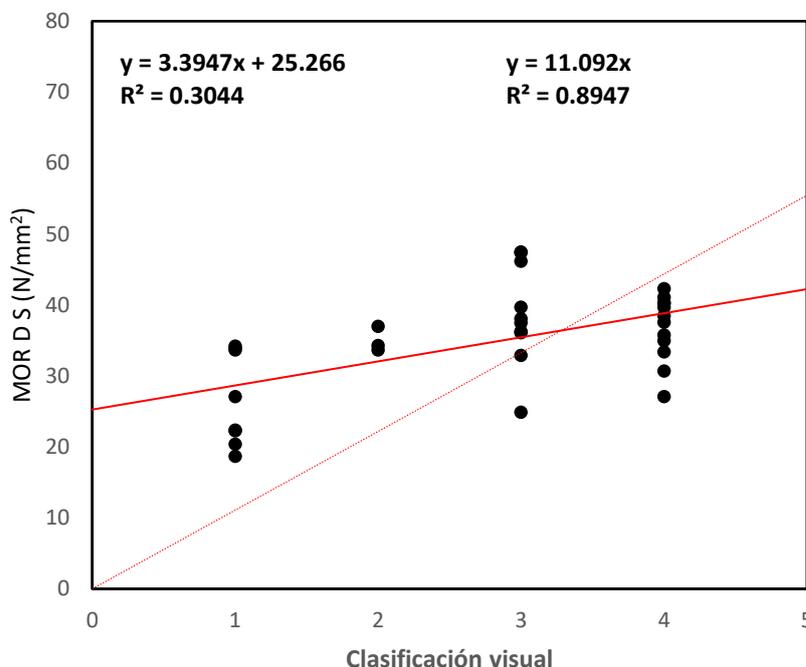
Además, en los pies de Aín se tomaron mediciones de crecimiento mediante la extracción de tubillones con barrena y se realizó el estudio de calidad (explicados en el E6.1). Con estas variables también se pretende analizar si existe alguna relación directa entre estos valores y el MOR D S.

- MOR directo (seco) vs Crecimiento

Como se puede observar por la recta obtenida  $y = 1.9748x + 32.403$  y los valores de  $R^2 = 0.19$  y  $RMSE = 4.84$ , se puede concluir que la relación no es robusta ni fiable.

- MOR directo (seco) vs clasificación visual

Como se puede observar por la recta obtenida  $y = 3.3947x + 25.266$  y los valores de  $R^2 = 0.30$  y  $RMSE = 5.38$ , se puede concluir que la relación no es robusta ni fiable.



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR DS – Clasificación visual)

### Calidad de madera

En este apartado se realizan las relaciones de las variables obtenidas en las parcelas de estudio (Serra, Agrés y Ares), descritas en el entregable E6.1, con objetivo de buscar modelos que puedan describir adecuadamente la calidad de la madera (MOR\_DS). Para mayor robustez a la hora de realizar los análisis se incorporan las mediciones tomadas en las 15 parcelas correspondientes al proyecto WOODFOREST, las cuales han sido incorporadas a la base de datos final empleada en este apartado.

Las variables empleadas en este análisis estadístico son:

- **Volumen con corteza (VCC):** esta variable se ha obtenido a partir de los datos capturados por el TLS, las unidades son m<sup>3</sup>/ha.
- **Diámetro (D):** esta variable se ha obtenido a partir de los datos capturados por el TLS, las unidades son milímetros.
- **Altura media (Hm):** esta variable se ha obtenido a partir de los datos capturados por el TLS, las unidades son metros.
- **Altura máxima (Hmax):** esta variable se ha obtenido a partir de los datos capturados por el TLS, las unidades son metros
- **Sentinel:** son un conjunto de variables correspondiente a índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes satelitales de Sentinel-2 entre los años 2018 y 2023. Concretamente está comprendida por un conjunto de 28 variables adimensionales y corresponden a el valor medio de 5 años.

