



9CFE-1971

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: 978-84-941695-7-1

Organiza





Estudio Dasométrico de un rodal en reserva de 5,6 ha de *Pinus nigra* Arn. del MUP 106 “Los Palancares y Agregados” (Cuenca) mediante LiDAR e inteligencia artificial (IA)

GARCÍA MOROTE, F.A. (1), MARTÍNEZ RUIZ-CAPILLAS, S. (1), GARCÍA GONZÁLEZ, J.C. (1, 2), TÉLLEZ SANCHEZ, J.J. (1), PICAZO CÓRDOBA, M. (1), RUBIO, E. (1), ANDRÉS, M. (1), ARQUERO, R (1). CHEBBI, W. (1), y LÓPEZ-SERRANO, F.R. (1)

(1) Instituto de Investigación en Energía Renovables (IER). Unidad TRANSFORMA-UCLM. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Albacete, Spain.

(2) DIELMO 3D. Pl. Vicent Andrés Estellés 2º Bajo, 46950 Xirivella, Valencia, Spain.

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo analizar la evolución de un rodal maduro en reserva de *Pinus nigra* Arn. ubicado en el MUP 106 (“Los Palancares y Agregados”), en la provincia de Cuenca. Este rodal, denominado “El Sumidero”, fue delimitado como parcela permanente por el INIA en el siglo pasado, permaneciendo en régimen de reserva, sin intervención antrópica ni tratamientos selvícolas, constituyendo un ecosistema maduro de gran interés científico, al poder ser evaluado el estado de la masa de pinar sin intervenciones, y edad madura (200 años aproximadamente). Para ello, en 2024 se llevó a cabo un inventario forestal del rodal utilizando tecnología LiDAR manual terrestre móvil combinada con inteligencia artificial. Para la adquisición de datos se empleó el dispositivo LiDAR ZEB-HORIZON (GeoSLAM). Las nubes de puntos generadas fueron procesadas con el software AID-FOREST, que incorpora modelos de inteligencia artificial desarrollados en colaboración entre la UCLM y la empresa DIELMO 3D. Este enfoque permitió la automatización del inventario pie a pie del rodal, y la obtención de sus parámetros dasométricos clave a partir de los datos LiDAR. A nivel dendrométrico, se han reajustado tarifas y supertarifas de cubicación aplicables al tamaño excepcional de los árboles del rodal. A nivel masa, los resultados muestran un claro declive en el crecimiento en volumen del rodal, y una notable ausencia de regeneración natural, características típicas de una etapa de senescencia. Además, en las clases diamétricas mayores, el área basimétrica se concentra predominantemente en unos pocos individuos dominantes. Este trabajo contribuye al conocimiento sobre la dinámica de los rodales maduros de *Pinus nigra* en la Serranía de Cuenca, utilizando técnicas de inventario forestal innovadoras, ofreciendo información relevante para la gestión y conservación de estas masas forestales. El uso de esta metodología supone un avance en la gestión forestal, al obtener datos más precisos, de forma más rápida y económica, que los inventarios tradicionales.

Palabras clave

Pino laricio, bosque maduro, regeneración, dinámica forestal, AID-FOREST, inventario LiDAR, inteligencia artificial



1. Introducción

El monte “Los Palancares y Agregados”, Monte de Utilidad Pública número 106 en el Catálogo de la provincia de Cuenca, pertenece al Ayuntamiento de Cuenca y se encuentra en los parajes de Palancares y Tierra Muerta, en las estribaciones meridionales del Sistema Ibérico. Este espacio comprende una superficie ordenada de 4.885,55 ha, y desde 2001 forma parte de la Red de Áreas Protegidas de Castilla-La Mancha, dentro del Monumento Natural “Palancares y Tierra Muerta”, destacando su excepcional valor ecológico y paisajístico. El relieve del monte es singular, debido a la presencia de torcas o dolinas, formaciones geológicas características de terrenos kársticos, que pueden alcanzar hasta 90 m de profundidad y superficies de 10 ha.

La especie principal del monte es el pino laricio (*Pinus nigra* Arnold. subsp. *Salzmannii* (Dunal) Franco), siendo sus acompañantes la sabina albar (*Juniperus thurifera* L.), la encina (*Quercus ilex* L. subsp. *ballota*.) y el quejigo (*Quercus faginea* Lamk.). El aprovechamiento tradicional del monte ha sido la madera del pino, aplicándose aclareos sucesivos uniformes con cortas diseminatorias y aclaratorias adaptadas a las características de media sombra de *Pinus nigra* (GARCÍA ABARCA ET AL, 2009).

El monte está ordenado desde 1894, con un proyecto que estableció como objetivo principal la producción de madera (LUCAS BORJA ET AL, 2009). Se adoptó el método de “ordenar transformando”, basado en tramos periódicos permanentes (MADRIGAL, 2001), con un turno de 100 años y un periodo de regeneración de 20 años. Este modelo ha evolucionado a lo largo del tiempo para integrar nuevos valores de conservación y sostenibilidad. En la última revisión, el turno se amplió a 150 años y el periodo de regeneración a 30, facilitando la regeneración natural de la especie principal, y aumentando el valor de los productos forestales a la edad de la corta de regeneración (GARCÍA ABARCA ET AL, 2009).

Dasocráticamente, el monte se divide en 3 secciones, 17 cuarteles y 85 tramos. Durante la octava revisión, se estableció un rodal de reserva integral de unas 5 ha en el Tramo IV del Cuartel B, Sección 3ª, conocido como “El Sumidero”. Este rodal, compuesto por una masa monoespecífica de pino laricio como estrato principal, tiene fines de conservación de biodiversidad e investigación, y actúa como referencia de la evolución natural de la masa de pinar sin intervención antrópica. Según LORANCA (1996), esta parcela de reserva debe permitir la observación del monte sin tratamientos selvícolas, proporcionando información sobre la máxima densidad biológica y los procesos naturales de esta especie.

Según el Mapa de Series de Vegetación de RIVAS MARTÍNEZ (1987) la vegetación potencial de la zona pertenece a la serie supramediterránea maestracense y celtibérico-alcarreña de *Juniperus thurifera* (*Junipereto hemisphaerico-thuriferae signetum*; 15b). El terreno es mayoritariamente llano, con pendientes entre 0 % y 3 %, salvo en la depresión del norte del rodal reserva, donde se alcanzan inclinaciones del 34 %. La altitud, entre 1.176 y 1.181 m.s.n.m., y la exposición parecen óptimas para el desarrollo del pino laricio, de acuerdo a las condiciones



climáticas de la zona: precipitación anual de 643 mm y una temperatura media de 12,4 °C, según el observatorio climatológico de Palomera (Cuenca, serie de 40 años).

