



9CFE-1274

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



Tecnología LiDAR en la modelización de variables forestales: aplicación en ensayos de mejora genética de eucalipto en el noroeste de España

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

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

Resumen

En este estudio se presenta una metodología para caracterizar parcelas de materiales genéticos utilizando datos LiDAR y multiespectrales de alta resolución. Los datos LiDAR capturados con un UAV ofrecieron información detallada sobre los parámetros de la estructura de la vegetación a nivel de árbol individual. Además, se utilizaron imágenes multiespectrales para calcular diferentes índices de vegetación. Posteriormente, se crearon modelos estadísticos para estimar el volumen y las fracciones de biomasa del arbolado, lo que permitió la comparación de estas variables entre diferentes genotipos. La eficacia de este nuevo enfoque se demostró en una red de ensayos de mejora genética de *Eucalyptus globulus* localizada en el noroeste de España. Los datos, agrupados por genotipos, muestran resultados prometedores que permitirán la inclusión de nuevas variables en estudios de mejora genética forestal.

Palabras clave

Mejora genética, genotipos, productividad, sensores remotos, *Eucalyptus globulus*.

1. Introducción

La mejora genética forestal es una disciplina científica y tecnológica clave que utiliza la variabilidad genética, los principios de herencia y el manejo selvícola para desarrollar árboles con características mejoradas (ALÍA et al., 2003). Este campo tiene un impacto significativo en la productividad, sostenibilidad y resiliencia de los ecosistemas forestales, y se ha consolidado como una herramienta indispensable para enfrentar los desafíos ecológicos y económicos del siglo XXI. En términos de productividad, los programas de mejora genética se orientan hacia el incremento de caracteres como el volumen, diámetro, altura y calidad de la madera. Los avances en la genética forestal han permitido que las plantaciones comerciales alcancen rendimientos significativamente mayores en comparación con bosques naturales (ZOBEL & TALBERT, 1984). Además, la mejora genética contribuye a la homogeneidad en las características del producto final, facilitando su procesamiento y comercialización.

El empleo de sensores remotos en ensayos de mejora genética forestal es una estrategia con gran potencial para avanzar en la productividad y sostenibilidad de los bosques. Su capacidad para proporcionar mediciones precisas, de alta resolución y a gran escala permite a los investigadores y gestores tomar decisiones informadas sobre qué genotipos tienen mayor potencial para contribuir a los objetivos de reforestación y conservación. Además, las imágenes y nubes de puntos capturadas permiten calcular numerosas variables a nivel de árbol individual incluyendo características morfométricas de los árboles que guardan relación con el crecimiento y la arquitectura de la copa y del árbol completo.

Algunos trabajos ya publicados en ensayos genéticos de *Pinus halepensis* y *Pinus nigra* demuestran el potencial de los sensores para caracterizar variación intraespecífica en características difícil de abordar a través de instrumentos



clásicos (LOMBARDI et al., 2022). Por otra parte, el uso de LiDAR ha mostrado buenos resultados para caracterizar árboles individuales en ensayos de progenie de la especie abeto Douglas (DU TOIT et al., 2020), y adicionalmente su combinación con datos multiespectrales muestra gran potencial en el desarrollo de metodologías de estimación de la productividad en ensayos de mejora genética de *Pinus pinaster* en el norte de España (PÉREZ-MUÑIZ et al., 2024).

Aunque ya se han publicado algunos trabajos en este campo, en la actualidad son aún muy escasas las metodologías que relacionan mejora genética y el uso de sensores remotos existiendo una demanda de desarrollar nuevas alternativas para el monitoreo forestal de parcelas que complementen los inventarios clásicos en programas de mejora genética.

2. Objetivos

Desarrollar modelos para la estimación de distintas variables forestales a nivel de árbol individual de volumen y biomasa a partir de datos tomados con sensores remotos capturados con dron.