- **Crecimiento:** esta variable se ha obtenido a partir la medición de los anillos de los tubillones extraídos mediante la barrena, las unidades son milímetros.
- **Clasificación Visual:** esta variable se ha obtenido a partir de un análisis visual de las características descriptivas de los árboles de la parcela.

En primer lugar, se realizan relaciones una a una entre cada una de las variables (Exceptuando el conjunto de variables de Sentinel) y la variable de calidad de madera seleccionada (MOR D S).

- MOR directo (seco) vs VCC

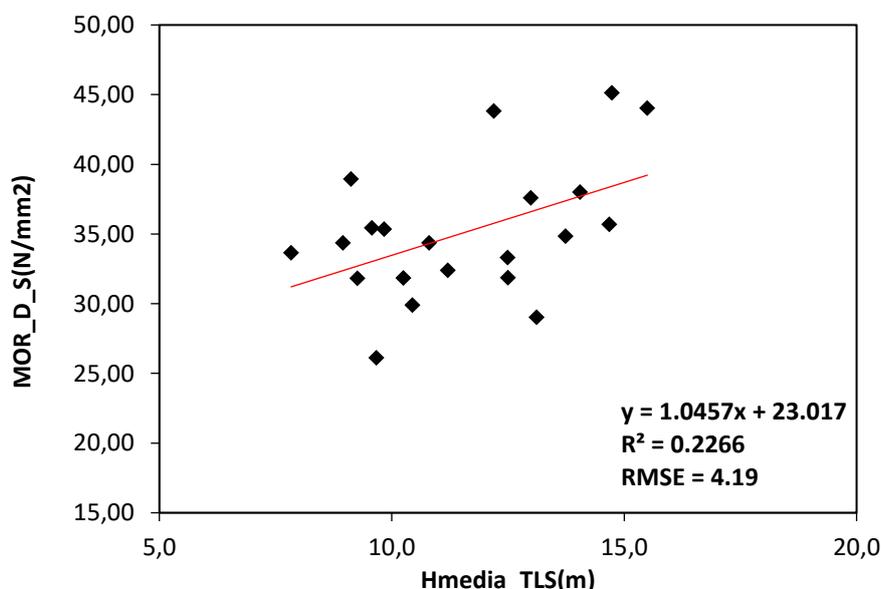
Tanto la recta obtenida  $y = 0.0121x + 33.395$  como el valor de  $R^2 = 0.0194$  nos confirma que la posibilidad de emplear la variable VCC como variable indicativa de la calidad de la madera.

- MOR directo (seco) vs altura media (Hm)

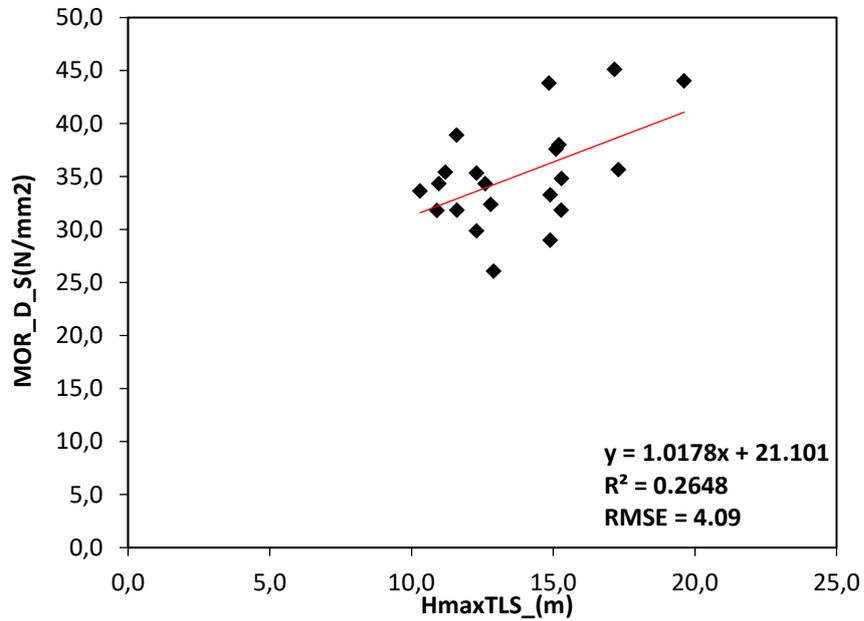
Al observar la figura se puede observar que la variable muestra una mejor relación respecto a la calidad de la madera, a diferencia del VCC, la recta que muestra esta regresión es algo más significativa  $y = 1.0457x + 23.017$ , aún con un valor de  $R^2 = 0.2266$ , el valor de  $RMSE = 4.19$  indica una variabilidad del error al predecir la calidad de la madera por debajo del 10% ( $MAPE = 9,8\%$ )

