



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1275

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

Organiza





Estimación de la productividad de materiales mejorados de eucalipto mediante el uso de nuevas tecnologías

GONZÁLEZ-GARCÍA, M. (1), MAJADA, J. (1) y CANGA LÍBANO, E. (1)

(1) Fundación Centro Tecnológico Forestal y de la Madera de Asturias (CETEMAS).

Resumen

Eucalyptus globulus es una de las principales especies forestales cultivadas en la península ibérica debido a su alta productividad y las propiedades de su madera, destinada fundamentalmente a la producción de pasta de celulosa y en menor medida a bioenergía y madera sólida. Este trabajo se centra en el estudio de la producción de genotipos seleccionados de esta especie mediante el uso de nuevas tecnologías. Para ello, se emplea la red experimental de ensayos “Eucalipto 2020” instalada en el norte de España con el objetivo de evaluar el comportamiento de materiales comerciales pertenecientes a empresas que desarrollan programas de mejora en el Sur de Europa. Para el desarrollo de modelos de productividad de cada genotipo se ha realizado un seguimiento del crecimiento de los árboles empleando sensores LiDAR. Estos datos han sido analizados y contrastados con datos recogidos en inventarios forestales en estos mismos ensayos. Los resultados obtenidos muestran que la metodología empleada presenta buena precisión frente a los valores obtenidos en los inventarios clásicos por lo que este tipo de sensores puede emplearse con seguridad y precisión en esta tipología de plantaciones optimizando la gestión del tiempo y la disponibilidad de los recursos.

Palabras clave

Eucalyptus globulus, genotipo, mejora genética, LiDAR, sensores remotos.

1. Introducción

El eucalipto *globulus* es una especie forestal originaria de Australia, adaptada exitosamente a diversas zonas del mundo, incluyendo el noroeste de España. Esta especie presenta una serie de ventajas que lo hacen relevante para diversas actividades económicas y medioambientales en la región, especialmente en las comunidades autónomas de Galicia, Asturias y Cantabria.

El cultivo de eucalipto *globulus* en el noroeste de España presenta una serie de ventajas tanto económicas como medioambientales. Desde su adaptabilidad al clima atlántico hasta su rentabilidad para las industrias de papel y energía renovable, esta especie tiene el potencial de ser un motor de desarrollo económico para la región. Además, su capacidad para recuperar suelos degradados, reducir la erosión y contribuir a la captura de CO₂ refuerza su papel en la sostenibilidad ambiental. Si bien es importante tener en cuenta los desafíos asociados con su cultivo, como la necesidad de una gestión sostenible, el eucalipto *globulus* sigue siendo una opción viable y prometedora para el futuro del noroeste de España.

El proyecto “Eucalipto 2020” se puso en marcha con el objetivo de solucionar la problemática de la pérdida de productividad por la falta de gestión forestal y el abandono de las masas (GOI Eucalipto, 2020). Este proyecto pretende obtener conclusiones relevantes acerca de los materiales vegetales de *E. globulus* que mejor se comportan en las distintas condiciones edafoclimáticas del norte de España (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2018). Esto permitirá en el futuro incrementar la



productividad de las plantaciones de eucalipto sin tener que aumentar su superficie de cultivo. La red experimental del proyecto, iniciada en 2014, se compone de cinco ensayos instalados en Asturias y Galicia. Estos ensayos incluyen un total de 25 materiales genéticos de *E. globulus*, pertenecientes a empresas que desarrollan programas de mejora en la península ibérica, y seleccionados para el área de distribución del eucalipto en el norte de España (González-García et al., 2018).

Para el estudio del crecimiento de estos ensayos se han empleado hasta el momento inventarios dendrométricos clásicos iniciándose recientemente el empleo de nuevas tecnologías (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2022). Los inventarios dendrométricos clásicos permiten disponer de las principales variables forestales para conocer la evolución y estimar productividad de la masa. Sin embargo, la realización periódica de este tipo de inventarios presenta limitaciones como el elevado coste de realización, costes que se reducirían si se apoyan en el uso de nuevas tecnologías y sensores remotos (Koch, 2013). Las nuevas tecnologías de teledetección permiten la obtención de datos para abordar las crecientes necesidades de información y apoyar la toma de decisiones en el ámbito forestal cumpliendo con objetivos actuales económicos, ambientales y sociales (WHITE et al., 2016). Como antecedentes de este trabajo se debe citar el trabajo de GONZÁLEZ-GARCÍA et al., (2022) donde se realizó una primera aproximación para el empleo de nuevas tecnologías de forma experimental en uno de los ensayos de la red experimental “Eucalipto 2020”. En el presente trabajo se pretende incorporar nuevos ensayos y datos de la evolución posterior de las masas forestales para mejorar la robustez de los modelos elaborados y las conclusiones alcanzadas.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es desarrollar nuevas herramientas que permitan evaluar el crecimiento de los distintos genotipos de la red de ensayos optimizando el uso de los recursos y contrastando el uso de inventarios clásicos con la aplicación de sensores remotos con sensor LiDAR (Light Detection and Ranging) montado en UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

3. Metodología

3.1. Características de los ensayos

Este trabajo se centró en dos de los ensayos de la red experimental “Eucalipto 2020”: San Cosme y Pevidal ensayos instalados en distintos Montes de Utilidad Pública del Principado de Asturias. Estos ensayos se encuentran en los concejos de Cudillero en el caso de San Cosme (más próximos a la costa Cantábrica con una altitud próxima a los 200 m) y en el concejo de Salas el ensayo de Pevidal (en el interior de la región, presentando unas características fisiográficas que hacen que se encuentre en el límite de la distribución de la especie, con una altitud media de 610 m sobre el nivel del mar). Los ensayos fueron instalados en el otoño de 2014 y el de 2016. En la Tabla 1 se especifican las características fisiográficas y edáficas de los ensayos experimentales empleados en este trabajo.