3. Metodología

3.1. Red experimental de ensayos

Para validar esta metodología se empleó la red de ensayos “Eucalipto 2020” (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2018). Esta red experimental está compuesta por cuatro parcelas con distintos materiales genéticos de la especie *Eucalyptus globulus*. Los ensayos fueron establecidos entre los años 2014 y 2018 en distintos Montes de Utilidad Pública del Principado de Asturias. Las parcelas contienen distintos materiales genéticos comerciales seleccionados previamente para las condiciones ambientales de la región y pertenecientes a empresas españolas y portuguesas del sector del eucalipto. En la Tabla 1 se especifican las características fisiográficas y edáficas de los ensayos experimentales seleccionados para este trabajo que coincidieron con aquellos que no tenían limitaciones legales a la hora de ser volados con UAV: San Cosme y Pevidal.

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
Número de materiales	13	11																	

La altitud de los ensayos va desde sobre los 200 m aproximadamente sobre el nivel del mar a los 600 m que es la altura límite para la especie en la región. Las orientaciones cubren la variabilidad disponible y las pendientes medias están entre 45 y 54% en los ensayos. Existen entre 11 y 13 materiales genéticos diferentes en cada uno de los ensayos evaluados.

Los suelos de los ensayos son ácidos ($\text{pH} < 4.8$) con altas concentraciones de materia orgánica ($> 9.7\%$), texturas medias, franco-arenoso y diferencias en la concentración de los nutrientes (Tabla 1).

3.1. Parcelas de seguimiento y recogida de datos dendrométricos

Para realizar el seguimiento de los ensayos se instalaron parcelas cuadradas de 20 x 20 m (400 m^2) en el interior de cada bloque de cada genotipo o variedad. 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.

Los inventarios dendrométricos se realizaron en otoño de 2023 y 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) o con pértiga de precisión centimétrica en función de las dimensiones del árbol. 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.

El cálculo del volumen (v) y las distintas fracciones de la biomasa (w) se realizaron mediante las ecuaciones de volumen y biomasa de árbol individual de GARCÍA-VILLABRILLE (2015), a partir de los datos dendrométricos recogidos en el inventario. En la Tabla 2 se muestran los estadísticos de las variables dendrométricas recogidas y calculadas a partir de los datos de inventario.

Tabla 2. Variables forestales obtenidas y calculadas a partir de los inventarios.

Variable	Mínimo	Máximo	Media				Desv. Std.			
Diámetro normal:	d		(cm)	5,00	13,90	7,77		1,95		
Altura total:	h		(m)	4,50	15,70	8,72		1,88		
Altura primera rama viva:	h_v		(m)	1,10	11,20	4,86		1,27		
Volumen con corteza:	v	cc	(dm ³)				4,10	79,10	19,28	14,33
Biomasa hojas:	w	h	(kg)	0,62	6,01	2,27		0,96		
Biomasa ramas:	w	r	(kg)	1,20	7,00	2,62		1,18		
Biomasa madera:	w	m	(kg)	1,90	36,90	8,94		6,59		
Biomasa corteza:	w	c	(kg)	0,50	5,30	1,54		0,97		
Biomasa de copa:	w	$copa$	(kg)	1,93	13,01	4,89		2,01		
Biomasa total:	w	total	(kg)	5,26	51,01	15,37		9,36		

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.

3.2. Procesado de datos LIDAR

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.

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 en una de las parcelas.