- MOR directo (seco) vs Diámetro (D)

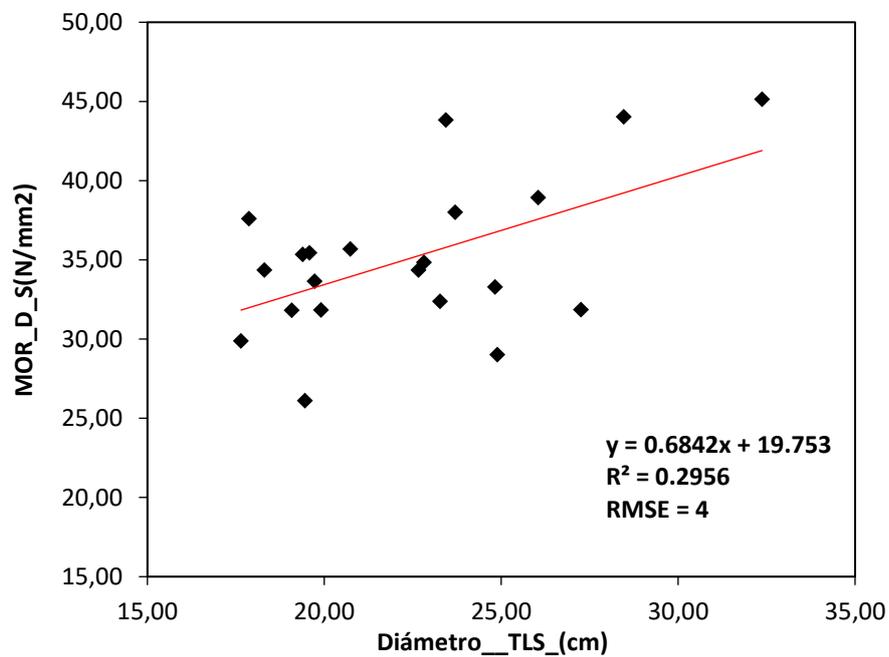
En la figura podemos observar una regresión bastante similar a la de la figura 8, este par de variables muestran un resultado ligeramente mejor tanto en el valor de  $R^2 = 0.2956$  y de  $RMSE = 4$ , y presenta la siguiente ecuación de recta  $y = 0.6842x + 19.753$ .



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D S – HM)



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D S – Hmax)



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D S – Dm)

Después de estos tres análisis de regresión simple se ha llegado a la conclusión que de las tres variables (VCC, Hmedia y Diámetro), la altura media y el diámetro son las únicas variables que presentan algún tipo de relación lineal con la variable de calidad de la madera. Por lo tanto,

precedemos a realizar un multivariable con ambas variables (Hm y D) en el intento de mejorar y fortalecer la relación que existe entre ellas.

- MOR directo (seco) vs (Diámetro (D) y altura media (Hm))

Una regresión lineal múltiple empleando las variables de diámetro y altura media genera la siguiente ecuación  $y = 0.5085x_1 + 0.5571x_2 + 17.2533$ , donde la  $x_1$  corresponde a los valores de diámetro en centímetros y la  $x_2$  corresponde a los valores de altura medidas en metros. La ecuación da un peso equitativo a las dos variables en coherencia a las regresiones lineales simples anteriores. Los valores de  $R^2 = 0.34$ , el valor de  $RMSE = 3.87$  suponiendo una mejora significativa.

