



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1585

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

Organiza





Uso de LiDAR aerotransportado en la cuantificación y caracterización del regenerado de *Pinus pinea*

CALAMA SAINZ, R. (1), PARDOS MÍNGUEZ, M. (1), GORDO ALONSO, J. (2), MADRIGAL CASANUEVA, G. (1), MARTÍN-ALCÓN, S. (3), GARCÍA-GARCÍA, M. (1), GONZÁLEZ-GAARSLEV, D. (1), TOMÉ MORÁN, J.L. (3)

(1) ICIFOR, INIA-CSIC. Dpto. Dinámica y Gestión Forestal. Ctra A Coruña km 7.5. 28040 Madrid

(2) Servicio Territorial de Medio Ambiente de Valladolid. C/ Duque de la Victoria 8. Junta de Castilla y León.

(3) AGRESTA Sociedad Cooperativa. C/ Duque de Fernán Núñez, 2, 1º 28012 - Madrid

Resumen

La consecución exitosa de la regeneración tras la aplicación de cortas constituye una pieza clave de la gestión forestal. Sin embargo, la cuantificación del regenerado establecido es compleja, realizándose normalmente mediante muestreos sistemáticos o transectos que habitualmente cubren únicamente una muy pequeña parte de la superficie.

En el trabajo analizamos la potencialidad del LiDAR para estimar y caracterizar la regeneración natural sobre un continuo espacial. Para ello se ha realizado un vuelo embarcado sobre dron en el sitio de ensayo de regeneración natural de *Pinus pinea* del MUP 43 de Valladolid. El sitio consiste en 6 parcelas de 0.48 ha, sometidas a distintas intensidades de corta, donde desde 2004 se hace un seguimiento sistemático del establecimiento, crecimiento y supervivencia del regenerado.

Se han obtenido cartografías continuas de regeneración del pinar a partir del procesado de la nube de puntos y mediciones de las subparcelas de campo. Los resultados muestran que el LiDAR puede ser un buen estimador de la regeneración por métodos de masa, con limitaciones para la individualización de pies en densidades altas. Trasferir esta metodología al LiDAR de media resolución de la tercera cobertura PNOA podría suponer una oportunidad para identificar zonas que pudieran necesitar de un apoyo a la regeneración.

Palabras clave

Dron, aclareo sucesivo uniforme, nube de puntos, regeneración natural.

1. Introducción

La consecución exitosa de la regeneración natural tras la aplicación de cortas constituye uno de los objetivos fundamentales de la práctica de la silvicultura, siendo elemento clave para la sostenibilidad de la gestión forestal (PARDOS et al. 2005). La definición del éxito en la consecución de la regeneración, transcurrido un



periodo de tiempo determinado tras la corta (conocido como periodo de regeneración) viene dado por una serie de parámetros (STEIN, 1992):

- Cantidad total de regenerado establecido, entendido como tal aquél que: (1) ha superado las fases iniciales de emergencia, (2) ha alcanzado una dimensión determinada, (3) en el que la mortalidad se ha estabilizado, y (4) aparecen algunas características determinadas (p.ej. acículas secundarias en las coníferas). Habitualmente se establece como exitoso cuando se supera un determinado umbral referido a número de plantas por hectárea.
- Distribución espacial del regenerado: se consideran como exitosos aquellos regenerados naturales en los que se observa una distribución uniforme o aleatoria del mismo, que implican que la probabilidad de ocurrencia del regenerado en cualquier punto del rodal es el mismo. Sin embargo, esta situación no es la habitual, siendo común la presencia en forma de clusters o agregados, con huecos sin regenerar.
- Composición: se considera exitoso un regenerado en el que la especie establecida es la especie objeto del plan de ordenación, y no otras que (arbóreas o arbustivas) que pueden desplazar a la especie principal.

La cuantificación y caracterización del regenerado se realiza habitualmente mediante inventarios por muestreo en campo (STEIN, 1992). Las técnicas de muestreo habitualmente utilizadas incluyen el muestreo en parcelas instaladas de forma sistemática o estratificada dentro del área de regeneración (p.ej. VERGARECHEA et al. 2019, LIMA DE CARVALHO et al. 2017) o el muestreo mediante transectos lineales (HESSNMÖLLER et al. 2013). Los inventarios por muestreo requieren de la determinación previa de parámetros tales como el número, forma y tamaños de las parcelas, o la longitud y ancho del transecto, y la distancia entre transectos (KREBS, 1998). En el caso de regenerados muy heterogéneos en distribución, composición o tamaño el conseguir una precisión dada puede requerir de tamaños de muestra muy elevados, que se traducen en elevados costes de inventario. Además, cuando el rodal en regeneración se ubica en localizaciones remotas o de difícil acceso, o el tránsito por el mismo es dificultoso (debido a la presencia de la propia regeneración, o de la entrada de especies arbustivas), el coste del inventario puede dispararse (MÍGUEZ Y FERNÁNDEZ, 2023).

Una alternativa a los inventarios de campo viene dada por el uso de técnicas de sensor remoto, tales como fotogrametría, LiDAR o información espectral (GOODBOY, 2017; RÖDER et al. 2018). Estas técnicas pueden proporcionar al gestor forestal información detallada acerca de la distribución horizontal y estratificación vertical del regenerado en un continuo espacial. Además, pueden incorporar información espectral que permita clasificar a nivel de especie o determinar el estado sanitario del arbolado. Para el caso de rodales de pequeño tamaño, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) junto con muestreos de alta resolución se ha considerado una alternativa válida para cuantificar y caracterizar la regeneración (GOODBOY, 2017; MIGUEZ Y FERNÁNDEZ, 2023).

Conseguir la regeneración natural de las masas de pino piñonero en la Meseta



Norte tras la aplicación de cortas de regeneración es una tarea compleja, y que ha sido estudiada desde diferentes aproximaciones (ver GORDO et al. 2012). El carácter irregular de las cosechas y la tendencia natural a formar densos bosquetes de regenerado bajo las copas hace que la estructura del regenerado de la especie sea heterogénea, y difícil de cuantificar. En el presente trabajo vamos a utilizar los datos de regenerado establecido en un ensayo de regeneración de la especie, instalado en el año 2003 en la provincia de Valladolid, sobre el que hemos realizado un vuelo LiDAR, al objeto de evaluar la eficacia de esta técnica a la hora de cuantificar y caracterizar la consecución exitosa del regenerado de la especie.