Tabla 1. Principales características de los ensayos experimentales.



Ensayo
San Cosme
Pevidal
Concejo
 Cudillero
 Salas
Provincia
 Asturias
 Asturias
Plantación
 12/2014
 11/2016
Superficie (ha)
 5,85
 4,75
Altitud (m)
 210
 610
Orientación
 N-NO
 E
Pendiente (%)
 54
 45
Análisis edáfico
(0-20 cm)
pH
MO (%)
Textura
Ntotal (%)
Pasim (ppm)
K+ (meq/100g)
 4,0
 9,7
 Fr-Aren
 0,33
 6,59
 0,45
 4,8
 14,0
 Fr-Aren
 0,60
 21,8
 0,26

En estos ensayos se incluyeron en total 14 materiales genéticos diferentes, materiales clonales y seminales, con un diseño experimental de mono-bloque por genotipo distribuido de forma aleatoria, ocupando cada bloque aproximadamente una superficie de 0,45-0,5 ha. Los genotipos incluidos en los ensayos se identificaron mediante un código numérico debido a que se trata de información confidencial.

La preparación del terreno consistió en un desbroce continuo de la vegetación y un ahoyado con retroaraña (60 x 60 x 60 cm), plantación manual y aplicación de 200 g/planta de fertilizante NPK 8/24/16. La densidad de plantación teórica establecida fue de 1.100 pies/ha con un marco de plantación de 3 x 3 m.

3.2. Parcelas de seguimiento y recogida de datos dendrométricos y LiDAR

Para realizar el seguimiento de los ensayos se instalaron parcelas cuadradas de 20 x 20 m (400 m²) en el interior de cada bloque de cada genotipo. La selección de la ubicación de las parcelas dentro de cada tratamiento se realizó seleccionando una área homogénea y representativa del material en el interior del bloque evitando el efecto borde.

En los inventarios dendrométricos realizados en otoño de 2023 se registraron las siguientes variables: (1) diámetro normal (d , cm) (1,3 m sobre el nivel del suelo) de todos los pies que alcanzaban dicha altura, en dos direcciones perpendiculares, medido con forcípula de precisión milimétrica, (2) altura total (h , m) de todos los pies y (3) altura de la primera rama viva de la copa del árbol (h_v , m) ambas medidas con un hipsómetro digital (Vértex III). Adicionalmente se tomaron datos de variables descriptivas, como la supervivencia del árbol y otros aspectos morfológicos como bifurcaciones o deformaciones, o si el árbol presentaba algún tipo de daño, tanto biótico como abiótico. Para las evaluaciones de plagas y enfermedades de los genotipos, que se llevan a cabo periódicamente en los ensayos, también se registraron otro tipo de variables que se omiten en este trabajo ya que no se consideran objeto de estudio. En la Tabla 2 se muestran los estadísticos de las variables dendrométricas recogidas en el inventario.

Tabla 2. Estadísticos resumen de las variables de inventario.

Genotipo	n	Diámetro normal: d (cm)				Altura total: h (m)			
		Min.	Max.	Media	Desv.	Min.	Max.	Media	Desv.
1	153	1,50	13,50	7,25	2,44	3,00	14,80	8,81	2,44
2	174	2,20	14,50	6,71	2,62	3,00	14,20	8,54	2,61
3	126	1,50	18,60	9,11	3,27	3,50	18,60	10,18	3,23
4	176	1,75	15,50	9,91	2,49	3,00	16,70	11,27	2,06
5	72	1,00	16,50	8,94	3,80	2,30	14,60	9,37	3,26
6	196	2,80	16,75	9,30	2,99	3,30	17,70	9,79	3,38
7	197	1,50	15,25	8,86	2,79	3,00	15,90	10,81	2,73
8	179	2,50	15,50	8,57	2,48	3,00	16,90	10,26	2,73
9	129	3,50	12,75	8,40	2,02	6,40	15,90	10,63	2,16
10	122	1,50	13,00	6,88	2,46	2,50	13,80	8,29	2,26
11	140	2,00	14,25	8,33	2,87	4,30	15,90	10,65	2,71
12	180	1,50	20,25	6,27	2,81	2,00	14,40	7,28	2,40
13	103	2,75	15,00	8,80	2,69	4,40	16,10	10,83	2,50
14	99	2,70	13,60	8,36	2,65	4,50	15,20	10,41	2,22
15	30	1,50	16,25	9,53	3,51	3,00	13,60	9,77	2,46
16	55	5,00	12,75	9,73	1,63	8,60	14,40	12,05	1,02
TOTAL	2,130	1,00	20,25	8,30	2,94	2,00	18,60	9,83	2,88

Adicionalmente, con el objetivo de conocer la posición real de cada árbol en el terreno, se llevó a cabo un posicionamiento de los pies mediante una Estación Total Trimble M3 DR3. Para la georreferenciación de las posiciones tomadas con la

estación total se tomó como referencia puntos tomados con el receptor GNSS *Leica Viva GS14 3.75G Performance* de doble frecuencia y precisión centimétrica.