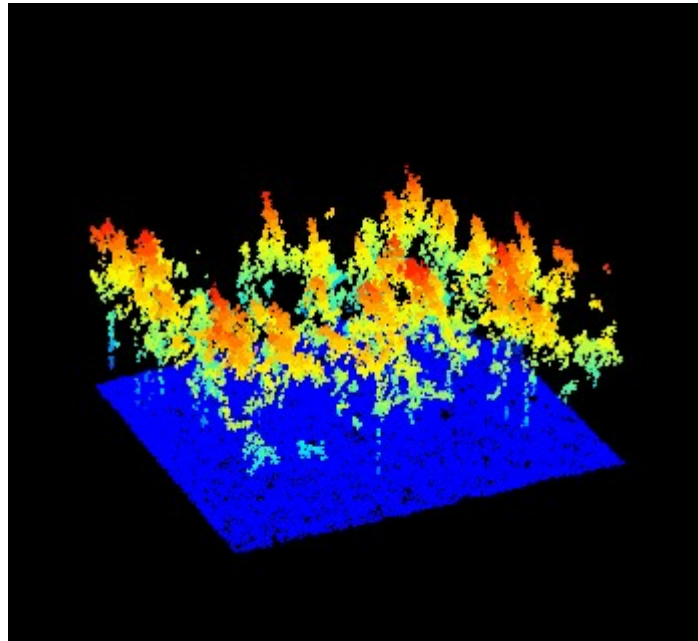


Figura 1. Nube de puntos LiDAR obtenida en los ensayos.

Con el software *RStudio* se segmentó la nube de puntos para la detección de árbol individual, utilizando el algoritmo desarrollado por DALPONTE & COOMES (2016) y la posición de los árboles de las parcelas de muestreo. Se calcularon diferentes variables LiDAR (estadísticos de altura total, diámetro de copa, área de copa, diámetro de copa, relación altura total-diámetro de copa, rango intercuartílico de elevaciones...) para cada árbol (Tabla 3).

Tabla 3. Variables estimadas a partir de datos LiDAR.

Variable LiDAR	Descripción
z_max	
z_min	
z_mean	
z_median	
z_var	
z_sd	
z_cv	
z_kurtosis	
z_skewness	
z10	
z90	
z95	

	z99	
	zrange90_10	
convhull_area		2
	dcopa	
	rel_h_dcopa	

En el caso de los datos multispectrales, se calcularon diferentes índices de vegetación (Tabla 4) en todo el ensayo, extrayendo el valor medio de los diferentes índices en torno a un radio de medio metro de los ápices, este radio se estimó teniendo en cuenta las características de los árboles individuales.

Tabla 4. Índices de vegetación seleccionados para el estudio.

Abreviatura	Índice
	NDVI
	NLI
	IPVI
	GNDVI
	NGRDI
	GCI
SAV	I
	NDRE
	REGCI
	REGNDVI
	RENDVI
	ARI
	ARI 2

Finalmente se contó con una base de datos con el inventario de campo, estadísticos LiDAR y los índices de vegetación a nivel de árbol individual. A partir de estos datos se ajustaron modelos para la estimación de las variables dendrométricas utilizando como variables independientes las variables LiDAR y los índices de vegetación. Se realizó un ajuste no paramétrico utilizando *Random Forest* para distintas variables de árbol individual (volumen con corteza, biomasa, altura, diámetro...). Para la evaluación del modelo se analizaron diferentes estadísticos (Error Medio Cuadrático (*EMC*) y porcentaje de varianza explicada) y análisis gráficos.

Por último, los modelos ajustados fueron utilizados para predecir estas variables en los ensayos analizados a nivel espacial, generando cartografía de las distintas variables a nivel de árbol individual.

4. Resultados

Se ajustaron modelos para el diámetro, altura total y de la primera rama viva, volumen con corteza y biomasa (madera, copa y total) utilizando 853 árboles de tamaño de muestra. En la Tabla 5 se presentan los estadísticos utilizados para la evaluación de los modelos de *Random Forest* evaluados.

Tabla 5. Estadísticos de bondad de ajuste de los modelos. EMC: Error Medio Cuadrático.

Modelo	Unidades	EMC	% varianza explicada	
v	cc	m	³	0,00002902 85,89
wtotal	kg	15,64		83,08
w	copa	kg	1,43	70,71
W	m	kg	5,88	86,52
d	cm	0,88		83,69
hv	m	0,44		73,48
h	m	0,19		95,79

La Figura 3 muestra la importancia de las variables independientes en el incremento del Error Medio Cuadrático (%EMC) en el caso de la predicción del volumen.

