

Crespo-Peremarch, P.; Valencia Alzate, J.; Carbonell-Rivera, J.; Torralba, J.; Ruiz, L. Segmentación de estratos forestales en bosques mediterráneos mediante deep learning y nubes de puntos LiDAR terrestres y móviles

Segmentación de estratos forestales en bosques mediterráneos mediante deep learning y nubes de puntos LiDAR terrestres y móviles

Crespo-Peremarch, Pablo¹ **Valencia Alzate, Juan Ramón**¹ **Carbonell-Rivera, Juan Pedro**² **Torralba, Jesús**¹ **Ruiz, Luis Ángel**¹

¹ Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, València, España

² Integrated Remote Sensing Studio (IRSS), Department of Forest Resources Management, Forest Science Centre, 2424 Main Mall, University of British Columbia, Vancouver, BC V6T 1Z4, Canadá

ORCID: Crespo-Peremarch 0000-0003-2241-4493 Carbonell-Rivera 0000-0002-6724-6780 Torralba 0000-0001-8644-8604 Ruiz 0000-0003-0073-7259

Correspondencia: pabcrepe@cgf.upv.es jvalencia658@gmail.com jp.carbonellrivera@ubc.ca jetorpe@upv.es laruiz@cgf.upv.es

RESUMEN

La caracterización de la estructura vertical de la vegetación es clave para la planificación y la prevención de incendios en bosques mediterráneos. En este estudio se evalúa un modelo de deep learning para segmentar estratos verticales (arbóreo, arbustivo-arbóreo y arbustivo) en nubes de puntos 3D adquiridas con un escáner láser terrestre (TLS) y un LiDAR móvil integrado en un iPad (MLS-iPad). En escenarios semirreales se obtuvieron valores de IoU (Intersection over Union) superiores al 97% en el estrato arbóreo y en torno al 90% en los estratos arbustivo-arbóreo y arbustivo; en parcelas reales, el IoU fue de 80–91% (arbóreo) y 35–65% (arbustivo-arbóreo y arbustivo). Estos resultados confirman la viabilidad del enfoque y el potencial del MLS-iPad para campañas operativas rápidas de diagnóstico y seguimiento estructural, si bien la caída de los valores en parcelas reales evidencia la necesidad de ampliar el entrenamiento con datos reales, pudiendo actuar el TLS como referencia cuando se requiera mayor robustez.

Palabras clave: TLS, MLS, iPad, aprendizaje profundo, clasificación semántica

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 16 febrero 2026

Segmentación de estratos forestales en bosques mediterráneos mediante deep learning y nubes de puntos LiDAR terrestres y móviles


Crespo-Peremarch, Pablo ⁽¹⁾, Valencia Alzate, Juan Ramón ⁽¹⁾, Carbonell-Rivera, Juan Pedro ⁽²⁾, Torralba, Jesús ⁽¹⁾, Ruiz, Luis Ángel ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, València, España.

 0000-0003-2241-4493, pabcrepe@cgf.upv.es ;  0000-0000-0000-0001, ivalencia658@gmail.com

 0000-0001-8644-8604, jetorpe@upv.es ;  0000-0003-0073-7259, laruiz@cgf.upv.es

⁽²⁾ Integrated Remote Sensing Studio (IRSS), Department of Forest Resources Management, Forest Science Centre, University of British Columbia, Canadá.

 0000-0002-6724-6780, jp.carbonellrivera@ubc.ca

Resumen: La caracterización de la estructura vertical de la vegetación es clave para la planificación y la prevención de incendios en bosques mediterráneos. En este estudio se evalúa un modelo de *deep learning* para segmentar estratos verticales (arbóreo, arbustivo-arbóreo y arbustivo) en nubes de puntos 3D adquiridas con un escáner láser terrestre (TLS) y un LiDAR móvil integrado en un iPad (MLS-iPad). En escenarios semirreales se obtuvieron valores de IoU (*Intersection over Union*) superiores al 97% en el estrato arbóreo y en torno al 90% en los estratos arbustivo-arbóreo y arbustivo; en parcelas reales, el IoU fue de 80–91% (arbóreo) y 35–65% (arbustivo-arbóreo y arbustivo). Estos resultados confirman la viabilidad del enfoque y el potencial del MLS-iPad para campañas operativas rápidas de diagnóstico y seguimiento estructural, si bien la caída de los valores en parcelas reales evidencia la necesidad de ampliar el entrenamiento con datos reales, pudiendo actuar el TLS como referencia cuando se requiera mayor robustez.