2. Objetivos

Los objetivos del trabajo son:

1. Relacionar métricas derivadas del LiDAR aerotransportado con mediciones reales del regenerado tomadas en parcelas de campo
2. Evaluar la potencialidad del LiDAR aerotransportado para estimar el éxito del regenerado en un continuo espacial

3. Metodología

Sitio de ensayo de regeneración natural del MUP43 “Corbejón y Quemados”

En el año 2003 se procedió a instalar un sitio de ensayo para el estudio de la regeneración natural de *Pinus pinea* en la provincia de Valladolid (figura 1). Se eligió para ello un rodal puro y maduro (120 años) que ocupa una superficie cercana a las 8 ha. En el rodal se instalaron siete parcelas de 0.48 ha (dimensiones 60 x 80 m), con densidad media previa a la corta de 160 pies ha⁻¹, y área basimétrica 18 m² ha⁻¹. Tres de las parcelas (parcelas 1, 2 y 3) fueron sometidas a un tratamiento de corta a hecho en dos tiempos (CH2), reduciendo la densidad a 45 pies ha⁻¹ (área basimétrica 7-9 m²ha⁻¹). Otras tres parcelas (parcelas 4, 5 y 6) se sometieron a la corta diseminatoria de un tratamiento de aclareo sucesivo uniforme (ASU), reduciendo la densidad a 75 pies ha⁻¹ (área basimétrica 10-12 m² ha⁻¹). Por último, una última parcela fue considerada como control, aplicando únicamente unas cortas ligeras de policía, que redujeron la densidad a 150 pies ha⁻¹.

alt1



Figura 1. Localización de las 6 parcelas de ensayo. A la izquierda año 2006 tras la ejecución de la primera fase de los tratamientos selvícolas. A la derecha en el año 2020 tras la ejecución de la segunda fase de los tratamientos selvícolas, donde se puede apreciar el regenerado instalado

Dentro de cada parcela de 0.48 ha se replantearon de manera sistemática (ver figura 2) una red de 32 subparcelas de 9 m² (3 x 3 m), donde se realiza anualmente el seguimiento del regenerado. Esto implica que la superficie total muestreada es de 288 m², lo que supone una intensidad de muestreo del 6%. En estas subparcelas se realiza el seguimiento anual, desde el momento de la instalación, de las siguientes variables:

- Regenerado incorporado del año, marcándose y posicionándose en cuadrantes de 1 m² dentro de la subparcela (entre 2003 y 2015)
- Supervivencia de las plantas medidas en inventarios anteriores (entre 2003 y 2024)
- Altura de las plantas medidas en inventarios anteriores (entre 2003 y 2024)

En el año 2016, y tras comprobar el éxito del método de cortas por ASU, se procedió a realizar una primera corta aclaratoria, en la que se eliminaron aproximadamente el 40%-50% de los pies remanentes, procediendo a liberar bosquetes de regenerado establecido bajo copa (figura 1). En las parcelas sometidas a corta a hecho de dos tiempos, con regeneración mucho menos exitosa, se procedió únicamente a eliminar dos pies por parcela, liberando alguno de los escasos golpes de regenerado establecidos. En ese año 2016, y tras comprobar que

en la parcela control no se había producido establecimiento de regeneración, se aplicó en la misma una corta por ASU, y se sacó del ensayo. Más información sobre el diseño experimental en GORDO et al. (2012) y CALAMA et al. (2025).



Figura 2. Ejemplo de Replanteo de las 32 subparcelas de 3x3 m para la parcela 1, este esquema se repite en cada una de las otras 5 parcelas

Regeneración establecida: estado 2024

La fecha del último inventario es noviembre de 2024. La densidad media de regenerado establecido en las parcelas ASU es de 5486 plantas.ha⁻¹, mientras que en las CH2 es de 613 plantas.ha⁻¹. Sin embargo, estas plántulas se encuentran muy irregularmente distribuidas en el espacio. A nivel de subparcela de 9 m², sólo en el 42% de las subparcelas en zona ASU (41 de 96) aparece regenerado establecido, mientras que en el caso de las subparcelas localizadas en zona CH2 ese porcentaje se reduce al 11% (11 de 96). Incluso considerando sólo las subparcelas en las que hay regenerado, se observa una gran variabilidad entre subparcelas, con un promedio de 0.53 plantas m⁻² en las parcelas CH2 (CV: 124%) y un promedio de 1.32 plantas m⁻² en ASU (CV: 197%). Esto se traduce en unas distribuciones de presencia de regenerado muy sesgadas hacia la izquierda, con muchas parcelas con poco regenerado, y pocas parcelas con mucho regenerado establecido (ver figura 3). En cuanto a la altura media del regenerado establecido se observa un comportamiento opuesto (mayor altura en las parcelas CH2 que en las ASU) y una menor variabilidad, alcanzando una altura promedio de 319 cm en las parcelas CH2 (CV:43%) frente a los 198 cm de las parcelas ASU (CV: 34%).