- MOR directo (seco) vs (Diámetro (D) y altura máxima (Hmax))

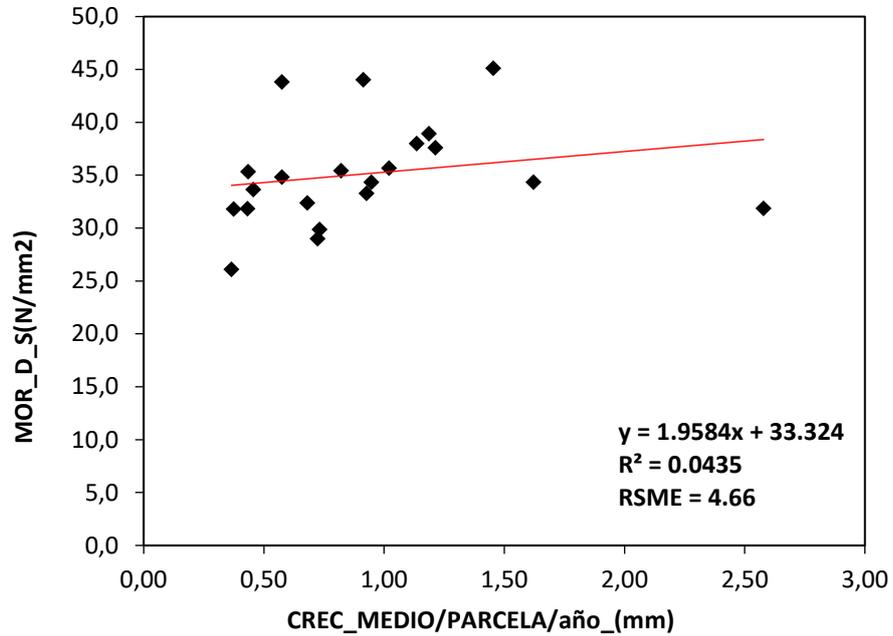
Una regresión lineal múltiple empleando las variables de diámetro y altura máxima genera la siguiente ecuación  $y = 0.4623x_1 + 0.5833x_2 + 17.2533$ , donde la  $x_1$  corresponde a los valores de diámetro en centímetros y la  $x_2$  corresponde a los valores de altura máximas en metros. A diferencia que la relación con la altura media, la ecuación da un peso superior a la altura máxima en coherencia a las regresiones lineales simples anteriores. Los valores de  $R^2 = 0.35$ , el valor de  $RMSE = 3.84$  suponiendo una mejora significativa.

- MOR directo (seco) vs Crecimiento

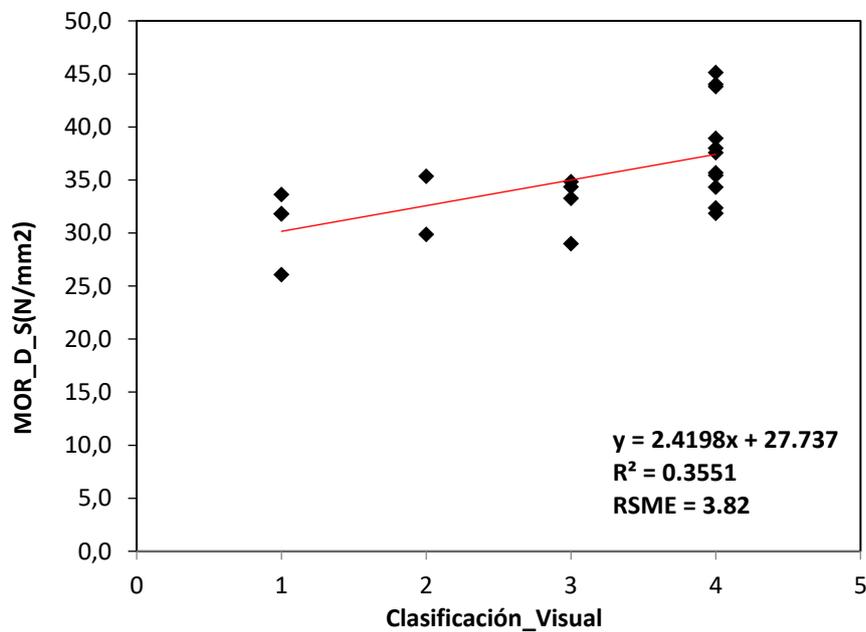
Al igual que con los pies de Aín, la relación de la calidad de madera calculada con el crecimiento medio obtenido para cada una de las parcelas no es especialmente buena, la relación entre estas variables no fiable como podemos observar al analizar los valores de  $R^2 = 0.0435$  y  $RSME = 4.66$ , siendo el primero muy cercano a 0. La ecuación obtenida de esta es  $y = 1.9584x + 33.324$ .