Paralelamente al inventario de campo se tomaron datos LiDAR con un UAV equipado con un sensor LiDAR *L1 de DJI* con tres retornos por punto y consiguiendo una densidad superior a 100 puntos/m² sobre las áreas de estudio.

3.3. Preparación y procesado de datos

La nube de puntos LiDAR se depuró con el software *LasTools*, mediante la eliminación de outliers y duplicados. Se clasificó el suelo y se normalizó la nube de puntos para obtener la altura de la vegetación. En la Figura 1 puede verse la nube de puntos LiDAR del ensayo.

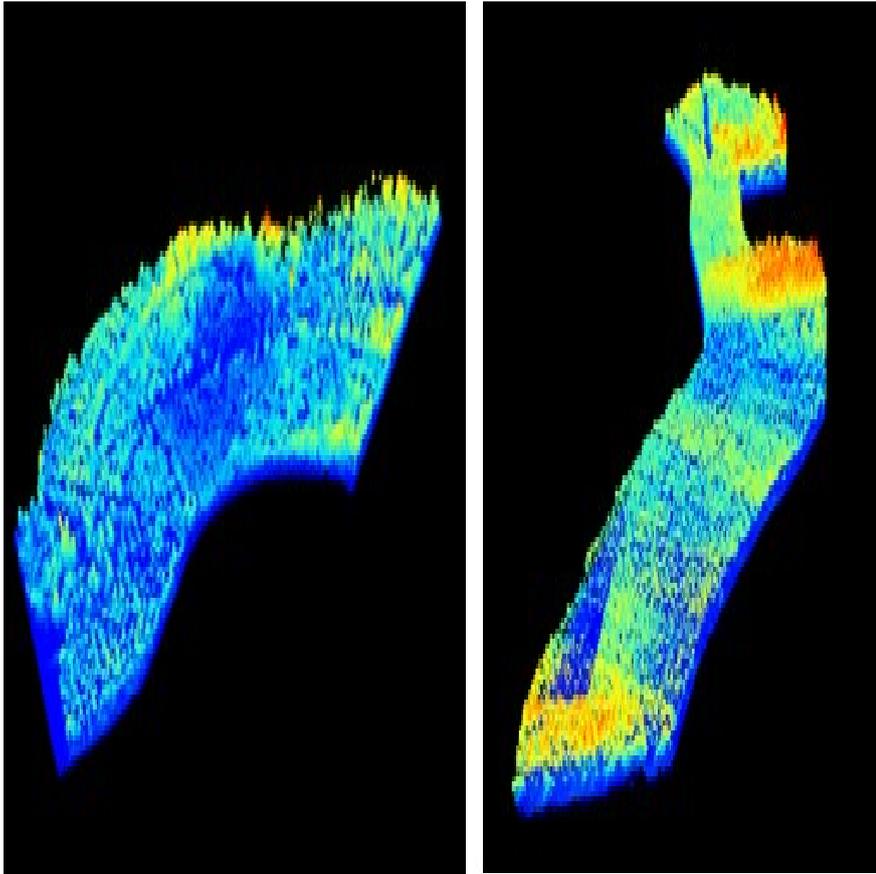


Figura 1. Nubes de puntos LIDAR de los ensayos de San Cosme y Pevidal.

Por otra parte, los datos obtenidos en campo fueron depurados y procesados con el software *Rstudio®* llevándose a cabo el cálculo de distintas variables a nivel de árbol individual árbol.

3.4. Cálculo de las variables dendrométricas utilizando las dos metodologías de inventario

Para la segmentación de la nube de puntos a nivel de árbol individual a partir de datos LiDAR se utilizó el algoritmo de DALPONTE & COOMES (2016) utilizando como semillas la posición de cada árbol tomada con GPS. A partir de la nube de puntos segmentada se calcularon una serie de estadísticos LiDAR a nivel de árbol individual, en concreto, la altura total de cada árbol individual (h_{LiDAR}). A continuación, se calcularon los diámetros de los árboles (d_{LiDAR}) a partir de las alturas medidas con LiDAR empleando ecuaciones predictivas d-h para cada genotipo desarrolladas a raíz de este trabajo y que se especifican más adelante.

Este tipo de ecuaciones son de utilidad cuando se dispone de mediciones con sensores remotos, ya que permite estimar los diámetros de los árboles y realizar análisis o calcular otras variables de interés en producción forestal.

Finalmente, tras obtener los diámetros y alturas se calcularon los errores en la estimación de estas variables en la nube de puntos. El cálculo de errores realizado fue el valor absoluto de la diferencia entre la altura obtenida con el LiDAR y con el inventario (eh) y entre el diámetro estimado a partir de la ecuación ajustada con la altura LiDAR como variable independiente, y el obtenido en el inventario (ed).