El establecimiento de rodales maduros en reserva, como “El Sumidero”, resulta valioso para la conservación y estudio de la biodiversidad (EEA, 2016). Sus masas forestales presentan una estructura heterogénea, con varias clases de edad, madera muerta, regeneración natural debida a aperturas naturales del dosel, y comunidades bióticas complejas (EUROPARC, 2015). Desde una perspectiva investigadora, estos rodales ofrecen datos cruciales sobre el estado y la evolución de las masas forestales sin intervención humana, sirviendo como referencia para evaluar la biodiversidad y la evolución de los ecosistemas forestales.

El mantenimiento y estudio de rodales maduros, como “El Sumidero”, constituye también un desafío en la gestión forestal. En este sentido, es necesario la realización de inventarios forestales de detalle, pie a pie, para valorar en mejor medida la estructura del rodal. En este rodal reserva, se puede destacar el trabajo realizado por MARTÍNEZ (1994) mediante técnicas dasométricas clásicas. No obstante, el avance actual en las técnicas de inventario, como el uso de LiDAR terrestre móvil juntamente con inteligencia artificial (IA), como AID-FOREST (LÓPEZ SERRANO ET AL, 2022a), ha revolucionado la gestión forestal, permitiendo digitalizar y cuantificar la estructura de las masas con mayor rapidez y precisión. Esta metodología innovadora presenta mayores ventajas frente a métodos tradicionales, más costosos y menos precisos, consolidando su utilidad en la evaluación de rodales maduros y, en definitiva, para avanzar en el conocimiento sobre gestión forestal sostenible y adaptativa en el actual escenario de cambio.

2. Objetivos

1. Realizar un inventario detallado del rodal “El Sumidero” utilizando LiDAR manual terrestre móvil (LTM) a nivel parcela, con el fin de generar una representación digitalizada de la masa forestal “pie a pie”, para posteriormente procesar la nube de puntos y calcular parámetros dendrométricos relevantes
2. Aplicar algoritmos avanzados integrados en el software AID-FOREST, basados en inteligencia artificial (IA), para el cálculo de variables dendrométricas (diámetro, altura, volumen del tronco) y dasométricas (pies/ha, fracción de cabida cubierta, volumen total) a partir de la nube de puntos. Esta herramienta permite la cuantificación automatizada de dichas variables, optimizando tiempos de trabajo y mejorando la precisión en los resultados
3. Comparar los volúmenes de tronco calculados mediante las ecuaciones tradicionales de cubicación utilizadas en el monte (tarifas de ordenación de la Sección 3ª Cuartel B, y supertarifas del Inventario Forestal Nacional para la provincia de Cuenca), con los volúmenes estimados mediante AID-FOREST, evaluando las diferencias y potenciales ventajas de la nueva metodología
4. Extraer conclusiones sobre el estado actual del rodal reserva a partir del



inventario realizado con LiDAR e IA, comparando los parámetros dasométricos obtenidos con los datos de un inventario de detalle realizado en 1994, utilizando métodos tradicionales (conteo pie a pie con forcípula). Este objetivo permite analizar la evolución del rodal a lo largo de los últimos 30 años

3. Metodología

Para la toma de datos de campo, se utilizó el equipo LiDAR terrestre móvil ZEB-HORIZON (GeoSLAM), un LiDAR de retorno discreto múltiple que emite hasta 300.000 puntos por segundo una distancia máxima de 100 m (LÓPEZ SERRANO ET AL, 2022a). Este sistema permite realizar inventarios “pie a pie” de manera eficiente digitalizando los árboles en una nube de puntos. Con el fin de simplificar las superficies medidas, el rodal reserva se subdividió en 4 parcelas, de cabidas 17.297,37 m², 10.673,12 m², 9.736,02 m² y 19.228,97 m², siendo la superficie del rodal 56.935 m².

Los archivos generados por el ZEB-HORIZON fueron preprocesados con el software GeoSLAM HUB (GeoSLAM), que convierte el archivo bruto en un formato legible por otros programas (por ejemplo, *.las, *.laz). Este software también permite visualizar la nube de puntos y realizar paseos virtuales (LÓPEZ SERRANO ET AL, 2022b). Una vez convertidos los archivos, se recortó la nube de puntos para delimitar la zona a inventariar, eliminando cualquier solapamiento producido por la captura de datos en los límites de las parcelas y evitar la duplicación de pies.

Las nubes de puntos se procesaron con éxito utilizando el software AID-FOREST (Artificial Intelligencie for Digital Forest; LÓPEZ SERRANO ET AL, 2022b). AID-FOREST es un software comercial completamente automatizado, capaz de procesar grandes volúmenes de datos LiDAR utilizando Inteligencia Artificial para detectar los árboles, con capacidad para medir el diámetro normal y el volumen con una alta precisión, logrando una detectabilidad de árboles superior al 97%, incluso en ecosistemas visualmente complejos, con un sesgo de -0,16% en la estimación de diámetros normales y un sesgo de +1,37% en la estimación de volúmenes.

AID-FOREST caracteriza la estructura forestal en 3 fases: i) preprocesado de datos LiDAR dividiéndolos en bloques solapados para manejar grandes volúmenes y evitar discontinuidades, generando de forma automática la clasificación del terreno, el Modelo Digital del Terreno (MDT), el Modelo Digital de Superficies (MDS) y la nube de puntos normalizada; ii) empleando aprendizaje profundo detecta a los árboles mediante la identificación de patrones anulares en proyecciones rasterizadas de la nube de puntos de alta densidad; iii) determinación de los parámetros dendrométricos a nivel árbol, estadísticas y errores, agregando los resultados por parcela y rodal. De esta forma, se calculó para cada pie el diámetro normal, la altura total, la altura al primer verticilo, el volumen, y el área de sección normal. Adicionalmente se obtuvieron el número de pies en cada parcela, y la fracción de cabida cubierta. Estos resultados fueron altamente precisos, ya que la altura de los árboles permitía que la nube de puntos fuera fácilmente identificable.