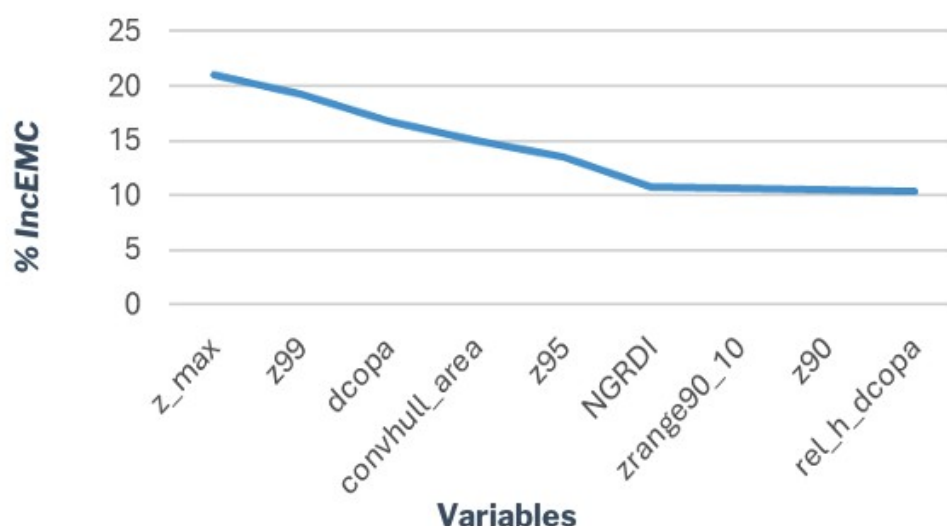


Figura 2. Importancia de las variables del modelo de Random Forest para volumen con corteza de árbol individual (vcc) medido por el incremento del Error Medio Cuadrático (%IncEMC). Consultar variables en Tabla 3.

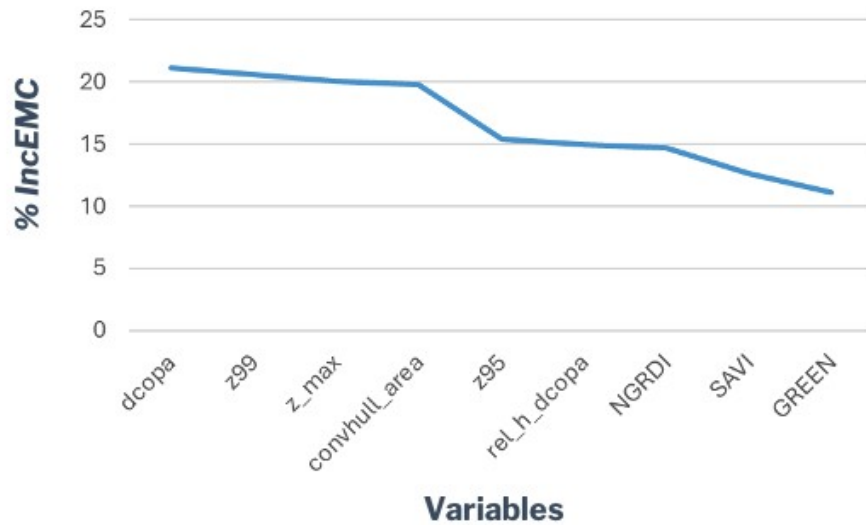


Figura 3. Importancia de las variables del modelo de Random Forest para diámetro medido por el incremento del Error Medio Cuadrático (%IncEMC). Consultar variables en Tabla 3.