Las ecuaciones $d-h$ desarrolladas en este trabajo se realizaron en cada genotipo por separado, ya que al tratarse de materiales genéticos diferentes no presentan las mismas proporciones entre las variables dendrométricas del árbol. La información dendrométrica para el ajuste de las ecuaciones fue obtenida de la base de datos disponible de todos los ensayos e inventarios de la red experimental que cubre ampliamente la variabilidad existente en los ensayos. Se seleccionó desde el primer inventario de cada parcela hasta el quinto inventario lo que abarca masas de edades entre 1 y 9 años. En la Tabla 3 se especifican el número de datos y los estadísticos de las variables empleadas en el ajuste de las ecuaciones.

Tabla 3. Base de datos usada para el ajuste de las ecuaciones de $d-h$ con la información de todos los inventarios y todas las parcelas de la red de ensayos.

Genotipo	n	Diámetro normal: d (cm)				Altura total: h (m)			
		Min.	Max.	Media	Desv.	Min.	Max.	Media	Desv.
1	612	0,50	13,50	5,27	2,42	1,50	14,80	6,36	2,60
2	652	0,30	14,50	4,57	2,31	1,20	14,20	5,69	2,56
3	608	0,40	18,60	5,30	2,91	1,70	18,60	6,16	2,92
4	657	0,50	15,50	6,06	3,14	1,40	16,70	7,07	3,21
5	311	0,30	16,50	4,54	3,41	1,40	14,60	5,12	3,05
6	768	0,30	16,80	5,83	3,10	1,00	17,70	6,24	3,13
7	699	0,40	15,30	6,11	2,81	1,60	15,90	7,60	3,03
8	670	0,40	15,50	5,37	2,81	1,50	16,90	6,37	3,08
9	529	0,30	12,80	5,05	2,81	1,40	15,90	6,34	3,11
10	554	0,20	13,00	4,17	2,39	1,00	13,80	5,18	2,48
11	665	0,30	14,30	5,11	2,94	1,30	15,90	6,42	3,19
12	574	0,40	20,50	4,40	2,45	1,50	14,40	5,34	2,29
13	407	0,70	15,00	5,49	2,86	1,80	16,10	6,65	3,14
14	238	1,40	13,60	6,60	2,62	2,20	15,20	8,04	2,76
15	49	1,50	16,30	7,81	3,51	3,00	13,60	8,16	2,76
16	107	2,50	12,80	7,89	2,34	3,80	14,40	9,44	2,84

Para el ajuste de las ecuaciones se seleccionaron un total de 22 modelos $h-d$ distintos recogidos en distintos artículos científicos (CANGA et al., 2007; DÍAZ-RODRÍGUEZ et al., 2009; TRINCADO Y LEAL, 2006) que se usaron de forma inversa eligiendo el diámetro como variable dependiente para evaluar la capacidad predictiva de las mismas y seleccionar la mejor ecuación para cada genotipo.

Para cada genotipo se seleccionó un modelo mediante los siguientes estadísticos de bondad de ajuste:

Raíz del error medio cuadrático (REMC): aporta el valor del error en las mismas

unidades que la variable que se intenta explicar.

$$\text{REMC} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p}}$$

(1)

Coefficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}): refleja la variabilidad total que es explicada por el modelo, teniendo en cuenta el número de parámetros empleados en el mismo.

$$R^2_{\text{adj}} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \right) \cdot \left(\frac{n - 1}{n - p} \right)$$

(2)

Donde, para ambos estadísticos, Y_i es el valor real, es el valor predicho por el modelo, es promedio, todos ellos referidos a la variable dependiente, n es el número total de datos usados en el ajuste del modelo y p el número de parámetros estimados.

La significancia de los estimadores de los parámetros se evaluó con la prueba t-Student ($\alpha = 0.05$).

Adicionalmente se realizó un análisis gráfico para observar la capacidad predictiva de las ecuaciones generadas superponiendo las curvas diámetro-altura ajustadas sobre la trayectoria de los datos empleados y evaluar el comportamiento de los residuos mediante gráficos de residuos y predichos. El ajuste de las ecuaciones y el análisis gráfico se llevó a cabo con el software *Rstudio*®.

3.5. Cálculo de la productividad

La productividad de los materiales se ha determinado mediante la estimación del volumen con corteza, (V_{LIDAR}) empleando los modelos de árbol individual disponibles para *E. globulus* en el norte de España (GARCÍA-VILLABRILLE, 2015) y usando como variables predictivas las calculadas en este trabajo: h_{LIDAR} y d_{LIDAR} .

El análisis comparativo de crecimiento y producción entre genotipos se llevó a cabo mediante un análisis de varianza (ANOVA) en el que se estudiaron las variables citadas anteriormente (h_{LIDAR} , d_{LIDAR} , V_{LIDAR}). Tras comprobar que existían diferencias significativas en la variable genotipo ($p < 0,05$) se llevó a cabo una comparación múltiple de medias con el objetivo de clasificar los tratamientos en grupos de igual productividad. Para el propósito de la comparación de medias se utilizó el test de Scheffé, ya que está considerado un test de contraste de nivel alto desde el punto de vista conservativo y posee la ventaja de no que requiere que se disponga del mismo número de observaciones para cada grupo (SIT, 1995).