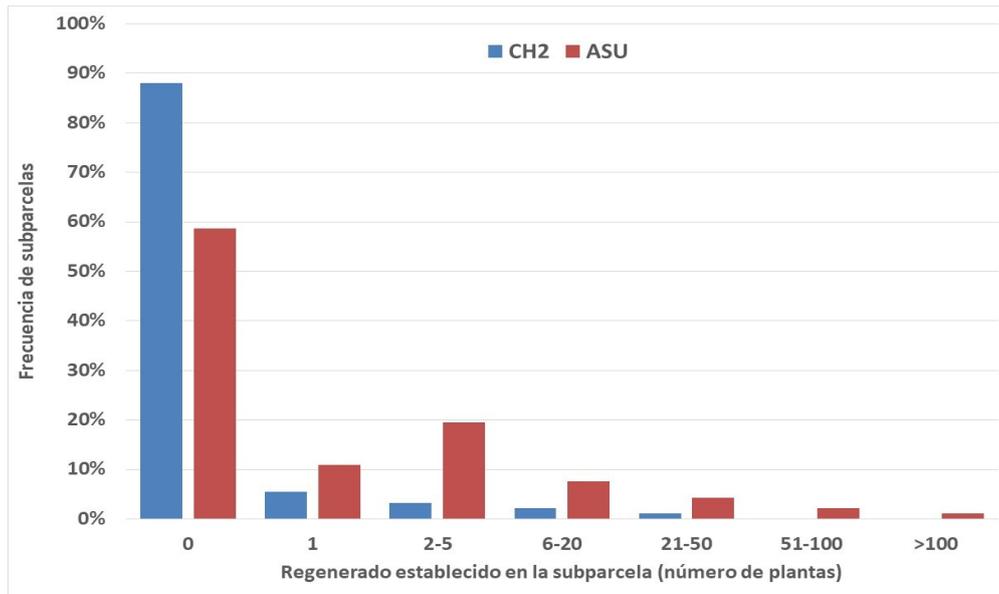


Figura 3. Histograma de frecuencias para la cantidad regenerado establecido en las subparcelas, según tratamiento de corta

Muestreo LiDAR

El 30 de octubre de 2024, y coincidiendo en el tiempo con la realización del inventario de campo de las parcelas de regeneración, se ha procedido a realizar un vuelo con la plataforma DJI MATRICE 300 RTK, especialmente diseñada para la realización de operaciones profesionales en los ámbitos de obra civil, topografía, inspección técnica, forestal, patrimonio, seguridad, vigilancia. La plataforma embarcaba un sensor DJI ZENMUSE L1, diseñado para realizar levantamientos de nubes de puntos LiDAR y fotogrametrías con precisiones centimétricas (figura 4).



Figura 4. DJI MATRICE embarcando el DJI ZENMUSE L1 instantes antes del despegue

En la planificación de la misión de vuelo que abarca una superficie de 6,65 ha conteniendo las parcelas de estudio se establecen los siguientes parámetros:

- GSD: 1,09 cm/píxel.
- Altura de vuelo: 60 metros AGL (Above Ground Level).
- Velocidad de crucero: 3,5 metros/segundo.
- Superposición lateral: 20%.
- Superposición frontal: 70%.
- Modo de retorno: triple.
- Densidad estimada: 673 pulsos/m²
- Duración del vuelo: 14 minutos y 28 segundos
- Distancia lineal de vuelo: 2349 metros
- Número de fotografías: 215 fotografías.

Una vez en gabinete se hizo un primer procesado de la nube de puntos a través de la aplicación DJI Terra, obteniéndose una nube de puntos bruta sin optimizar con una densidad promedio de 974 retornos/m². Una vez depurada la nube de puntos se ha generado un entregable de 49 pulsos/m² con el objetivo de eliminar aquellos puntos con menor precisión y optimizar el rendimiento informático de la fase de postproceso, con errores en X, Y, Z inferiores a los 10 cm.

En la figura 5 se puede apreciar de manera visual que la regeneración actual bajo el dosel de copas ha sido más eficiente en las parcelas tratadas por ASU que en las tratadas por CH2.

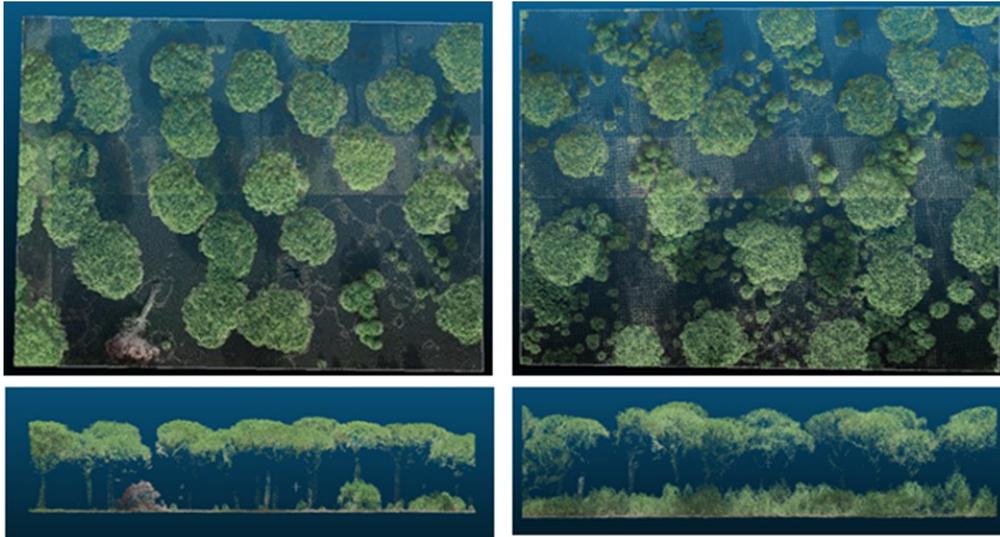


Figura 5. Vistas Zenital y de perfil dirección sur a norte de la parcela 2 tratada con CH2 (izquierda) y la parcela 5 tratada con ASU (derecha).

Procesado de la nube de puntos

El siguiente paso es el procesado de la nube de puntos optimizada, en una primera fase ha sido necesario clasificar la nube de puntos identificando los puntos de suelo para poder normalizar la altura de los puntos de vegetación. Para ello se ha utilizado la herramienta "lasground" del software LAStool.

Una vez hecho esto se ha procesado la nube de puntos utilizando desarrollos de software propios de Agresta S. Coop. y trabajando sobre el paquete LidR (ROUSSEL et al., 2020). En primer lugar, se ha generado un modelo digital de elevaciones a partir de los puntos clasificados como suelo. A partir de esta información se ha generado una batería de 70 estadísticos relativos a la distribución de alturas y coberturas de la nube de puntos de entre 0,3 y 6 m para caracterizar el regenerado bajo la cubierta de los árboles padres utilizando un tamaño de celda de 1x1 m. Se ha usado un umbral de 6 metros para discriminar el regenerado en función de los datos de los muestreos de campo y comprobando que la base de los árboles padre queda por encima del mismo con la propia nube de puntos LiDAR.