Una vez detectados los árboles se calculan automáticamente las principales variables dasométricas de interés, incluyendo la densidad (pies/ha), el diámetro medio aritmético (d_n ; cm), el diámetro medio cuadrático (d_g ; cm), el área basimétrica (G ; m^2/ha), la altura media (h_m ; m), la altura dominante (H_0 ; m) y el volumen total (m^3). Estas variables se calcularon tanto para cada una de las 4 parcelas como para el rodal, lo que permitió evaluar las posibles calidades dentro del rodal estudiado.

A continuación, se procedió a cubicar la masa utilizando 2 métodos tradicionales: i) con la supertarifa del IFN para *Pinus nigra* en la provincia de Cuenca, y ii) con la tarifa ajustada para la Sección 3ª, Cuartel B, del proyecto de Ordenación del monte. Los volúmenes así calculados fueron comparados pie a pie con el volumen obtenido por AID-FOREST, que realiza una cubicación real de árboles por trozas mediante IA. Esto se realizó debido a que las anteriores fórmulas de cubicación fueron ajustadas con pies cortados fuera del rodal reserva, de menor tamaño. Al observarse un sesgo en los volúmenes calculados por los métodos tradicionales, con los datos de volumen de los árboles contenidos en la nube de puntos, se reajustaron una tarifa y una supertarifa de cubicación para *Pinus nigra* en el rodal. Estos modelos fueron ajustados con el software Statgraphics Centurion vers. XIX® (Statgraphics Technologies Inc., The Plains, VA, USA). Al ser modelos multiplicativos, los coeficientes fueron calculados con transformación logarítmica de las variables, y los valores predichos corregidos con el factor corrector (FC) en función del error estándar de la estimación (SPRUGEL, 1983).

Finalmente, los valores a nivel masa obtenidos con AID FOREST fueron comparados con el inventario previo realizado en “El Sumidero” por MARTÍNEZ (1994), ejecutado pie a pie mediante métodos clásicos (forcípula e hipsómetro), pudiendo ser analizados los crecimientos habidos en el rodal durante los últimos 30 años. Para ello también se calcularon las fórmulas de crecimientos relativos respecto al valor inicial, medio (fórmula de Pressler) y final (fórmula de Breyman), así como el crecimiento corriente (PARDÉ, J. Y BOUCHON, J.; 1994).

4. Resultados

a. Detección de pies, nube de puntos LiDAR y distribuciones diamétricas

Fueron realizadas 4 nubes de puntos mediante la toma de datos de LiDAR terrestre, una para cada una de las parcelas en que fue dividido el rodal reserva (Figura 1). Para la detección de árboles se ha entrenado el modelo de detección de objetos en AID-FOREST para detectar anillos sobre las imágenes rasterizadas de la nube de puntos LiDAR obtenida, a diferentes alturas. En el caso de los diámetros normales a 1,30 m del suelo, una vez ajustado el modelo del terreno y la normalización de la nube. La combinación de todas las secciones detectadas a las diferentes alturas en la nube ofreció la estructura tridimensional de cada árbol, y permitió la salida de capas vectoriales para el cálculo de los diámetros a las distintas alturas (1 m), y la cubicación de las trozas resultantes. Finalmente, de cada árbol se generó una tabla con sus parámetros dendrométricos, y por adición, los valores dasométricos a nivel parcela y rodal.

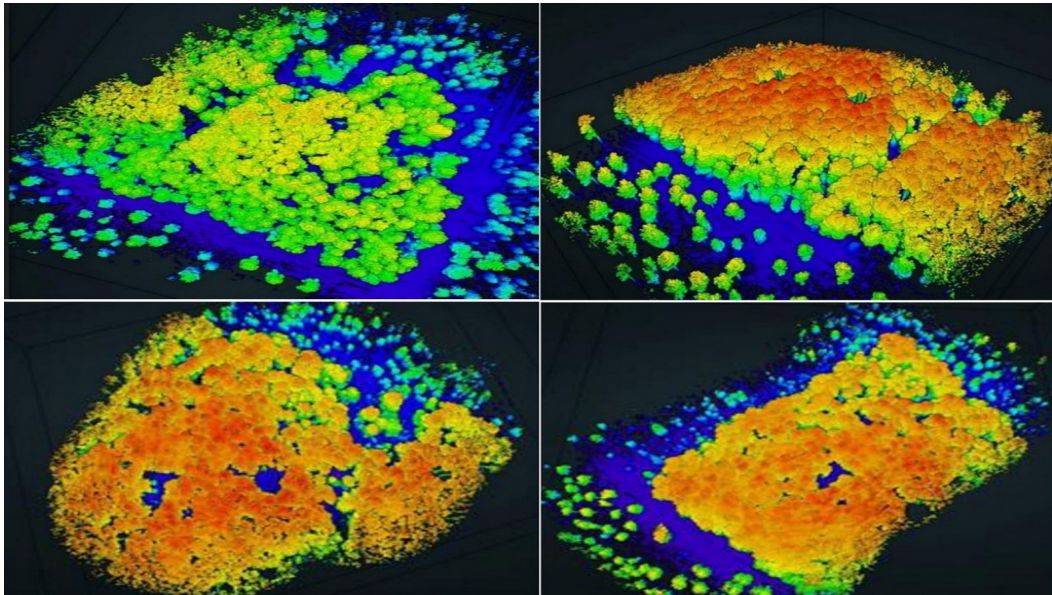


Figura 1. Nubes de puntos parcelas 1, 2, 3 y 4 obtenidas mediante LiDAR terrestre y GEOSLAM

La clasificación de los objetos de la nube resultó en 1.808 árboles detectados en el rodal, cuya distribución diamétrica, a nivel parcela, se observa en la Figura 2. En las distribuciones diamétricas obtenidas, se aprecia cierta homogeneidad en las masas de las 4 parcelas en las que se dividió el rodal, con densidades que oscilaron entre los 317 pies detectados en la parcela 2, y los 691 pies en la parcela 4, lo que supone una variación entre 262 pies/ha y 359 pies/ha, respectivamente, lo que da idea de la baja dotación de pies existente en la masa de pinar.

Las formas de las distribuciones diamétricas asociadas, utilizando en principio las clases diamétricas que se definen en el proyecto de Ordenación del monte (Figura 2), presentaron forma de campana gaussiana, ligeramente asimétricas, con máximos de densidad centrados en las clases intermedias.

Como resultado, la distribución diamétrica del rodal (en clases de 5 cm) presenta una forma de campana con ligera asimetría positiva. Al ajustar los parámetros de una función de Weibull tri-paramétrica (Figura 3), resultaron los parámetros $c = 2,82$ (forma), $b = 47,22$ (escala) y $a = 0,134$ (parámetro en el origen). La asimetría es debida en parte a la presencia de árboles dominantes de diámetros normales excepcionales, de las clases mayores a 75 cm.