4. Resultados

4.1. Ecuaciones de diámetro-altura

En la Tabla 4 se muestran las ecuaciones seleccionadas para cada genotipo.

Siempre que ha sido posible y apenas había diferencias en los estadísticos de bondad de ajuste se han seleccionado los modelos más sencillos. Sin embargo, como ya se ha hecho en este caso respecto a un trabajo realizado previamente (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2018), hay que destacar que a medida que los árboles vayan creciendo y esta relación cambie, será necesario reajustar las ecuaciones incorporando nuevos pares de datos de $d-h$ de árboles con mayores dimensiones y seleccionando aquellas que mejor se ajusten al patrón de datos.

Los modelos seleccionados para los distintos genotipos han resultado modelos sencillos lineales y no lineales (M1, M2), los modelos de LOETSCH et al., (1973) (M5) y los modelos de CURTIS (1967) (M12, M15). La precisión alcanzada superó el R^2_{adj} de 0,84 en casi todos materiales, llegando a 0,95 en el genotipo 5 y siendo el genotipo 16, el que presentó el mayor error y la menor variabilidad explicada ($R^2_{adj}=0,84$). Este material presentaba a su vez uno de los menores conjuntos de datos para el ajuste de las ecuaciones de diámetro (estos datos se cogieron de toda la red de ensayos) debido a que no se encuentra en todos los ensayos de la red experimental. En general, para la mayor parte de los materiales, la variabilidad explicada por el modelo fue cercana o superior al 90%, con valores de $REMC$ inferiores a 0,74 cm.

Todos los parámetros incluidos en las ecuaciones seleccionadas resultaron significativos ($p < 0,05$) y los análisis gráficos mostraron un buen ajuste y comportamiento de los residuos.

Tabla 4. Ecuaciones $d-h$ seleccionadas para cada genotipo

Material	Ecuación	Referencia	REMC	R^2_{adj}
1	$d = -0.6505 + h^{0.9631}$	M2	0.6354	0.9316
2	$d = -0.5879 + h^{0.9462}$	M2	0.7397	0.8981
3	$d = -0.6938 + h^{0.9854}$	M2	0.7939	0.9260
4	$d = -0.7298 + h^{0.9806}$	M2	0.8500	0.9271
5	$d = \frac{h^2}{(1.5610 + 0.1592h)^2}$	M5	0.7492	0.9519
6	$d = \frac{h^2}{(1.1325 + 0.7295h + 0.0204h^2)}$	M15	0.9553	0.9055



7	$d = -0.5808 + 0.8809 h$	M1	0.8812	0.9019
8	$d = \frac{h^2}{(2.0516 + 0.6163h + 0.0324h^2)}$	M15	0.8236	0.9147
9	$d = \frac{h^2}{(3.5222 + 0.2725h + 0.0566h^2)}$	M15	0.7075	0.9371
10	$d = -0.6506 + 0.9316 h$	M1	0.6110	0.9350
11	$d = \frac{h^2}{(2.2733 + 0.6873h + 0.0276h^2)}$	M15	0.8253	0.9214
12	$d = -1.3550 + 1.0328 h$	M1	0.8864	0.8699
13	$d = -0.6238 + h^{0.9580}$	M2	0.7313	0.9351
14	$d = 0.7471h + 0.0081h^2$	M12	0.9871	0.8595

M1, M2-modelos básico, M5-modelo LOETSCH et al (1973), M12, M15-modelo CURTIS (1967).

4.2. Comparativa de variables dendrométricas obtenidas con inventario tradicional e inventario LiDAR

Una vez obtenidos las variables h_{LiDAR} y d_{LiDAR} , se procedió a calcular los errores obtenidos en la estimación de estas variables. En la Tabla 5 se exponen los errores obtenidos respecto a los datos recogidos en el inventario para estas variables.

Tabla 5. Errores absolutos en altura (e_h) y diámetro (e_d) de la medición con LiDAR.

Genotipo	e_h (m)				e_d (cm)			
	Min	Max	Media	Desv.	Min	Max	Media	Desv.
1	0,02	0,90	0,44	0,24	0,01	2,04	0,41	0,37
2	0,01	0,85	0,37	0,21	0,00	3,22	0,78	0,76
3	0,02	0,99	0,43	0,29	0,00	3,30	1,00	0,72
4	0,02	0,95	0,45	0,29	0,08	2,74	1,19	0,69
5	0,00	0,87	0,38	0,27	0,16	6,94	1,80	1,52
6	0,00	0,88	0,38	0,22	0,05	3,04	1,31	0,71
7	0,00	0,87	0,35	0,24	0,08	3,39	0,93	0,75

8	0,00	0,93	0,36	0,23	0,00	3,20	0,73	0,64
9	0,09	0,84	0,55	0,19	0,01	3,78	0,97	0,97
10	0,01	0,85	0,39	0,22	0,00	1,85	0,61	0,45
11	0,00	1,00	0,39	0,26	0,08	1,90	0,79	0,51
12	0,02	0,98	0,54	0,24	0,05	4,27	1,54	0,87
13	0,03	0,96	0,43	0,25	0,00	2,11	0,48	0,42
14	0,04	0,96	0,47	0,24	0,00	3,24	0,94	0,79
TODOS	0,00	1,00	0,41	0,24	0,00	6,94	0,90	0,76

Los resultados obtenidos muestran un rango de error absoluto en la estimación de la altura total (e_h) que va desde 0 a 1 m para todos los genotipos y un valor medio de $0,41 \pm 0,24$ m si se consideran todos los árboles en conjunto. A su vez, estos errores medios están entre 0,35 y 0,55 m, correspondiéndose estos valores a los genotipos 7 y 9 respectivamente, cuando se consideran por separado. El diámetro normal por su parte mostró un error (e_d) medio de $0,90 \pm 0,76$ cm en conjunto y un rango de error de medio de 0,41 y 1,80 cm, valores correspondientes a los materiales 1 y 5 respectivamente.