Posteriormente estas bases de datos georreferenciadas con los principales estadísticos LiDAR se han convertido en capas en formato vectorial para permitir su análisis espacial, con lo que se dispone de una cuadrícula de 1x1 m para toda la superficie de vuelo.

De entre los 70 estadísticos analizados se han seleccionado cuatro para compararlos con los resultados de campo por su especial significación en este sentido:

- zq95: Percentil 95 de las alturas entre 0,3 y 6 m.
- fcc: Porcentaje de los primeros retornos entre 0,3 y 6 m, esta medida de la cobertura LiDAR en este caso se ve afectada por las copas de los árboles padre que interceptan parte de estos primeros retornos.
- zmean: Altura media de los retornos entre 0,3 y 6 m.
- pzbv1: porcentaje de todos los retornos por encima de 1 m que están entre 0,3 y 6 m.

Seleccionados estos estadísticos se ha hecho una intersección de la capa con las 32 subparcelas medidas en campo por cada parcela principal y se ha obtenido un promedio ponderado por superficie de ocupación de los estadísticos correspondientes a las cuadrículas que intersecan las subparcelas. Esta información se ha contrastado con la información medida en campo.

Análisis estadístico

El primer objetivo de nuestro estudio es analizar si existe una correlación significativa entre las métricas derivadas del procesado de la nube LiDAR y los datos medidos en campo. Para ello, en un primer análisis vamos a estudiar si en aquellas subparcelas de 9 m² en las que el LiDAR detecta la presencia de regenerado (definido como la detección de un valor no nulo en la subparcela en cualquiera de las cuatro variables zq95, fcc, zmean y pzbv1) se corresponde con subparcelas en las que en los muestreos de campo hayamos identificado regenerado establecido.

Para ello, vamos a utilizar una matriz de confusión (tabla 1) que permita comparar la realidad campo con la regeneración detectada por el LiDAR. Se establecerá una matriz para cada una de las cuatro métricas LiDAR obtenidas. En el caso de las métricas relacionadas con la altura del regenerado, y al objeto de desechar retornos debidos a la presencia de tocones, ramas, restos de troncos u otros, se compararán distintas alturas de corte de la nube de puntos para discriminar regenerado de no regenerado, entre 0,3 y 1 m.

Tabla 1. Modelo de matriz de confusión

Métrica	Regeneración observada en campo			
	SÍ	NO	TOTAL	
Regeneración predicha a través de LiDAR	SÍ	VP	FP	PP = VP + FP
	NO	FN	VN	PN = FN + VN
TOTAL	TP = VP + FN	TN = FP + VN	PP + PN =	TP + TN

Donde VP representa los verdaderos positivos (subparcelas donde existe



regeneración y el LiDAR la detecta), VN los verdaderos negativos (subparcelas donde no existe regeneración y el LiDAR no la detecta), y FP y FN representan los falsos positivos y falsos negativos respectivamente. TP y TN representan el total de positivos y de negativos (número de subparcelas en las que verdaderamente hay o no hay regeneración), y PP y PN representan el total de parcelas predichas como positivos o negativos a partir de la métrica LiDAR empleada. A partir de esos datos, de cada matriz de confusión obtendremos los siguientes estadísticos:

- Sensibilidad = VP / TP
- Especificidad = VN / TN
- % Falsos Positivos = FP / PP
- % Falsos negativos = FN / PN
- OOB-error, equivalente al % de observaciones mal clasificadas = $[FP + FN] / [VP + VN + FP + FN]$

Utilizaremos asimismo el coeficiente Kappa de Cohen, que es una medida estadística utilizada para cuantificar el nivel de acuerdo entre dos clasificadores, en este caso la observación real y la predicha según el LiDAR. Este estadístico compara la concordancia en las predicciones con la concordancia esperada al azar, y cuanto más cercano a 1 es indica mayor concordancia.

En una segunda parte del análisis vamos a reevaluar si existe una correlación significativa entre la altura media del regenerado medidas en la subparcela en 2024 (Alt_24, expresada en cm) y entre el número de plantas de regenerado observado en la subparcela (N_24), y alguna de las métricas LiDAR (Zq95, Zmean, fcc y pzbv1). En el caso de identificar una correlación significativa procederemos a ajustar un modelo de regresión lineal.

La última parte del análisis consistirá en utilizar el mejor clasificador identificado y los modelos de cobertura y altura de la regeneración para cuantificar el total de regeneración detectado en la parcela, y comparar los valores obtenidos con los medidos en campo.

4. Resultados

Matriz de confusión

El resultado para las matrices de confusión entre las subparcelas con regeneración observada en campo y aquellas en las que se detecta regeneración a través del LiDAR se incluye en la figura 6. Para las métricas LiDAR relacionadas con la altura los mejores resultados se obtienen proponiendo un corte de la nube a 0,4 m de altura (Zmean) y a 0,5 m (Zq95).

Zq95 > 0.5 m		Regeneración observada en campo			zmean > 0.4	Regeneración observada en campo			
		SÍ	NO	TOTAL		SÍ	NO	TOTAL	
Regeneración predicha LIDAR	SÍ	41	17	58	Regeneración predicha LIDAR	SÍ	40	15	55
	NO	12	122	134		NO	13	124	137
	TOTAL	53	139	192		TOTAL	53	139	192

fcc > 0		Regeneración observada en campo			Pzvb1	Regeneración observada en campo			
		SÍ	NO	TOTAL		SÍ	NO	TOTAL	
Regeneración predicha LIDAR	SÍ	40	23	63	Regeneración predicha LIDAR	SÍ	50	38	88
	NO	13	116	129		NO	3	101	104
	TOTAL	53	139	192		TOTAL	53	139	192

Figura 6 Matrices de confusión para los cuatro estadísticos derivados del LiDAR

La tabla 2 muestra los estadísticos derivados de las cuatro matrices de confusión.