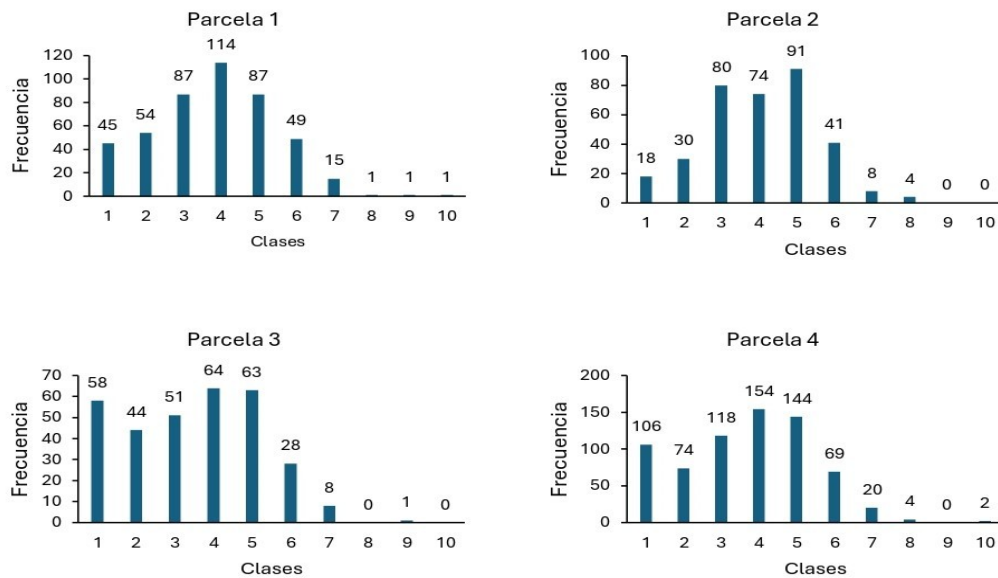


Figura 2. Pies detectados por clases diamétricas mediante el software AID-FOREST en cada una de las parcelas del rodal “El Sumidero”. Clases diamétricas (dn; cm): 1(7,5-19), 2(20-29), 3(30-39), 4(40-49), 5(50-59), 6(60-69), 7(70-79), 8(80-89), 9(90-99), 10 (100-109)

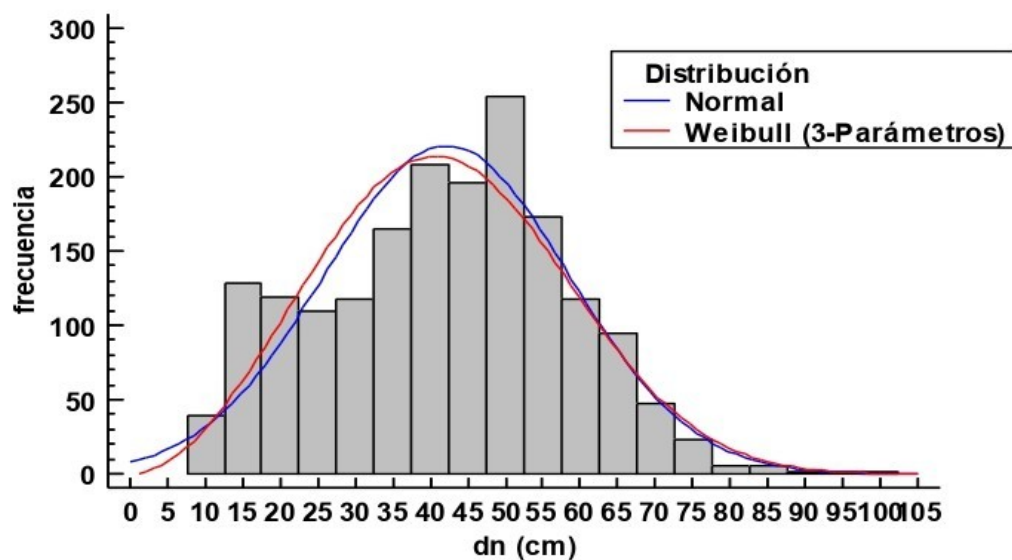


Figura 3. Función de Weibull de 3 parámetros ajustada a la distribución diamétrica del rodal “El Sumidero” en clases diamétricas de 5 cm (pies totales)

4.

a. Cubicación de la masa y ecuaciones de cubicación

Al comparar los volúmenes unitarios de los pies detectados en la nube de puntos, calculados o bien con la tarifa del proyecto de Ordenación, o bien con la supertarifa del IFN, se comprobó un significativo sesgo por defecto respecto a los volúmenes de los troncos calculados mediante IA (Figura 4 y Tabla 1).

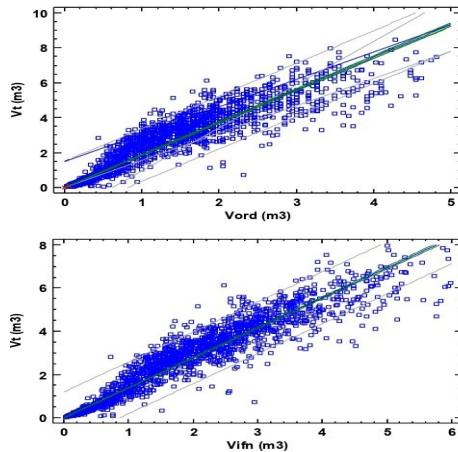


Figura 4. Rectas de regresión lineal sin constante entre los volúmenes calculados mediante AID-FOREST (V_t ; m^3) y i) con la tarifa del proyecto de Ordenación del monte Los Palancares y Agregados para el rodal (V_{ord} ; m^3), y ii) con la supertarifa del IFN para la provincia de Cuenca (V_{ifn} ; m^3)

Se observó como los coeficientes de las rectas de regresión sin constante entre los volúmenes calculados mediante AID-FOREST (valores y) respecto a (valores x; Figura 4): i) volúmenes calculados con la tarifa del proyecto de Ordenación del monte, para el rodal de “El Sumidero” (V_{ord} ; m^3), y ii) volúmenes calculados con la supertarifa del IFN para la provincia de Cuenca (V_{ifn} ; m^3) resultaron ser 1,86 y 1,38, respectivamente (Tabla 1), lo que indica un sesgo muy significativo, estimándose los volúmenes por defecto en ambos casos. Esto es debido a que los pies del rodal reserva son de dimensiones mucho mayores, tanto en diámetro como en altura, que los que se suelen tomar como muestra para ajustar los modelos. Por ello, y al contar con un inventario pie a pie con LiDAR terrestre, con datos de diámetro, altura y volumen para cada uno de los árboles, reajustar una tarifa y supertarifa propia para el rodal reserva, recoge mejor la dispersión, para árboles de grandes dimensiones, como son los de “El Sumidero”.