4.3. Cálculo de la productividad entre genotipos

La productividad obtenida en los distintos materiales genéticos mostró un volumen medio de entre $31,19 \pm 13,07$ dm³ por árbol para el genotipo 4, el que mayor producción presentó, y $5,31 \pm 4,36$ dm³ para el 12 que fue el de menor producción y justamente el material empleado como control en los ensayos, ya que es un material procedente de semilla que se emplea desde hace años en el área de estudio.

Los ANOVAs realizados mostraron diferencias significativas ($p < 0,001$) de crecimiento entre los materiales evaluados para las tres variables analizadas (h_{LiDAR} , d_{LiDAR} , V_{cc_LiDAR}). En la figura 2 se representa la h_{LiDAR} de los árboles incluidos en el interior de cada parcela de cada genotipo, el diámetro normal estimado a partir de dicha altura de las ecuaciones, d_{LiDAR} , y el volumen con corteza a nivel de árbol individual, V_{cc_LiDAR} .

El test de Scheffé realizado para la clasificación de los materiales en grupos de igual productividad determinó que el genotipo 14 fue el material con mayor crecimiento en altura seguido por los materiales 4 y 11, sin presentar diferencias significativas entre ellos ($p < 0,001$). Por otra parte, los materiales 4 y 14 son los que presentan mayor diámetro sin que existan diferencias significativas ($p < 0,001$) entre materiales. Finalmente considerando el análisis de varianza y el test para la variable volumen con corteza los materiales 4 y 14 de nuevo son los que mayor productividad presentan en estos ensayos.

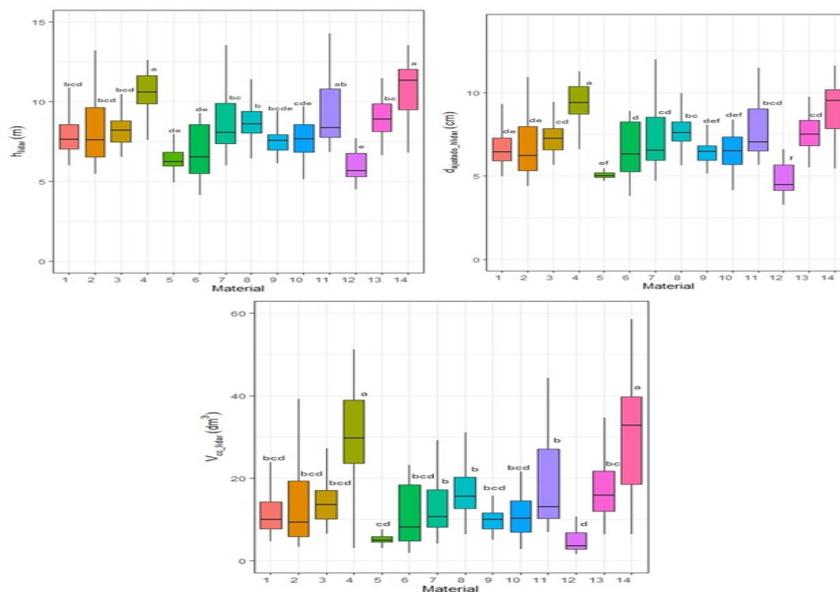


Figura 2. Crecimientos de los distintos por genotipos en los ensayos en (a) altura medida con LiDAR, h_{LiDAR} , (b) diámetros calculados a partir de ecuaciones $d-h$ con h_{LiDAR} como variable independiente y (c) $V_{c, LiDAR}$ de árbol calculado a partir de las variables anteriores. Las letras indican los grupos de igual productividad con diferencias significativas en grupos ($p < 0,001$).

5. Discusión

El uso del LiDAR en mediciones forestales presenta numerosas ventajas, tanto en términos de precisión como en la eficiencia de la recopilación de datos. Este tipo de tecnología permite obtener información detallada sobre la estructura de la plantación, la biomasa, y otros aspectos clave de los ecosistemas forestales, que son difíciles de medir utilizando métodos tradicionales. Este sensor permite la adquisición precisa de datos sobre la altura y la densidad de los árboles, así como sobre la topografía del terreno, lo que facilita un análisis más detallado de la estructura forestal en comparación con otros métodos de medición como los inventarios clásicos. Las nubes de puntos generadas por un sensor LiDAR proporcionan una representación tridimensional del bosque, lo que permite la identificación de las copas de los árboles y la determinación de su altura con gran exactitud (NÆSSET, 2004).