- MOR directo (seco) vs Clasificación visual

En cambio, la relación entre la calidad de la madera y la clasificación visual ha mejorado respecto al análisis empleando únicamente los pies de Aín, al incorporar las parcelas WOODFOREST y las parcelas de estudio se ha conseguido mejorar los valores de  $R^2 = 0.3551$  y  $RSME = 3.82$ , y está representada mediante la siguiente ecuación:  $y = 2.4198x + 27.737$ .



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D S – Crecimiento)



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D S – Clasificación visual)

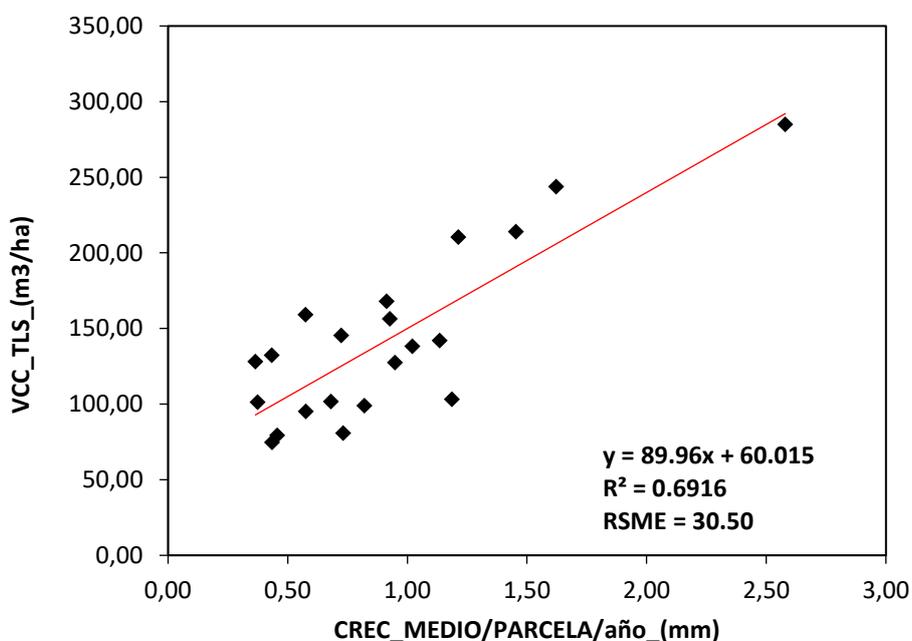
### VCC

Además de la calidad de la madera otro variable que nos interesa modelizar es el volumen con

corteza, y al igual que en el apartado anterior con la variable indicativa de calidad se realizan las mismas relaciones de variables exceptuando MOR DS, que ya ha sido realizado en el apartado anterior, el diámetro, la altura media y la altura máxima debido a que estas variables son las que se han empleado para el cálculo del volumen con corteza.