Tabla 1. Estadísticos de las rectas de regresión sin constante obtenidas entre los volúmenes calculados mediante AID-FOREST (valores y) versus: i) tarifa del proyecto de Ordenación del monte Los Palancares y Agregados para el rodal (V_{ord} ; m^3), y ii) supertarifa del IFN para la provincia de Cuenca (V_{ifn} ; m^3)

Variable	Coefficiente	Error estándar	R ² ajustado	p-valor
Vord (m ³)	1,860	0,011	94,45	<0,000
Vifn (m ³)	1,380	0,006	96,49	<0,000

En consecuencia, se ajustaron una tarifa y una supertarifa con los valores de los volúmenes obtenidos con AID-FOREST (Tabla 2), de las formas (tarifa), y (supertarifa IFN), mediante modelo potencial en el primer caso, y regresión múltiple con transformación logarítmica en el segundo, resultando ser dichos modelos (Tabla 2; $V = m^3$; $dn = cm$; $h = m$): , y . En ambos casos los volúmenes estimados deben ser corregidos por el factor corrector de la transformación logarítmica (, siendo SEE el error estándar de la estimación (SPRUGEL, 1983).

Tabla 2. Coeficientes estimados de las ecuaciones de cubicación reajustadas para Pinus nigra en el rodal de “El Sumidero”, para obtener una tarifa (Vord; m³), y una supertarifa (Vifn; m³). Los estadísticos de la bondad del ajuste fueron R²= 91,48 % y error estándar =0,335 para la tarifa, y R²= 94,42 % y error estándar =0,271 para la supertarifa.

Parámetro	Coefficiente	Error estándar	T	p-valor
Constante tarifa: ln(a)	-8,09	0,06	-128,95	<0,000
Pendiente tarifa (b)	2,378	0,017	139,37	<0,000
Constante supertarifa: ln(c)	-10,61	0,09	-110,80	<0,000
log(dn)	2,163	0,015	140,13	<0,000
log(h)	0,99	0,03	31,0	<0,000

En el inventario anterior (MARTÍNEZ, 1994) aplicó el método de cubicación de la masa por coeficientes mórficos y por supertarifa del IFN. Para evitar el posible sesgo por defecto detectado en volumen, se cubicó la masa hace 30 años con la supertarifa reajustada en el presente trabajo.

4.

a. Evolución y estado actual de la masa

Las variables de masa calculadas con las nubes de puntos procesadas aparecen recogidas en la Tabla 3. En esta tabla también se incluyen las variables en el inventario de MARTINEZ (1994), y el volumen total, por la adición de los volúmenes de los árboles detectados por IA, por parcela y para el total del rodal “El Sumidero”. Se observa como el volumen en el año 2024 es de 892,60 m³/ha, frente a los 939,19 m³/ha calculados para hace 30 años. El volumen total prácticamente se mantiene, con un ligero descenso, observándose un aumento habido en las clases entre 75-90 cm (Figura 5).

Tabla 3. Valores de los parámetros dasométricos obtenidos aplicando AID-FOREST, a las 4 parcelas del rodal “El Sumidero”, para el rodal total, y comparativa con los valores obtenidos en el inventario de MARTÍNEZ (1994)

Variabes	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4	Total año 2004	Total año 1994
Superficie (m ²)	17.297,37	10.673,12	9.736,02	19.228,97	56.935,48	56.935,48
Nº pies	454	346	317	691	1.808	2.234
dn (cm)	45,99	47,21	43,12	44,86	45,3	41,38
dg (cm)	47,57	47,23	43,21	44,89	45,75	42,32
Hm (m)	27,14	29,45	28,84	28,67	28,53	27,52
H ₀ (m)	30,82	33,48	33,3	32,53	32,53	31,64
N (pies/ha)	262	324	326	359	318	392
G (m ² /ha)	46,65	56,8	47,75	56,88	52,2	55,18
V (m ³ /ha)	762,28	968,29	816,03	1.006,59	892,60	939,19
Fcc (%)	82,41	85,26	86,29	90,7	86,17	72,43
Esbeltz	64,79	70,88	77,06	72,46	71,11	74,77

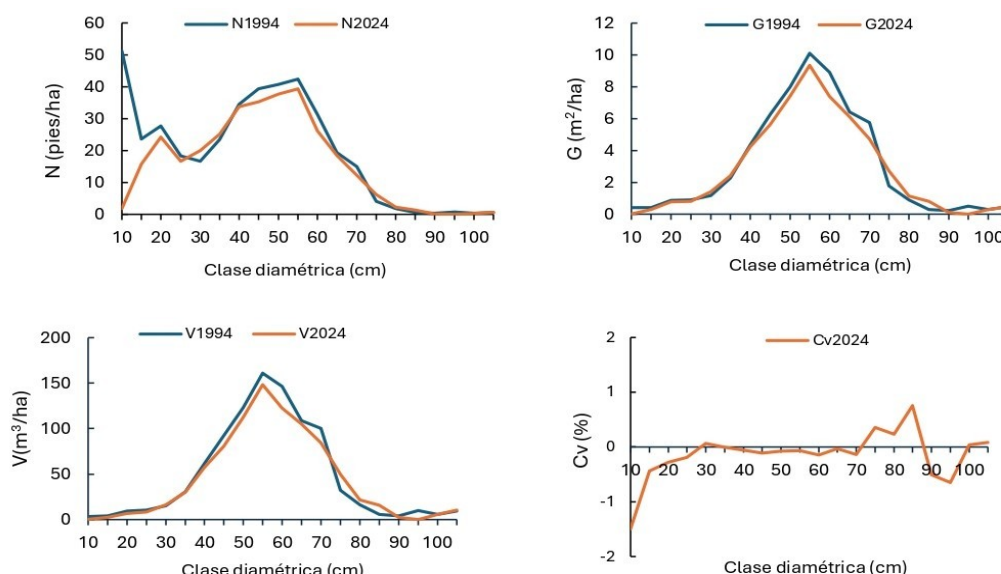


Figura 5. Resultados a nivel rodal y por clase diamétrica de 5 cm, para las variables dasométricas densidad (N; pies/ha), área basimétrica (G; m²/ha), volumen (V; m³/ha) y crecimientos relativos respecto al valor medio o fórmula de Pressler (Cv; %) de acuerdo a los valores calculados con AID-FOREST (líneas 2024), y su comparativa con los obtenidos por MARTÍNEZ (1994).