Los resultados presentados en este trabajo junto al estudio realizado por GONZÁLEZ-GARCÍA et al., (2018) muestran que el uso del LiDAR, permite obtener valores de alturas de los árboles con un rango de error aceptable en los distintos materiales genéticos evaluados al compararlo con datos reales de inventario. El error medio de altura obtenido para todos los materiales en este estudio fue de $0,47 \pm 0,24$ m, un valor similar al obtenido en un trabajo de *Pinus pinaster* donde se obtuvieron valores medios de $0,28 \pm 0,31$ m con LiDAR y valores de error de $0,65 \pm 0,78$ m cuando se empleó fotogrametría (RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, 2021). Recientemente, una investigación realizada para masas jóvenes de *Pinus pinaster* y *Pinus radiata* entre 2 y 5 años mostró un error absoluto medio en la altura de alrededor de 0,10 m para árboles de hasta 6 m, inferiores a los utilizados en este estudio, obteniendo precisiones menores en árboles menores de 1 m (RODRÍGUEZ-PUERTA et al., 2022). Por otro lado, en otro estudio de plantaciones procedentes de semilla de *Eucalyptus benthamii* en Brasil, se obtuvieron diferencias de $0,69 \pm 1,05$ m entre las alturas de inventario y las medidas obtenidas con LiDAR para árboles que



iban de 5 a 25 m, con coeficientes de correlación de 0,91 entre los pares de valores (DALLA CORTE et al., 2020), lo cual se considera un rango adecuado de valores para este tipo de cultivos.

En este estudio el cálculo del diámetro normal de los árboles utilizando variables LiDAR se llevó a cabo empleando modelos *d-h* ajustados específicamente para cada genotipo en este estudio. Disponer de este tipo de modelos resulta de gran valor, ya que no solo proporciona una estimación directa del diámetro normal de los árboles, sino que también posibilita el cálculo posterior de diversas variables relacionadas con la producción forestal, como el volumen de madera o la biomasa. Los modelos *d-h* ajustados demostraron una alta precisión, con valores de R^2 en el rango de 0,90 o superiores para la mayoría de los materiales. Los errores absolutos, o las diferencias con los valores de inventario, fueron de $0,90 \pm 0,76$ cm, por lo que resultan menores a otros estudios previos que utilizaron la misma metodología, presentando errores de $2,19 \pm 1,62$ cm (RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, 2021). Es importante destacar que en este estudio los árboles de las parcelas experimentales tenían un tamaño considerablemente menor, con diámetros en el rango de 5,00 a 13,9 cm, en contraste con los 4,60 a 28,70 cm del estudio citado (RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, 2021).

Seguidamente en este trabajo, los resultados de la producción de volumen de madera, obtenidos a partir de las ecuaciones de GARCÍA-VILLABRILLE (2015), en las que se incorporaron los valores de altura y diámetro de árbol individual obtenidos con datos LiDAR, mostraron diferencias significativas en la productividad entre los distintos materiales genéticos. Los materiales más destacados en términos de producción de madera en este estudio fueron los genotipos 4 y 14, con un volumen promedio de madera con corteza de $31,19 \pm 13,07$ y $30,21 \pm 13,02$ dm³ por árbol, respectivamente. Dado que las masas forestales de los ensayos no están aún en turno de corta porque que son todavía jóvenes para la realización del aprovechamiento, es fundamental continuar realizando mediciones en los siguientes años. Adicionalmente es importante complementar los datos de productividad obtenidos con evaluaciones de los daños sanitarios y abióticos, para poder tomar decisiones sobre la selección de genotipos que optimicen la producción futura de este cultivo. En este sentido, los sensores remotos también pueden ser una ayuda para caracterizar el estado sanitario de las masas forestales (STONE & MOHAMMED, 2017).

Finalmente, con los resultados obtenidos en este estudio, se puede confirmar la efectividad que ofrece la tecnología LiDAR en la evaluación de este tipo de plantaciones forestales contribuyendo a mejorar de forma sustancial los costes, la precisión y la calidad de las mediciones. Además, es importante seguir explorando el potencial de estas tecnologías en otras tipologías de plantaciones y ecosistemas forestales mediante la realización de más estudios y evaluaciones (DALLA CORTE et al., 2020). La combinación de los datos LiDAR con modelos predictivos y datos de campo, mejora significativamente la precisión en la estimación de inventarios forestales y la planificación para llevar a cabo una gestión sostenible en los montes.

6. Conclusiones

El uso de sensores remotos en inventarios forestales se ha ido incrementando notablemente en los últimos años por las múltiples ventajas que presenta desde el punto de vista de ahorro de tiempo y practicidad frente a la realización de los inventarios dendrométricos clásicos. En este trabajo se ha evaluado la realización



de mediciones mediante el uso de LiDAR en un ensayo de materiales genéticos de eucalipto con el objetivo de conocer la productividad de los distintos genotipos. Los resultados obtenidos en este trabajo, que complementa y actualiza el trabajo realizado ya en 2018 con los mismos fines, muestran y refuerzan que la metodología empleada presenta una buena precisión y proporciona datos correctos cuando se contrastan con los valores obtenidos en los inventarios clásicos. Con ello se concluye que el uso de este tipo de sensores puede emplearse con seguridad y precisión en esta tipología de plantaciones y que será por ello de gran utilidad para la evaluación del crecimiento de los árboles reduciendo los costes y tiempos asociados a la captura de datos.