- VCC vs Crecimiento

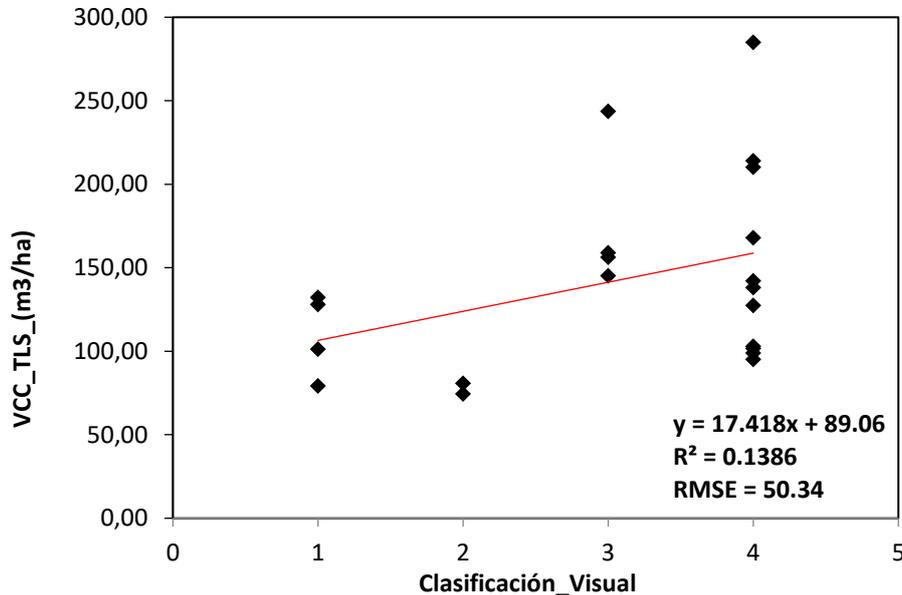
La figura siguiente es la gráfica que representa la regresión lineal entre el crecimiento y el volumen con corteza, la ecuación que representa esta regresión es  $y = 89.96x + 60.015$ , con un valor de  $R^2 = 0.6916$  y valor de  $RSME = 30.50$ , estos valores indican que existe una relación sustancial entre ambas variables con una tendencia claramente ascendente. Si aplicáramos la ecuación obtenida, a partir de los valores de crecimientos obtenidos a partir de la metodología explicada en el entregable E6.1 podríamos obtener valores de volumen con corteza con un error de 30 metros cúbicos por hectárea.



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (VCC – Crecimiento)

- VCC vs Clasificación visual

Por otro lado, la clasificación visual no es un buen indicador de Volumen con corteza, en la figura siguiente se observa como valores altos de volumen con corteza no han podido ser predichos mediante la variable de clasificación visual a diferencia del indicador MOR con el cual si existe algo de relación. La ecuación que representa la recta de tendencia en esta relación es la siguiente,  $y = 17.418x + 89.06$  y los valores estadísticos son  $R^2 = 0.1386$  y  $RMSE = 50.34$ .



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (VCC – Clasificación visual)

c) Modelos y algoritmos.

A diferencia de las relaciones lineales simples, el uso de múltiples variables en los análisis de regresión nos permite generar modelos que nos permiten representar las relaciones más significativas entre nuestras variables objetivo (Calidad y Volumen) mediante una ecuación. Las regresiones lineales simples, realizadas en el apartado anterior, nos permiten hacernos una idea de que variables tienen una mayor correlación con la calidad y el volumen. A continuación, se incorporan todas las variables recopiladas a lo largo del proyecto en conjuntos de datos, concretamente dos, el primer solo incluye las variables obtenidas a partir de las imágenes satelitales de Sentinel-2, y un segundo conjunto que lo conforman todas las variables de la base de datos: Variables derivadas del TLS, Crecimiento, Clasificación visual, LiDAR PNOA y Sentinel).

**Calidad de madera**

- MOR directo (seco) vs Sentinel

El conjunto de variables de Sentinel está formado por 26 atributos. A continuación, se relacionan mediante regresión lineal múltiple frente al indicador de calidad de la madera. En una primera instancia mediante un software específico llamado Weka, se realiza una selección de variables más significativas según su correlación con la variable MOR. Estas variables son: **B2 B8A B11 B12 MSI NDVI5**. A partir de esta selección de variables se realiza la regresión múltiple y se obtienen las siguientes ecuaciones:

- 1)  $y = 0.0159x_1 + 111.7986x_2 - 17.9756$  , donde  $x_1$  es B12 y  $x_2$  es NDVI5.  
 $R^2 = 0.50$  y  $RMSE = 3.8$ .
- 2)  $y = 0.0143x_1 + 114.3429x_2 - 25.4997$  , donde  $x_1$  es B11 y  $x_2$  es NDVI5.  
 $R^2 = 0.52$  y  $RMSE = 3.66$ .