Tabla 2. Estadísticos derivados de las cuatro matrices de confusión.

Zq95>0.5	Zmean >0.4	Fcc >0	Pzvb1>0	
Sensibilidad	0,7736	0,7547	0,7547	0,9434
Especificidad	0,8777	0,8921	0,8345	0,7266
Falsos positivos	0,2931	0,2727	0,3651	0,4318
Falsos negativos	0,0896	0,0949	0,1008	0,0288
OOB_error	0,1510	0,1458	0,1875	0,2135
Kappa Cohen	0,6328	0,6393	0,5568	0,5564

Del análisis de las matrices de confusión y estadísticos derivados podemos extraer algunas conclusiones:

- Las clasificaciones derivadas de las cuatro métricas LiDAR dan lugar a valores de sensibilidad y especificidad por encima de 0,70, con valores de OOB inferiores a 0,21, pudiendo considerarse resultados muy aceptables
- La clasificación utilizando las métricas derivadas de la altura LiDAR Zq95 y Zmean proporcionan en general valores de OOB menores, mayor valor de especificidad y menor porcentaje de Falsos Positivos y Falsos Negativos que las derivadas de la cobertura LiDAR Fcc y Pzvb1. Asimismo, estas métricas dan lugar a valores de la Kappa de Cohen cercanas a 1
- La clasificación derivada de la métrica Pzvb1 resulta en la mayor sensibilidad (porcentaje de subparcelas con regeneración bien clasificada) pero también en el mayor porcentaje de falsos positivos. Esto se debe a que clasifica como subparcelas con regeneración a un total de 88 de 192, mientras que la realidad es que únicamente hay regenerado en 53 de las subparcelas.
- Se selecciona como mejor clasificador la métrica Zmean, considerando como regeneradas aquellas subparcelas en las que el valor de este estadístico sea superior a 0,4 m

Análisis de correlación

La tabla 3 muestra la correlación de Pearson entre las variables medidas en campo N_24 y Alt_24 y las derivadas del LiDAR. Se observa que salvo la correlación entre fcc y N_24 y la de Zmean y Alt_24 el resto son significativas (pvalor < 0.05). La métrica Pzvb1 es la que presenta una mayor correlación con el número de plantas en la subparcela (N_24), mientras que la altura media de las plantas medida en campo (Alt_24) presenta mayor correlación con Zq95.

Tabla 3 Coeficiente de correlación de Pearson y p-valor asociado (entre corchetes) para la relación entre N_24 y Alt_24 y las métricas derivadas del LiDAR

	N_24		Alt_24	
fcc	0,1689	[0,2974]	0,3263	[0,0399]
Pzvb1	0,3889	[0,0053]	0,3142	[0,0263]
Zq95	0,3191	[0,0420]	0,3709	[0,0170]
Zmean	0,2931	[0,0368]	0,2620	[0,0631]

Se ajustan los siguientes modelos de regresión lineal simple para N_24 y Alt_24, en función de las mejores variables LiDAR predictoras. Se ha intentado el ajuste de modelos de regresión lineal múltiple, pero no se han identificado más variables significativas. Los modelos, pese a ser significativos, explican un porcentaje de la variabilidad total en la variable de respuesta del orden del 0,15-

$$N_{24} = 1,1169 + 0,3676 * pzvb1 (R^2 = 0,1513)$$

$$Alt_{24} = 145,9379 + 54,7089 * Zq95 (R^2 = 0,1376)$$

Cuantificación del regenerado existente en las parcelas a partir de las métricas LiDAR

En la figura 7 podemos ver una cartografía continua del estadístico de altura Zmean para las celdas con alturas mayores de 0,4 m relacionado con la presencia de regeneración con una resolución de 1x1 m tanto de las parcelas medidas como de sus alrededores. Se puede apreciar visualmente como los tratamientos de ASU a la izquierda (parcelas 4, 5 y 6) han tenido un mayor éxito que los tratamientos de CH2 (parcelas 1,2 y 3).