Como se observa en la Tabla 3 y Figura 5, las existencias totales en pies mayores y en volumen con corteza han mostrado una relativa estabilidad a lo largo del tiempo. Aunque en 1994 se registraba un mayor número de pies, el número total de árboles de la masa principal ($dn > 20$ cm) se ha mantenido relativamente constante (Figura 5). Sin embargo, en cuanto a la regeneración del rodal, los resultados parecen menos favorables.

En efecto, se evidencia una disminución de la dotación de pies en las clases diamétricas menores (diámetros normales entre 10 y 20 cm), mientras que las clases superiores (70-90 cm) han experimentado un ligero incremento. Este patrón refleja una elevada mortalidad en árboles dominados y una falta de regeneración, atribuible tanto a la elevada fracción de cabida cubierta (casi del 90%, Tabla 3), como a la presencia de un número significativo de árboles dominantes de grandes dimensiones.

Respecto al balance total de área basimétrica, resultó un valor ligeramente inferior al registrado en 1994 (Tabla 3). Este resultado exige un análisis detallado por clases diamétricas, observándose que la diferencia principal radica en las clases diamétricas inferiores, y en las centrales, entre 50-75 cm (Figura 5). En las clases diamétricas superiores, las diferencias son positivas (clases 75-85 cm), o nulas (90 y 100 cm), con la excepción de la clase 95 cm, donde G presentó un valor ligeramente inferior.

El análisis del crecimiento en volumen (Tabla 4) constituye uno de los aspectos más relevantes de un estudio Dasométrico, ya que permite sintetizar los datos obtenidos y compararlos con los previos, evaluando el desarrollo y la capacidad

productiva del rodal de forma precisa. La comparativa de crecimiento en volumen entre valores obtenidos por MARTÍNEZ (1994) y los del actual inventario también se ofrecen en la Tabla 4.

Tabla 4. Crecimiento en volumen obtenidos aplicando AID-FOREST para el rodal, y comparativa con los valores obtenidos en el inventario anterior referencia elaborado de MARTÍNEZ (1994)

Crecimientos	Año 1994	Año 2024
Medio anual (m ³ /ha/año)	4,49	4,46
Corriente (m ³ /ha/año)	11,05	-1,456
Relativo valor inicial (%)	1,82	-0,155
Relativo valor medio (Pressler; %)	1,63	-0,159
Relativo valor final (Breyman; %)	1,47	-0,163

Resulta relevante que todos los crecimientos calculados para el total del rodal han resultado inferiores a los obtenidos en 1994, y prácticamente 0 en términos relativos, lo que apunta a un comportamiento típico de fase de senectud del rodal, apreciándose que los crecimientos tienden progresivamente a cero (Figura 5 y Tabla 4).

5. Discusión

En general, los resultados obtenidos se corresponden a una masa forestal que pierde pies menores debido a una alta competencia, pero con gran cantidad de individuos de gran tamaño, tanto en diámetro como en altura. No obstante, estos árboles presentan crecimientos anuales en volumen muy reducidos o despreciables, propios de una fase de senectud en la que se encuentra la masa. Esta estructura reflejaría un estado de cierto equilibrio de una masa madura al final de su evolución (WIRTH ET AL, 2009).

En este sentido, la distribución diamétrica obtenida a partir de las nubes de puntos representa a una estructura de edades con forma gaussiana asimétrica, lo que difiere significativamente de la distribución típica exponencial negativa, indicativa de un rodal con reclutamiento continuo y sustitución del dosel superior (NAGEL Y CERIONI, 2023). Esto evidencia la falta de regeneración en la masa y la



supremacía todavía de los pies dominantes.

La regeneración en *Pinus nigra* se produce tras perturbaciones puntuales, que generan estructuras dominadas por árboles de gran diámetro (TÍSCAR ET AL, 2015). Tanto la ausencia de apertura de claros, como la falta de cortas de liberación del escaso regenerado existente, suponen un freno a la renovación del vuelo en el rodal “El Sumidero”. Esta falta de regeneración es de suponer se mantendrá en el tiempo hasta que se produzca una perturbación puntual, lo que supondrá mayor irregularidad de la masa, y en la que los árboles de gran diámetro, dominantes, siempre estarán presentes.

La comparación estructural entre el rodal estudiado y el descrito por TÍSCAR Y LUCAS-BORJA (2016) en una masa madura de *Pinus nigra* del sur de España, revela similitudes propias de sistemas poco intervenidos o con baja intensidad de gestión. En ambos casos se observa una baja densidad, con presencia significativa de árboles dominantes de gran porte ($dn > 70$ cm), lo que se traduce en distribuciones diamétricas asimétricas con diámetros medios mayores a rodales intervenidos.

La fracción de cabida cubierta actual, cercana al 90%, y en aumento desde 1994, indica que la masa está próxima al cierre total de copas, lo que reduce al máximo los claros bajo el dosel. Este progresivo cierre habría obligado a los árboles del estrato superior a alcanzar alturas notables (cerca de 30 m de media) y estaría muy estrechamente relacionado con la falta de reclutamiento observada (TÍSCAR, 2003).

Esta configuración responde a una estructura característica de masas post-clímax o en fase de senescencia parcial, con una escasa representación de clases inferiores, debido a la ausencia de regeneración, vinculada a la alta fracción de cabida cubierta. Este patrón coincide con otras observaciones previas en masas maduras de *Pinus* en ambientes mediterráneos, donde las dinámicas de regeneración están fuertemente condicionadas por la competencia intraespecífica, el sombreado persistente y la escasa perturbación (CALAMA ET AL, 2003; BRAVO-OVIEDO ET AL, 2006). El análisis estructural del rodal permite inferir la necesidad de estrategias de gestión adaptativa orientadas a fomentar los procesos de regeneración, para asegurar la persistencia de las masas de laricio en escenarios de cambio climático.