El software de Weka durante la ejecución del proceso de regresión lineal múltiple aplica una búsqueda (GreedyStepwise) de un subconjunto de atributos eligiendo estos dos como los atributos más significativos. De todas las pruebas realizadas con los atributos de Sentinel el B11 o B12 y el NDVIB5 son los que han generados mejores valores de  $R^2$  y RMS. Entre las dos ecuaciones, el uso de la variable B11 en lugar de la variable B12 ofrece un resultado ligeramente mejor a cambio de dar más peso a la variable NDVIB5.

- MOR directo (seco) vs (Bases de datos completa)

El conjunto total de la base de datos está formado por 40 atributos. A continuación, se relacionan mediante regresión lineal múltiple frente al indicador de calidad de la madera. En primer lugar, empleamos Weka para realizar la selección de variables más significativas según su correlación con la variable MOR. Estas variables son: B2, NDVIB5, TCB y la Clasificación Visual. A partir de esta selección de variables se realiza la regresión múltiple y se obtienen las siguientes ecuaciones:

- 1)  $y = -0.0488x_1 + 52.9836x_2 + 0,0207x_3 + 2.2361x_4 - 41.4989$  , donde  $x_1$  es B2,  $x_2$  es NDVIB5,  $x_3$  es TCB y  $x_4$  es la Clasificación visual.  
 $R^2 = 0.73$  y  $RMSE = 3.33$ .
- 2)  $y = 0.0228x_1 + 2.4903x_2 + 6.2064$  , donde  $x_1$  es TCB y  $x_2$  es la Clasificación visual.  
 $R^2 = 0.61$  y  $RMSE = 3.43$ .

El software de Weka durante la ejecución del proceso de regresión lineal múltiple aplica una búsqueda (GreedyStepwise) de un subconjunto de atributos eligiendo estos dos como los atributos más significativos. De todas las pruebas realizadas con los todos los atributos el TCB, y la Clasificación Visual son los que han generados mejores valores de  $R^2$  y RMS y son las variables que más peso ejercen en esta configuración de variables.

### VCC

- VCC vs Sentinel

El conjunto de variables de Sentinel está formado por 26 atributos. A continuación, se relacionan mediante regresión lineal múltiple frente al indicador de VCC. En una primera instancia mediante un software específico llamado Weka, se realiza una selección de variables más significativas según su correlación con la variable VCC. Estas variables son: **B1 B3 NDVI6 NDVI7 EVI EV2 TCB**. A partir de esta selección de variables se realiza la regresión múltiple y se obtiene la siguiente ecuación:

- 1)  $y = 0.5746x_1 - 0.7106x_2 + 367.9745$  , donde  $x_1$  es B1 y  $x_2$  es B2.  
 $R^2 = 0.67$  y  $RMSE = 36.29$
- 2)  $y = 0.4896x_1x_1 - 0.5304 + 1520.8066x_3 + 0.2736x_4 - 575.8283$  , donde  $x_1$  es B1,  $x_2$  es B3,  $x_3$  es NDVIB7 y  $x_4$  es TCB.  
 $R^2 = 0.70$  y  $RMSE = 40.433$ .

El software de Weka durante la ejecución del proceso de regresión lineal múltiple aplica una búsqueda (GreedyStepwise) de un subconjunto de atributos eligiendo estos dos como los

atributos más significativos. De todas las pruebas realizadas con los atributos de Sentinel el B1 y el B3 son los que han generados mejores valores de  $R^2$  y RMS.