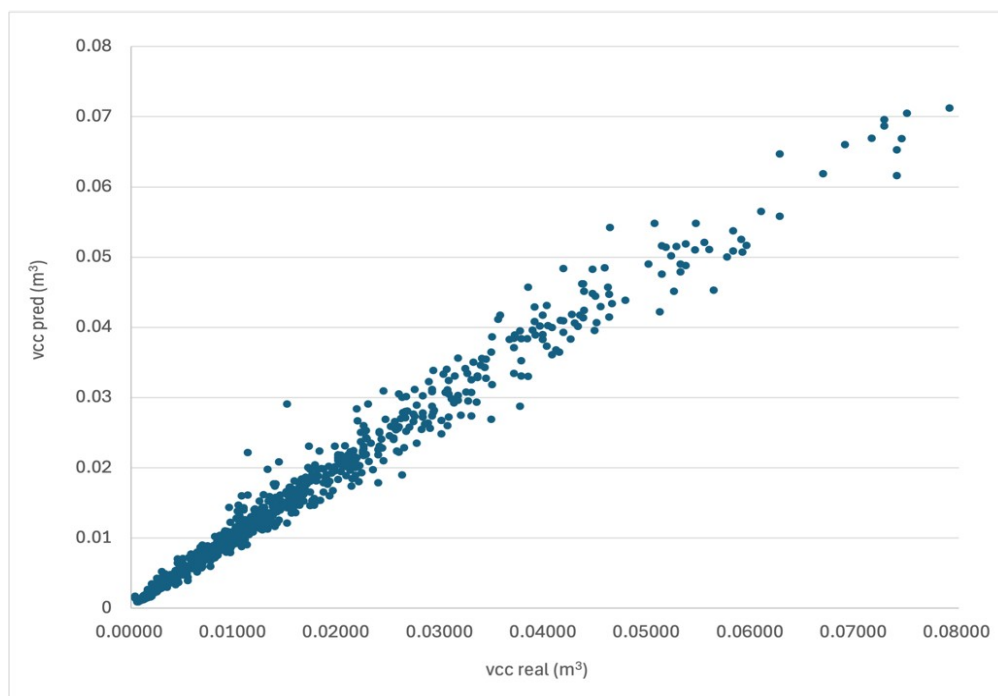


Figura 4. Gráfico de dispersión del volumen de madera con corteza (m^3) frente al volumen de madera con corteza predicho con el modelo ajustado utilizando variables LiDAR e índices de vegetación.

Los modelos ajustados utilizando los datos de las parcelas de muestreo se aplicaron en todo el ensayo para evaluar el potencial de este tipo de herramientas en el seguimiento de ensayos. Se obtuvieron las variables dendrométricas predichas con los modelos a nivel de árbol individual. En la Tabla 6 se presentan los valores medios de las variables predichas para los diferentes genotipos evaluados y en la Figura 5 se puede ver la representación espacial en el caso del

volumen de árbol individual para uno de los ensayos (Pevidal).

Tabla 6. Valores medios de las variables dendrométricas predichas a nivel de árbol individual utilizando los modelos ajustados.

Material	v_{cc}	(m ³)	d	(cm)	wttotal (kg)	wmadera (kg)	wcopa (kg) p
1	0,0095	5,90	8,70	4,38		3,39	
2	0,0063	5,07	6,12	2,93		2,65	
3	0,0083	5,13	7,61	3,76		3,02	
4	0,0294	8,33	21,01	13,58		5,27	
6	0,0161	7,14	13,33	7,42		4,50	
7	0,0119	6,28	10,17	5,51		3,62	
8	0,0139	6,83	11,75	6,37		4,08	
10	0,0138	6,40	11,33	6,33		3,76	
11	0,0192	6,71	14,50	8,88		4,21	
12	0,0097	5,41	8,48	4,46		3,16	
14	0,0243	7,87	17,96	11,28		4,89	
General	0,0149	6,47	11,98	6,87		3,88	

Nota: Volumen con corteza: v_{cc} , diámetro normal: d , biomasa total: w_{total} , biomasa de madera: w_{madera} biomasa de copa: w_{copa}