7. Agradecimientos

Los trabajos desarrollados en esta comunicación han sido financiados por el Proyecto de Grupos Operativos de Innovación en Nutrición y Gestión del Eucalipto globulus en Asturias (NUTRIGEST). El proyecto cuenta con financiación de la Consejería de Medio Rural y Política Agraria del Principado de Asturias, del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y del Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER). Por otra parte, el proyecto “Eucalipto 2020” que ha dado lugar al desarrollo de la red experimental cuenta con la colaboración del Servicio de Montes de la Consejería Medio Rural y Política Agraria del Gobierno del Principado de Asturias y las empresas del sector del eucalipto en la Península Ibérica: Ence Energía & Celulosa, The Navigator Company y Altri.

8. Bibliografía

CANGA, E.; KHOURI, E.A.; VARELA, J.J.G.; OBREGÓN, A.C.; 2007. Relación altura-diámetro generalizada para " *Pinus radiata* D. Don" en Asturias (norte de España). *Cuadernos SECF* 23 153-158

CURTIS, R.O.; 1967. Height-diameter and height-diameter-age equations for second growth Douglas-fir. *For Sci* 13(4) 365-375.

DALLA CORTE, A.P.; REX, F.E.; ALMEIDA, D.R.A.D.; SANQUETTA, C.R.; SILVA, C.A.; MOURA, M.M.; BROADBENT, E.N.; 2020. Measuring individual tree diameter and height using GatorEye High-Density UAV-Lidar in an integrated crop-livestock-forest system. *Remote Sens* 12(5) 863

DALPONTE, M.; COOMES, D. A.; 2016. Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. *Methods Ecol Evol* 7 1236-1245

DÍAZ-RODRÍGUEZ, C.; CRECENTE-CAMPO, F.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; 2009. Relación altura-diámetro generalizada para masas de *Eucalyptus globulus* Labill. en Galicia. Congreso Forestal Español. SECF

GARCÍA-VILLABRILLE, J.D.; 2015. Modelización del crecimiento y la producción de plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. en el noroeste de España. Tesis doctoral. Departamento de Enxeñaría Agroforestal. Escola Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. Lugo.

GOI Eucalipto; 2020. GO de Innovación para la productividad de cultivo de *Eucalyptus globulus*. *Viesca Astur* 17 29-30

GONZÁLEZ-GARCÍA, M.; ALMEIDA, A. MAJADA, J.; 2018. Evaluating performance of *Eucalyptus globulus* genotypes using an experimental trial approach. IUFRO *Eucalyptus* 2018 - Managing *Eucalyptus* plantations under global changes, Montpellier, France, 17-21 September 2018 IUFRO, 188.



GONZÁLEZ-GARCÍA, M.; CANGA, E.; VELASCO A.; PRENDES, C.; MAJADA, J.; 2022. Evaluación de genotipos de *Eucalyptus globulus*, incluyendo inventarios de campo y sensores remotos, de la red de ensayos experimental “Eucalipto 2020”. 8º Congreso Forestal Español. 8CFE-446. SECF. Pag 1-11. Cataluña

KOCH, B.; 2013. La teledetección como apoyo a los inventarios forestales nacionales EFN. Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/national_forest_assessment/images/PDFs/Spanish/KR2_ES_8_.pdf. (Último acceso 18/02/2021)

NÆSSET, E.; 2004. Practical large-scale forest stand inventory using airborne laser scanner data. *Remote Sens Environ* 90(1) 1-10

POPESCU, S.; WYNNE, R.; 2004. Seeing the Trees in the Forest: Using Lidar and Multispectral Data Fusion with Local Filtering and Variable Window Size for Estimating Tree Height. *Photogramm Eng Remote Sens* 70 589-604. 10.14358/PERS.70.5.589.

RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, A.; 2021. Estimación de variables dendrométricas en un ensayo clonal de *Pinus pinaster* a partir de fotogrametría digital y datos LiDAR. Máster en geomática, teledetección y modelos espaciales aplicados a la gestión forestal. Universidad de Córdoba.

RODRÍGUEZ-PUERTA, F.; GÓMEZ-GARCÍA, E.; MARTÍN-GARCÍA, S.; PÉREZ-RODRÍGUEZ, F.; Y PRADA, E.; 2022. UAV-Based LiDAR Scanning for Individual Tree Detection and Height Measurement in Young Forest Permanent Trials. *Remote Sens* 14(1) 170.

SIT, V.; 1995. Analyzing ANOVA designs: Province of British Columbia, Ministry of Forests Research Program

STONE, C.; MOHAMMED, C.; 2017. Application of remote sensing technologies for assessing planted forests damaged by insect pests and fungal pathogens: a review. *Curr For Rep* 3 75-92

TRINCADO, G. y LEAL, C.; 2006. Ecuaciones locales y generalizadas de altura-diámetro para pino radiata (*Pinus radiata*). *Bosque (Valdivia)*, 27(1) 23-34

WHITE, J.C.; COOPS, N.C.; WULDER, M.A.; VASTARANTA, M.; HILKER, T. y TOMPALSKI, P.; 2016. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review. *Can J Remote Sens* 42(5) 619-641