Los problemas de difícil regeneración de *Pinus nigra* en la Serranía de Cuenca son bien conocidos, debido a su temperamento de media sombra-media luz, y a que el crecimiento en fase juvenil se ve muy afectado por un exceso de competencia (LUCAS BORJA ET AL, 2014). Estos factores se han hecho especialmente patentes en “El Sumidero”, donde la alta competencia intraespecífica genera una elevada mortalidad temprana en árboles dominados. En las clases diamétricas medias, se observa una tendencia similar al inventario anterior, con árboles en competencia por alcanzar el nivel dominante (crecimientos negativos en clases 50-70 cm). Esto conlleva cierta mortalidad, aunque menor que en las clases inferiores.

La competencia y mortalidad en los últimos 30 años han generado una



redistribución del área basimétrica, aunque no ha resultado en una mayor G ni volumen total. Se observa incorporación de árboles a las clases entre 75-90 cm, pies que habrían logrado alcanzar un estrato codominante, contribuyendo parcialmente al aumento de área basimétrica. Estos resultados coinciden con lo observado por TÍSCAR Y LUCAS-BORJA (2016), quienes identificaron un aumento continuo del área basimétrica con el tamaño de los árboles en bosques maduros de *Pinus nigra*. Sin embargo, este incremento no compensa la pérdida de sección normal en las clases inferiores.

Los árboles verdaderamente dominantes, característicos del estrato maduro, presentaron baja mortalidad, y debido a la elevada longevidad de *Pinus nigra* (CEBALLOS Y RUIZ DE LA TORRE, 1979), no observándose todavía una fase de mortalidad masiva en los pies mayores. Sin embargo, los datos sugieren un estancamiento en su crecimiento, típico de rodales maduros en fases avanzadas de desarrollo (WIRTH ET AL, 2009). En los turnos finales de corta para la especie las densidades buscadas suelen ser menores (MADRIGAL, 2001), reduciendo la competencia entre los árboles del estrato superior, lo cual favorece la iluminación del suelo y la liberación progresiva del regenerado, tan necesario en el pino laricio. Superar el 30% de área basimétrica (lo que sucede ampliamente en “El Sumidero”) impacta negativamente en el reclutamiento y crecimiento del regenerado (LUCAS-BORJA ET AL, 2014).

Parece evidente que los crecimientos relativos en volumen calculados indican que el rodal se encuentra en una fase de senectud, marcada por un estancamiento progresivo en el crecimiento, especialmente respecto al valor final, y una competencia en aumento entre los pies mayores (WIRTH ET AL. 2009). Sin embargo, la actual ausencia de mortalidad en estos pies, incluso durante periodos de sequía, podría interpretarse también como un estado de equilibrio funcional, propio de masas maduras no gestionadas, en el que los individuos supervivientes, de gran edad, presentan una elevada resiliencia. Esta hipótesis es coherente con lo descrito en otras especies de *Pinus* mediterráneas (LINARES ET AL, 2011; MARTÍNEZ-VILALTA ET AL, 2012). La estructura compleja lograda y el dosel cerrado pueden contribuir a una amortiguación microclimática, dotando a esta fase de cierta estabilidad sin alta productividad como vía alternativa de adaptación.

Por tanto, prever el destino del rodal a corto plazo es complicado, aunque lo más probable es que la masa se vuelva cada vez menos vigorosa, y menos productiva y estable. Impactos de fenómenos naturales, como temporales, sequías, y enfermedades o plagas, podrían reducir más aún el crecimiento, o aumentar la mortalidad de individuos de todas las edades, incluidos dominantes.

6. Conclusiones

La evolución del rodal “El Sumidero” durante los últimos 30 años puede calificarse como satisfactoria en términos de persistencia de la masa principal, evidenciándose una ausencia de mortalidad significativa en la mayoría de sus clases, especialmente en los árboles del estrato superior, y un relativo mantenimiento de área basimétrica y volumen totales.



Sin embargo, desde la perspectiva del reclutamiento de nuevos individuos, los resultados no han sido tan favorables. Aunque se observan pequeños corros de regenerado y pimpolladas dispersas bajo el denso estrato dominante, la transición de estos pies menores a clases diamétricas superiores (10-20 cm) ha descendido significativamente.

En el rodal en reserva se han cumplido objetivos clave del Proyecto de Ordenación, como la conservación de la biodiversidad, la madurez, y el análisis de la evolución de una masa sin intervención. Sin embargo, la vitalidad de la masa y, especialmente, la capacidad de regeneración del pino laricio parecen estar en declive. Esto resalta la necesidad de seguir una correcta planificación forestal en el resto del monte, aplicando métodos selvícolas adecuados, que aseguren el reclutamiento continuo de nuevos individuos y la sostenibilidad a largo plazo de *Pinus nigra*, dada su dificultad de regeneración. Es de suponer que, ante la falta de regeneración del pino, se pudiera iniciar un cambio o sustitución de especies en “El Sumidero”.

“El Sumidero” es un ejemplo destacado de bosque maduro en reserva, cuya conservación es esencial. Este rodal también refleja el papel clave de la Ordenación Forestal y la Silvicultura en la gestión sostenible, al garantizar la continuidad de las masas forestales y preservando sus valiosas funciones ecológicas, paisajísticas y también socioeconómicas, fundamentales en el monte mediterráneo.

Finalmente, es importante destacar que el uso de tecnología LiDAR terrestre móvil con inteligencia artificial ha demostrado ser eficaz en el análisis dendrométrico de los 1.808 árboles del rodal, ofreciendo resultados relevantes a nivel masa, representando un avance en el inventario y la evaluación de las masas forestales, al obtener datos precisos en menos tiempo que el inventario tradicional.

7. Agradecimientos y financiación

El trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto 2024-TRAN-36774 en la Unidad de Transferencia en el Sector Forestal y Medioambiental del IER-UCLM. Agradecer asimismo a los agentes y técnicos forestales de la Delegación Provincial de la Consejería de Desarrollo Sostenible en Cuenca (Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha), por acompañarnos al monte “Los Palancares y Agregados” en la visita a “El Sumidero”, dentro de las actividades del Aula 106.

El trabajo también ha sido posible gracias al material y financiación de los proyectos I+D+i: PID2020-119861RB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/; SBPLY/23/180225/000136, REPOSTFIRE, JCCM (cofinanciado por fondos FEDER, UE), y los proyectos [LIFE21-CCM-ES-LIFE TOKEN CO₂/101074388] y [LIFE23-CCM-ES-WOOD4LIFE/101156491], cofinanciados por la European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency dentro del European Life Program.