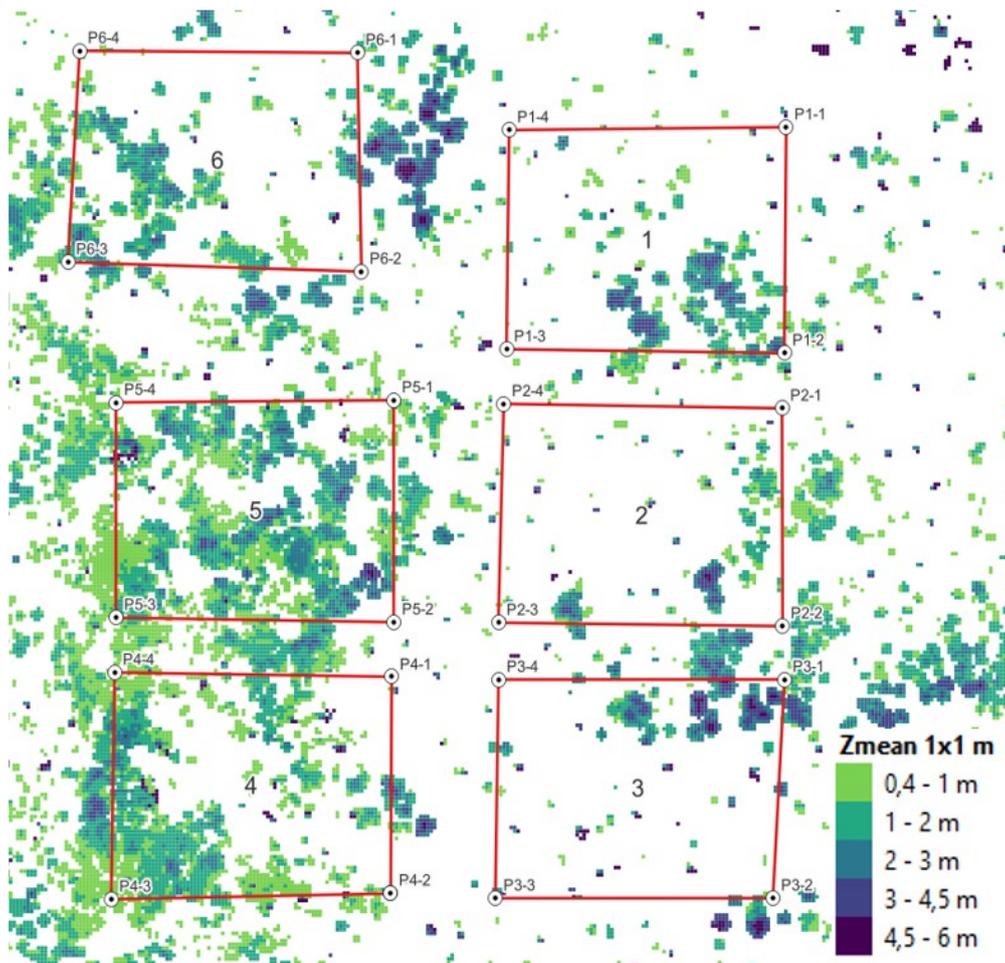


Figura 7. Cartografía continua en 1x1 m del Zmean de la altura del regenerado bajo copa.

La tabla 4 muestra el porcentaje de superficie regenerada por cada parcela identificado a través de las celdas con altura media mayor que 0,4 m y la altura promedio obtenida con el modelo Alt_24 para la misma. Se vuelve a apreciar el éxito de la regeneración en las parcelas sometida a ASU, y la mayor altura media alcanzada por los pies de regenerado localizados en las parcelas con CH2. A modo de comparación se incluyen los valores de % de posiciones de 1 x 1 m regeneradas observadas en nuestro muestreo sistemático y la altura media observada en campo. Se aprecia que el muestreo sistemático en subparcelas de 3 x 3 m, que abarca el 6% de la superficie, subestima la cantidad total de regenerado incluido en la parcela, sobre todo en parcelas con muy poco regenerado, mientras que las alturas tienden a ser de la misma magnitud.

Tabla 4. Resultados por parcela de ensayo: porcentaje de superficie con regeneración y altura promedio de altura de la regeneración según el modelo Alt_24, y comparación con los datos del muestreo sistemático

Parcela	Tratamiento	Derivado de LiDAR	Muestreo sistemático en campo		
% Superficie regenerada	Alt_24 Promedio (cm)	% Posiciones ocupadas por regenerado	Alt_24 Promedio (cm)		
1	CH2	17,12%	280,4	7,99%	340,4
2	CH2	10,08%	264,3	1,74%	133,7
3	CH2	10,96%	323,4	1,04%	352,5
4	ASU	40,28%	243,6	12,15%	211,7
5	ASU	55,43%	257,0	27,78%	179,4
6	ASU	22,01%	257,6	7,99%	271,9

La figura 8 muestra la altura promedio de la regeneración modelada con Alt_24 de manera continua en el rodal donde están ubicadas las parcelas.

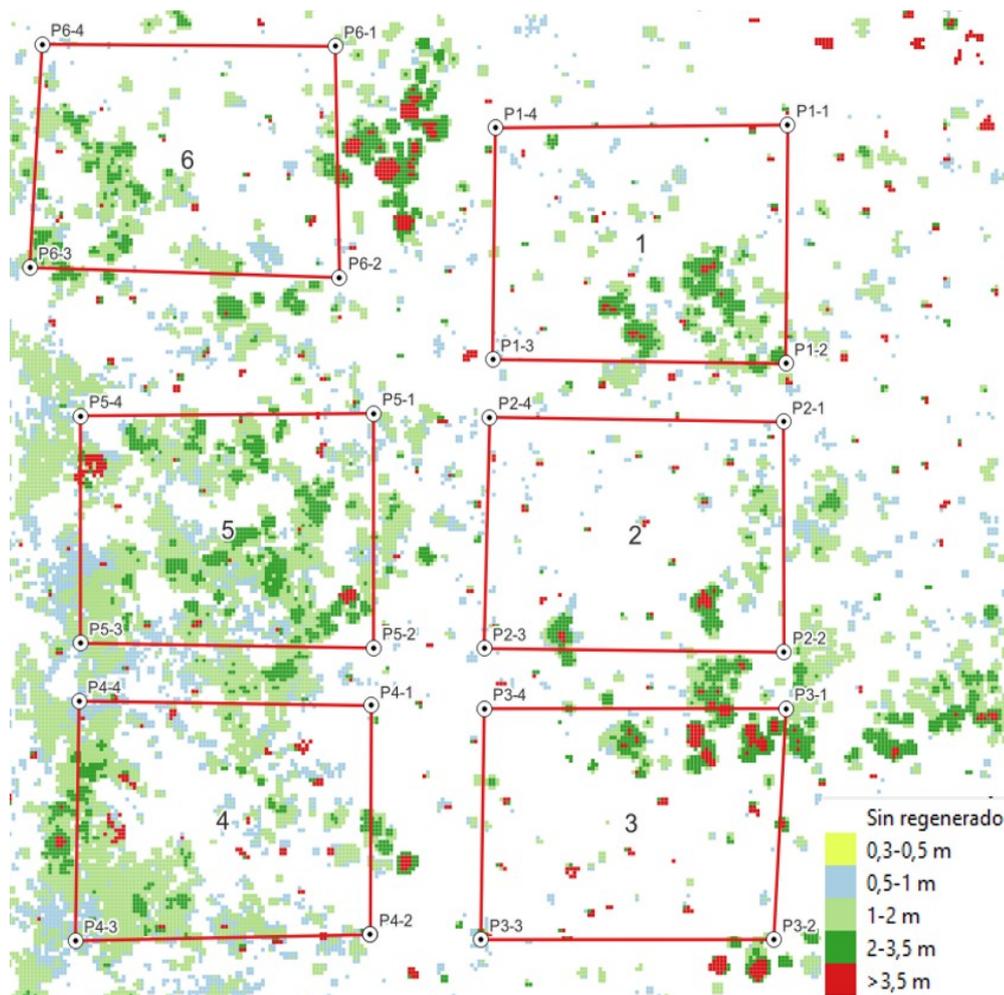


Figura 8. Cartografía continua en 1x1 m de la altura promedio del regenerado en m

modelado con Alt_24.