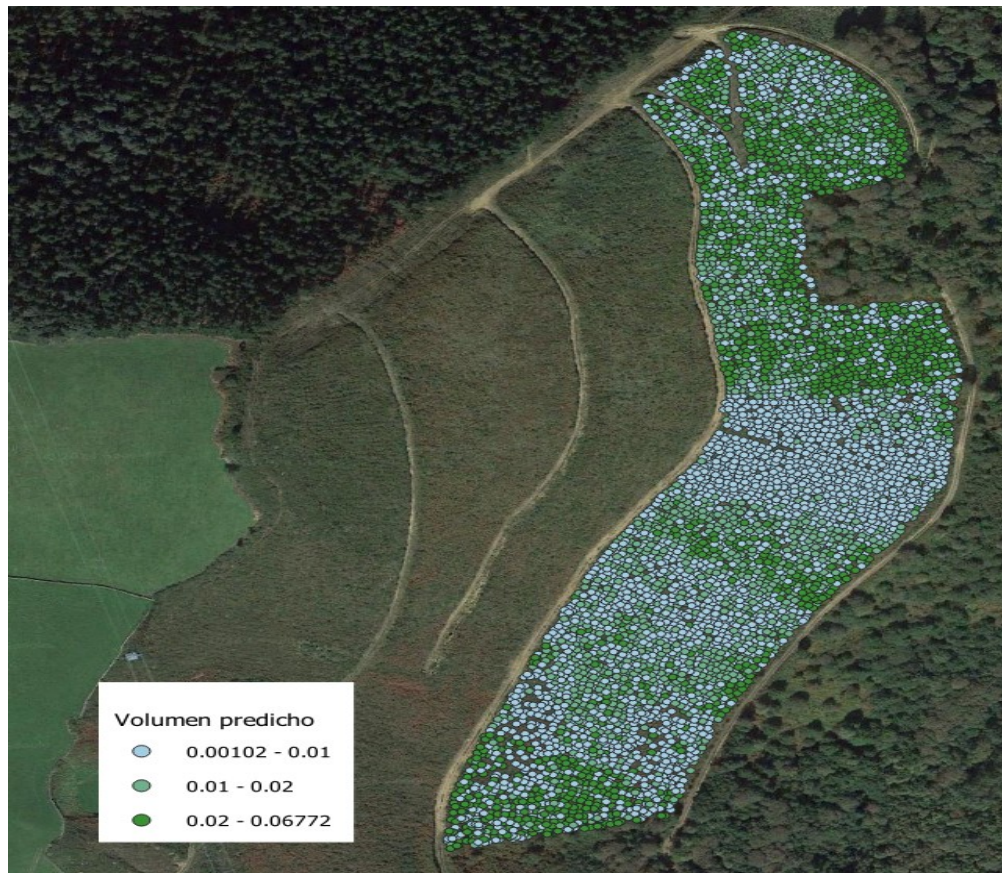


Figura 5. Mapa del volumen con corteza de árbol individual (vcc, m³) en uno de los ensayos del proyecto Eucalipto 2020.

5. Discusión

En los modelos ajustados usando *Random Forest*, el porcentaje de varianza explicada son superiores al 80% excepto en el caso de la altura de la primera rama viva y la biomasa de copa, donde el porcentaje se sitúa en 70 y 73% respectivamente. STRAUB & KOCH (2011) obtuvieron un error medio relativo del 24% (0,2214 m³) en la predicción del volumen basado en datos LiDAR y multiespectrales, errores superiores al 13,3% obtenidos en este estudio (calculado a partir de los residuos y el valor medio del volumen en la muestra utilizada). HAMROUNI et al. (2015) obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) entre 0,85-0,87 en modelos desarrollados por regresión no lineal, comparables al porcentaje de varianza explicada por el modelo ajustado para el volumen con corteza en este estudio utilizando *Random Forest*.

Teniendo en cuenta los resultados preliminares obtenidos en este estudio, la toma de datos con sensores remotos embarcados en UAV, presenta un gran potencial para el fenotipado de este tipo de ensayos, debido al hecho de poder calcular variables a nivel de árbol individual, siendo estas variables de carácter numérico y objetivo, hecho que no siempre es posible en el fenotipado tradicional, donde algunas variables dependen de la asignación subjetiva a clases no numéricas (SIERRA DE GRADO et al., 1999).