8. Bibliografía

- BRAVO-OVIEDO, A.; DEL RÍO, M.; MONTERO, G.; 2006. Interacciones silvícolas y productivas en masas de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* Arn. en el Sistema Central. *Forest Systems*, 15(2), 138-153
- CALAMA, R.; MONTERO, G.; PARDOS, M.; 2003. Interacción entre regeneración natural y claros en repoblaciones de *Pinus pinea* L. en la Tierra de Pinares. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 12(2), 127-138
- CEBALLOS, L. Y RUIZ DE LA TORRE, J.; 1979. Árboles y arbustos de la España Peninsular. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. 512 p. Madrid
- EEA; 2016. European Forest Ecosystems – State and trends. EEA Report No. 5/2016
- EUROPARC; 2015. El papel de los bosques maduros en la conservación de la biodiversidad. Grupo de Conservación de EUROPARC-España.
- GARCÍA ABARCA, J.A.; ROJO ARRIBAS, F.; SÁNCHEZ PALACIOS, G.; 2009. Los Palancares y Agregados. 111 años de Gestión Forestal Sostenible. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. 47 p. Toledo
- LINARES, J. C.; CAMARERO, J. J.; CARREIRA, J. A.; 2011. Climate and competition effects on tree-ring width of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*: Drought-sensitive growth patterns are modulated by stand density. *Forest Ecology and Management*, 262(3), 638–645
- LÓPEZ-SERRANO, F. R.; RUBIO, E.; ANDRÉS ABELLÁN, M.; GARCÍA MOROTE, F.A.; PICAZO CÓRDOBA, M.I.; GARCÍA SAUCEDO, F.; SÁNCHEZ GARCÍA, J.M.; SERENA INNERARITY, J.; CARRASCO LUCAS, L.; GARCÍA GONZÁLEZ, O.; GARCÍA GONZÁLEZ, J.C.; 2022. Nuevo paradigma en la inventariación forestal: uso de inteligencia artificial para la cuantificación de recursos forestales en base a nubes de puntos LiDAR. *Actas 8º Congreso Forestal Español*. 1-15 pp. Lleida
- LÓPEZ-SERRANO, F. R.; RUBIO, E.; GARCÍA MOROTE, F.A.; ANDRÉS ABELLÁN, M.; PICAZO CÓRDOBA, M.; GARCÍA SAUCEDO, F.; MARTÍNEZ GARCÍA, E.; SÁNCHEZ GARCÍA, J.M.; SERENA INNERARITY, J.; CARRASCO LUCAS, L.; GARCÍA GONZÁLEZ, O.; GARCÍA GONZÁLEZ, J.C. 2022. Artificial intelligence-based software (AID-FOREST) for tree detection: A new framework for fast and accurate forest inventorying using LiDAR point clouds. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, Volume 113, 103014
- LORANCA, J.A.; 1996. *Pinus nigra* Arn. en el Sistema Ibérico: Tablas de crecimiento y producción. Monografías del INIA nº 93. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. MAPA. 106 p. Madrid.
- LUCAS BORJA, M.E.; MARTÍNEZ GARCÍA, E.; ANDRÉS ABELLÁN, M.; GARCÍA MOROTE, F.A.; LÓPEZ SERRANO, F.R.; CERRO BARJA, A.; 2009. Historia de la ordenación forestal de los pinares de pino laricio en la Serranía de Cuenca: el caso particular del monte de "Los Palancares y Agregados". *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales nº 30. III Reunión sobre Historia Forestal*; pp. 277-283
- LUCAS-BORJA, M.E.; CANDEL-PÉREZ, D.; MOLERO, J.; MARTÍNEZ-GARCÍA, E.; DADI, T., RUBIO, E.; GARCÍA-MOROTE, F.A.; ANDRÉS-ABELLÁN, M.; LÓPEZ-SERRANO, F.R.; 2014. La regeneración natural de los pinares de pino laricio (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco) en la Serranía de Cuenca: un problema para la gestión



sostenible. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales nº 40. Grupo de Trabajo de Selvicultura: Regeneración natural y cambio global; pp. 131-140

MADRIGAL, A.; 2001. Ordenación de Montes Arbolados. Colección Técnica. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ICONA). 375 p. Madrid

MARTINEZ, A.; 1994. Estudio dasométrico y selvícola de una parcela excepcional de *Pinus nigra* Arn. en Los Palancares (Cuenca). Departamento de Ciencia y Tecnología Agroforestal. Universidad de Castilla-La Mancha. 149 p. Albacete

MARTÍNEZ-VILALTA, J.; LÓPEZ, B. C.; LOEPFE, L.; LLORET, F. 2012. Dynamics of biomass and productivity in declining Scots pine forests on the southern edge of its distribution. *Forest Ecology and Management*, 283, 230–237

NAGEL, T.A. Y CERIONI, M.; 2023. Structure and dynamics of old-growth *Pinus nigra* stands in Southeast Europe. *European Journal of Forest Research* 142, 537–545

PARDÉ, J. y BOUCHON, J.; 1994. Dasometría. 2ª Edición. Traducción por A. Prieto y M. López Quero. Editorial Paraninfo S.A. 387 pp. Madrid

RIVAS MARTÍNEZ, S.; 1987. Memoria del Mapa de las Series de Vegetación de España 1: 400.000. ICONA (Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 268 p. Madrid.

SPRUGEL, D.G.; 1983. Correcting for Bias in Log-Transformed Allometric Equations. *Ecology* 64(1), 209-210.

TÍSCAR, P.A. Y LUCAS-BORJA, M.E.; 2016. Structure of old-growth and managed stands and growth of old trees in a Mediterranean *Pinus nigra* forest in southern Spain. *Forestry* 89 (2), 201–207

TÍSCAR, P.A.; 2003. Condicionantes y limitaciones de la regeneración natural en un pinar oromediterráneo de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 12, 55–64

TISCAR, P.A.; GARCÍA ABRIL, A.D.; AGUILAR, M.; SOLIS, A.; 2015. Gestión Forestal Próxima a la Naturaleza: potencialidades y principios para su aplicación en los pinares de montaña mediterráneos como medida de adaptación al cambio climático. En: *los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, pp 555-564. Madrid.

WIRTH, C.; GLEIXNER, G.; HEIMANN, M.; 2009. Old-Growth Forests: Function, Fate and Value – an Overview. In: Wirth, C., Gleixner, G., Heimann, M. (eds) *Old-Growth Forests*. Ecological Studies, vol 207. Springer, Berlin, Heidelberg.