- VCC vs (Base de datos completa)

El conjunto total de la base de datos está formado por 40 atributos. A continuación, se relacionan mediante regresión lineal múltiple frente al indicador de Volumen con corteza. En primer lugar, empleamos Weka para realizar la selección de variables más significativas según su correlación con la variable VCC. Estas variables son: B2, B3, B8, SAVI, EVI, NDVIB5, Densidad y el Crecimiento medio por parcela. A partir de esta selección de variables se realiza la regresión múltiple y se obtienen las siguientes ecuaciones:

- 1)  $y = -0.2073x_1 + 0.0468x_2 + 68.0255x_3 + 147.2232$  , donde  $x_1$  es B3,  $x_2$  es Densidad y  $x_3$  es Crecimiento medio.  
 $R^2 = 0.80$  y  $RMSE = 32.08$ .
- 2)  $y = -328.5763x_1 + 0.0536x_2 + 81.5989x_3 - 89.1691$  , donde  $x_1$  es NDVIB5,  $x_2$  es Densidad y  $x_3$  es Crecimiento medio.  
 $R^2 = 0.81$  y  $RMSE = 37.69$ .

El software de Weka durante la ejecución del proceso de regresión lineal múltiple aplica una búsqueda (GreedyStepwise) de un subconjunto de atributos eligiendo estos dos como los atributos más significativos. De todas las pruebas realizadas con los todos los atributos la Densidad, y Crecimiento medio son los que han generado mejores valores de  $R^2$  y RMS y son las variables que más peso ejercen en esta configuración de variables, sobre todo el crecimiento medio, como ya indico la regresión lineal simple realizada anteriormente.

d) Resultados obtenidos

A continuación, en las tablas 1 y 2 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de todas las regresiones lineales simples y múltiples calculadas en el apartad anterior. Estos resultados nos permiten detectar y analizar que variables y que modelos resultantes son los más adecuados para la predicción y cálculo de la calidad de la madera y la cantidad de volumen con corteza se puede obtener a partir de mediciones no destructivas, ya sean mediante métodos en campo como mediante el uso de herramientas de teledetección.

*Resumen de los resultados estadísticos y relaciones obtenidas de a partir de regresiones lineales simples.*

Método	VARIABLES	Ecuación	R2	R2 Adj.	CC	MAE	RMSE
Calidad (MOR)	VCC (m3/ha)	0.0121x + 33.40	0.02	0	0.14	3.66	4.72
	Hmedia (m)	1.043x + 23.02	0.22	0.19	0.48	3.44	4.19
	Hmax (m)	1.021x + 21.10	0.26	0.23	0.51	3.32	4.09
	Diametro (cm)	0.684x + 19.75	0.30	0.26	0.54	3.23	4.00
	Crecimiento	1.958x + 33.32	0.04	0	0.21	3.55	4.66
	Calidad Vis	2.419x + 27.74	0.36	0.32	0.60	3.01	3.83
Volumen (VCC)	Crecimiento	89.96x + 60.02	0.69	0.66	0.83	27.11	30.51
	Calidad Vis	17.42x + 89.06	0.14	0.09	0.37	40.87	50.99

*Resumen de los resultados y modelos obtenidos de la aplicación de métodos de regresión múltiple.*

Método	VARIABLES	Ecuación	R2	R2 Adj.	CC	MAE	RMSE	
Sentinel-2	MOR (N/mm <sup>2</sup> )	1	0.50	0.44	0.61	2.85	3.80	
		2	0.52	0.47	0.64	2.73	3.66	
	VCC (m3/ha)	1	0.67	0.63	0.75	27.77	36.29	
		2	0.70	0.63	0.69	32.12	40.43	
	Total	MOR (N/mm <sup>2</sup> )	1	0.73	0.65	0.73	2.85	3.33
			2	0.61	0.57	0.69	3.00	3.44
VCC (m3/ha)		1	0.80	0.77	0.81	23.81	32.08	
		2	0.81	0.78	0.74	30.91	37.69	

# **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](mailto:aidimme@aidimme.es)

[www.aidimme.es](http://www.aidimme.es)