El incremento del número de variables a analizar y la precisión de algunas de las estimaciones realizadas de forma cualitativa permitirá profundizar en los estudios de productividad de clones en ambientes contrastantes. Con esta orientación estos desarrollos tecnológicos permitirán también mejorar el conocimiento de aspectos



como la plasticidad, evolución, adaptación, *fitness*, etc., facilitando su implementación en programas de mejora y conservación de recursos genéticos (AITKEN et al., 2008).

6. Conclusiones

- Se ajustaron modelos preliminares no paramétricos utilizando *Random Forest* para volumen, diámetro, altura total y de la primera rama viva y biomasa de diferentes fracciones a nivel de árbol individual.
- Los resultados obtenidos en el caso de altura, diámetro, volumen con corteza, biomasa de total y de madera y diámetro explican más de un 83% de la varianza.
- En el caso de la biomasa de copa y la altura de la primera rama viva el uso de los modelos presenta mayor error predictivo, con un error medio de 1,43 kg y de 0,44 m respectivamente.
- El uso de estos modelos para realizar un mapeado de parcelas de mejora genética, presenta un gran potencial, al poder hacer una cuantificación del total de la superficie de ensayo, complementando los inventarios tradicionales, más costosos de realizar.
- Se trata de modelos preliminares en los que será necesario incorporar datos de más ensayos, considerando el rango de variabilidad de las variables a modelizar.

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

ALÍA, R.; AGÚNDEZ, D.; ALBA, N.; MARTÍNEZ, S. G.; SOTO, A.; 2003. Variabilidad genética y gestión forestal. *Ecosistemas* 12(3) 1-7

AITKEN, S. N.; YEAMAN, S.; HOLLIDAY, J. A.; WANG T.; CURTIS-MCLANE, S.; 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evol Appl* 1(1) 95-111

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

DU TOIT, F.; COOPS, N. C.; TOMPALSKI, P.; GOODBODY, T. R. H.; EL-KASSABY, Y. A.; STOEHR, M.; TURNER, D.; LUCIEER, A.; 2020. Characterizing variations in growth characteristics between Douglas-fir with different genetic gain levels using airborne laser scanning. *Trees Struct Funct* 34 (3) 649-664

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.

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

HAMROUNI, A.; VÉGA, C.; RENAUD, J.P.; DURRIEU, S.; BOUVIER, S; 2015. Tree-based approach to estimate wood volume from LiDAR data: a case study in a pine plantation. *Rev Fr Photogramm Télédélect* 1(211-212) 63-70

LOMBARDI, E.; RODRÍGUEZ-PUERTA, F.; SANTINI, F.; CHAMBEL, M.R.; CLIMENT, J.; RESCO DE DIOS, V.; VOLTAS, J.; 2022. UAV-LiDAR and RGB imagery reveal large intraspecific variation in tree level morphometric traits across different pine species evaluated in common gardens. *Remote Sens* 14 5904

PÉREZ-MUÑIZ, E.; CANGA, E.; PRENDES, C.; NAVARRO-CERRILLO, R.; MAJADA, J.; R; 2024. Advances in forest variable modelling using LiDAR technology: insights from a tree breeding trial in North-West Spain. XXVI World Congress of the International Union of Forest Research Organizations (IUFRO). Stockholm, Sweden.

SIERRA DE GRADO, R.; DÍEZ-BARRA, R.; ALIA, R.; 1999. Evaluación de la rectitud del fuste en seis procedencias de *Pinus pinaster* Ait. *Investig Agrar Sist Recur For* 8 263-278

STRAUB, C.; KOCH, B.; 2011. Estimating single tree stem volume of *Pinus sylvestris* using Airbone Laser Scanner and Multispectral Line Scanner Data. *Remote Sens* 3 924-944

ZOBEL, B. J.; TALBERT, J. T.; 1984. Applied Forest Tree Improvement. John Wiley & Sons. New York