5. Discusión

Las métricas LiDAR utilizadas en el presente trabajo han resultado más adecuadas para discriminar la existencia o no de regenerado a nivel de celda, que para predecir la altura media de la celda o el número de plantas establecidas en la misma. Todas las métricas utilizadas en la clasificación de las celdas han alcanzado niveles de sensibilidad y especificidad superiores al 70%, y la métrica finalmente seleccionada (Zmean, definida como la altura media de los retornos entre 0,3 y 6 m, poniendo el punto de corte en 0,4 m) presenta un valor de sensibilidad superior a 0,75, especificidad superior a 0,89, y un porcentaje de observaciones bien clasificadas del 85%.

Estos valores de detección de regenerado son superiores a los observados en otros trabajos. AMIRI et al (2016) consiguen clasificar correctamente la cobertura del regenerado hasta en un 60% de ocasiones, tendiendo a clasificar mal en las zonas con poca regeneración, aunque hay que tener en cuenta que el estudio se llevó a cabo en un bosque mixto con mucha heterogeneidad en Baviera (Alemania). WING et al. (2012) alcanzan valores cercanos al 75% en la clasificación de cobertura del sotobosque, aunque en esta ocasión en un pinar de *Pinus ponderosa* en las montañas de California con matorral, sistema más simplificado que el anterior pero aún bastante más complejo que el nuestro. En ese sentido, el sitio de ensayo del MUP 43 presenta unas características que lo hacen muy adecuado para el uso de estas técnicas, como son la baja densidad de arbolado adulto (entre 40 y 50 pies ha⁻¹), la práctica ausencia de matorral u otras especies arbóreas en el sotobosque, el vegetar en un terreno llano, y el estado actual de desarrollo del regenerado establecido, que presenta alturas medias entre 2 y 3 m. Por último, HILL Y BROUGHTON (2009) alcanzan un % de observaciones bien clasificadas del 77% en la determinación de celdas ocupadas indistintamente por matorral o regenerado, en el sotobosque de un bosque de *Quercus robur* en Reino Unido, en el que el vuelo LiDAR se realizó con y sin hojas.

En nuestro caso, las métricas basadas en la altura mejoran su potencial de clasificación al establecer como punto de corte 0,4 m. Pese a la ausencia de matorral en el sotobosque y la nula pedregosidad del terreno, en este tipo de masas si es habitual encontrar tocones, restos de ramas caídas, pequeños troncos, y madera muerta en general. La posible confusión entre regenerado de pequeño tamaño y madera muerta ha sido también evidenciada en WING et al. (2012). Por último, las métricas basadas en cobertura, especialmente pzbv1, tienden a sobreestimar la cobertura del regenerado, aspectos que puede estar relacionado con los retornos que tienen lugar en la parte inferior del tronco.

La alta precisión alcanzada en la identificación de las subparcelas ocupadas por regeneración contrasta con el bajo porcentaje de variabilidad explicada en las variables medidas en campo (altura media del regenerado y número de plantas medidas en la subparcela) por las métricas LiDAR. Aunque es posible identificar correlaciones estadísticamente significativas, el porcentaje de variabilidad explicado se sitúa en torno al 15%, valores similares a los obtenidos por MÍGUEZ Y FERNÁNDEZ (2023) sobre regenerado post-incendio de *Pinus pinaster* en Galicia. La



detección tanto de la altura individual como del número de individuos en una subparcela se basa en la identificación de máximos locales, lo que puede conducir a estimaciones sesgadas en el caso de bosquetes de regenerado hiperdensos o bosquetes ubicados bajo cubierta donde pueden producirse oclusiones. En ese sentido hay que tener en cuenta la naturaleza propia del regenerado de *Pinus pinea*, que tiende a formar agregados bajo las copas de los pies remanentes (GORDO et al. 2012, CALAMA et al. 2015). La presencia bajo cubierta de este regenerado, unida a la extensión horizontal de las copas y la densidad del follaje puede estar provocando múltiples oclusiones que impidan identificar e individualizar de manera correcta los ápices de las plantas establecidas (MÍGUEZ Y FERNÁNDEZ, 2023).

Aunque la finalidad del muestreo sistemático por subparcelas establecido en el sitio de ensayo no es calcular el total de regenerado establecido, hemos realizado una comparación entre el porcentaje medio real de posiciones de 1 x 1 m de las subparcelas ocupadas con regenerado (como indicador del % total de superficie regenerando en la parcela) y el % de píxeles de 1 x 1 m en los que aparece regenerado de acuerdo al criterio de corte de la mejor métrica LiDAR. El resultado apunta a que el muestreo sistemático subestima el % total de superficie regenerada. Dos son los factores que pueden explicar este hallazgo: por un lado, los muestreos sistemáticos no son adecuados para cuantificar cobertura cuando la distribución espacial es muy heterogénea y por agregados (KREBS, 1998), como es el caso de la regeneración natural. En este tipo de formaciones puede ser más adecuado un muestreo por transecto o estratificado. Por otro lado, nuestras subparcelas sistemáticas quedan localizadas en el interior de la parcela de mayor tamaño, con una separación mínima de 10 m, lo que da lugar a una franja no muestreada (ver figura 2). Todo lo anterior refuerza el papel que esta tecnología puede jugar en la estimación de la regeneración natural a gran escala, suponiendo un avance frente a los tradicionales inventarios.

6. Conclusiones

Nuestros resultados evidencian que el uso de técnicas de sensor remoto (LiDAR de alta resolución) transportado en un vehículo aéreo no tripulado tipo dron al objeto de cuantificar el regenerado establecido pueden ser una alternativa viable al inventario de campo tradicional. En nuestro caso de estudio, con baja densidad de arbolado y el regenerado concentrado bajo las copas las métricas LiDAR son más eficaces a la hora de predecir el grado de ocupación por parte del regenerado que la altura media del mismo o el número de plantas establecidas en cada celda. Una vez demostrada la capacidad de estas técnicas para estimar la regeneración en este tipo de pinares, las líneas futuras de investigación deben orientarse a transferir esta metodología al LiDAR de media resolución de la tercera cobertura PNOA, que permitiría identificar el éxito y fracaso de la regeneración en grandes áreas, facilitando la priorización de zonas que pudieran necesitar de un apoyo a la regeneración.

7. Agradecimientos

El presente trabajo se ha llevado a cabo en el marco financiero y funcional del proyecto de transferencia MITECO2023-AF. 20234TE005 entre el MITERD y el CSIC



y del proyecto PID2022-136906OB-C21. BEGINPINE financiado por la Agencia Española de Investigación. Los autores quieren agradecer al Ayto. de Portillo y a los agentes forestales del S.T. de Medio Ambiente por su apoyo en el mantenimiento del sitio de ensayo, y la empresa AEROBUR por la realización del vuelo dron y la captura de datos, y su apoyo en el procesado de las nubes de puntos.

8. Bibliografía

AMIRI, N.; YAO, W.; HEURICH, M.; KRZYSTEK, P.; SKIDMORE, A.K. 2016. Estimation of regeneration coverage in a temperate forest by 3D segmentation using airborne laser scanning data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 252-262, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.022>.

CALAMA, R., MANSO, R., BARBEITO, I., MADRIGAL, G., GARRIGA, E., GORDO, FJ., MONTERO, G., CAÑELLAS, I., PARDOS, M. 2015. Do inter-specific differences in seed size determine natural regeneration traits in *Pinus pinea* and *Pinus sylvestris*. *Applied Ecology and Environmental Research* 13(2): 387-404. Doi: 10.15666/aeer/1302_387404

CALAMA, R.; GORDO, F.J.; MANSO, R.; MADRIGAL, G.; MONTERO, G.; GARRIGA, E.; PARDOS, M. 2025. Cerrando el ciclo: 21 años de seguimiento de la regeneración natural de *Pinus pinea* en el sitio de ensayo MUP 43 “Corbejón y Quemados” (Valladolid). Comunicación en 5º CFE.

GOODBODY, T.; COOPS, N.; HERMOSILLA, T; TOMPALSKI, P.; CRAWFORD, P. 2017. Assessing the status of forest regeneration using digital aerial photogrammetry and unmanned aerial systems. *International Journal of Remote Sensing*. 39. 1-19. 10.1080/01431161.2017.1402387.

GORDO, J., CALAMA, R., PARDOS, M., BRAVO, F., MONTERO, G. (Editores.). 2012. La regeneración natural de *Pinus pinea* L. y *Pinus pinaster* Ait. en los arenales de la Meseta Castellana. Edita IUGFS. ISBN: 978-84-615-9823-6. 254 pp

HILL, R.A.; BROUGHTON, R.K. 2009. Mapping the understory of deciduous woodland from leaf-on and leaf-off airborne LiDAR data: A case study in lowland Britain. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(2), 223-233, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.12.004>.

HESSENMÖLLER, D.; ELSENHANS, A.S.; SCHULZE, E.D. 2013. Sampling forest tree regeneration with a transect approach. *Annals of Forest Research* 56(1): 3-14

KREBS, C.J. 1998. *Ecological Methodology*. Benjamin/Cummings. G20 pp. Menlo Park, California.

LIMA DE CARVALHO, A.; NEVES D'OLIVEIRA, M.V.; PUTZ, F.E.; DE OLIVEIRA, L.C.



2017. Natural regeneration of trees in selectively logged forest in western Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 392, 36-44, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.049>.

MÍGUEZ, C.; FERNÁNDEZ, C. 2023. Evaluating the Combined Use of the NDVI and High-Density Lidar Data to Assess the Natural Regeneration of *P. pinaster* after a High-Severity Fire in NW Spain. *Remote Sensing* 15, 1634. <https://doi.org/10.3390/rs15061634>

PARDOS, M.; RUIZ DEL CASTILLO, J.; CAÑELLAS, I.; MONTERO, G.; 2005. Ecophysiology of natural regeneration of forest stands in Spain. *Forest Systems* 14(3) 434–445.

RÖDER, M.; LATIFI, H.; HILL, S.; WILD, J.; SVOBODA, M.; BRŮNA, J.; NOVAKOVA, N.H.; GÜLCH, E.; HEURICH, M. 2018. Application of optical unmanned aerial vehicle-based imagery for the inventory of natural regeneration and standing deadwood in post-disturbed spruce forests. *International Journal of Remote Sensing*, 39, 5288–5309. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1441568>

ROUSSEL, J-R.; AUTY, D.; COOPS, N.; TOMPALSKI, P.; GOODBODY, T.R.H.; MEADOR A.S.; BOURDON J-F.; BOISSIEU, F.; ACHIM, A. 2020. lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*, Volume 251, 112061, ISSN 0034-4257.

STEIN, W. I. 1992. Regeneration surveys and evaluation. Capítulo 15 en S.D. Hobbs (Ed.), *Reforestation practices in southwestern Oregon and northern California* (pp. 346-382). Corvallis, OR: Forest Research Laboratory. Oregon State University.

VERGARECHEA, M., DEL RÍO, M., GORDO, J., MARTÍN, R., CUBERO, D., CALAMA, R. 2019. Spatio-temporal variation of natural regeneration in *Pinus pinea* and *Pinus pinaster* Mediterranean forests in Spain. *European Journal of Forest Research* 138: 313–326 <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01172-8>.

WING, B.M.; RITCHIE, M.W.; BOSTON, K.; COHEN, W.B.; GITELMAN, A.; OLSEN, M.J. 2012. Prediction of understory vegetation cover with airborne lidar in an interior ponderosa pine forest. *Remote Sensing of Environment*, 124, 730-741. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.024>.