Palabras clave: TLS, MLS, iPad, aprendizaje profundo, clasificación semántica

Forest strata segmentation in Mediterranean forests using deep learning and terrestrial and mobile LiDAR point clouds

Abstract: *Characterizing the vertical structure of vegetation is key to planning and preventing fires in Mediterranean forests. This study evaluates a deep learning model for segmenting vertical strata (tree, shrubby-tree, and shrub) in 3D point clouds acquired using a terrestrial laser scanner (TLS) and a mobile LiDAR integrated into an iPad (MLS-iPad). In semi-real scenarios, IoU (Intersection over Union) values greater than 97% were obtained in the tree layer and around 90% in the shrubby-tree and shrub layers; in real plots, the IoU was 80–91% (tree) and 35–65% (shrubby-tree and shrub). These results confirm the feasibility of the approach and the potential of MLS-iPad for rapid operational diagnostic and structural monitoring campaigns. However, the drop in real plots highlights the need to expand training with real data, with TLS acting as a reference when greater robustness is required.*

Keywords: *TLS, MLS, iPad, deep learning, semantic classification*

1. INTRODUCCIÓN

En bosques mediterráneos, la planificación y la prevención de incendios requieren describir la estructura vertical y la continuidad del combustible, pero el coste de los inventarios de campo limita su aplicación a gran escala, por lo que las nubes de puntos 3D constituyen una alternativa eficiente para caracterizar la vegetación y apoyar análisis ligados al fuego (Carbonell-Rivera *et al.*, 2022; Viedma & Moreno, 2025).

El LiDAR (*Light Detection and Ranging*) permite capturar la estructura forestal en 3D, pero su uso operativo se ve condicionado por el coste y por decisiones de

adquisición en TLS (por ejemplo, número/distribución de escaneos y densidad de puntos), lo que hace especialmente relevante evaluar alternativas como el láser escáner móvil integrado en un dispositivo iPad (MLS-iPad) para levantamientos rápidos y repetibles, siempre que existan flujos automáticos de segmentación por estratos (Gollob *et al.*, 2021; Torralba *et al.*, 2022).

Pese al gran volumen y precisión de los datos LiDAR, la segmentación semántica de nubes de puntos forestales sigue siendo un reto en entornos de alta complejidad estructural. En este contexto, los métodos basados en *deep learning* permiten aprender características directamente de los datos y se han consolidado como

una vía prometedora para el análisis de nubes de puntos 3D (Thomas *et al.*, 2019).

El objetivo principal de este estudio es la segmentación de estratos verticales forestales en nubes de puntos tridimensionales adquiridas en un entorno mediterráneo mediante técnicas basadas en *deep learning*. Esto conduce a los siguientes objetivos específicos: (i) análisis de la segmentación entre estrato arbóreo, arbustivo-arbóreo y arbustivo, y (ii) comparación de la segmentación entre un láser escáner terrestre (TLS) y un MLS-iPad.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio se ubica en el Parque Natural de La Serra d'Espadà, situado al sur de la provincia de Castellón (España). Dicho parque (≈ 31.180 ha y clima mediterráneo) presenta una estructura vertical compleja, con masas dominadas por *Pinus halepensis* Mill. y *P. pinaster* Aiton y la presencia puntual de *Quercus suber* L., junto con un sotobosque denso y diverso (*Cistus albidus* L., *Erica arborea* L., *Juniperus oxycedrus* L. y *Pistacia lentiscus* L.). Esta combinación de estratos bien desarrollados y la elevada densidad de sotobosque favorecen una marcada continuidad vertical y horizontal de la vegetación, incrementando la carga y conectividad del combustible forestal y, por tanto, el riesgo de propagación de incendios.

2.2. Datos

Para la realización del estudio se emplearon datos recopilados en 17 parcelas circulares de 5 m de radio. Para cada una de estas parcelas se tomaron datos de campo, TLS y MLS-iPad.

2.2.1. Datos de campo

Los datos de campo se adquirieron durante los meses de mayo y junio de 2022, combinando técnicas de topografía clásica y observaciones GNSS (Leica RTK 1200+). En cada parcela forestal se registró la posición de los árboles y arbustos de interés, junto con la identificación de la especie correspondiente y sus dimensiones, lo que sirvió como referencia para la correcta interpretación de las nubes de puntos LiDAR. Estos datos se utilizaron como referencia estructural para segmentar las nubes de puntos, incluidas las campañas LiDAR realizadas en 2025, asumiendo que no se produjeron cambios en la posición de los individuos durante ese periodo.

2.2.2. Datos láser escáner terrestre

Las nubes de puntos TLS se adquirieron durante la misma campaña de 2022 con un dispositivo Faro Focus3D 120 (Tabla 1), cubriendo en cada parcela un área circular de 15 m de radio. Para reducir las oclusiones y capturar de forma más completa la estructura de la vegetación, se realizaron cinco estaciones de escaneo por parcela: una central y cuatro adicionales, distribuidas en las direcciones de los puntos cardinales a 7,5 m del centro (Torralba *et al.*, 2022). Durante el escaneo se ubicaron dianas esféricas repartidas por la parcela a diferentes alturas, siendo al menos cuatro visibles entre diferentes escaneos. La

posición de estas dianas se registró con un GNSS Leica System 1200, conectado a la red geodésica de estaciones de referencia Valenciana (ERVA).

2.2.3. Datos láser escáner móvil - iPad

Las nubes de puntos adquiridas con el dispositivo iPad se obtuvieron utilizando el sensor LiDAR integrado en un iPad Pro 11" modelo 2024 (Tabla 1) durante los meses de febrero (12 parcelas) y julio (5 parcelas) de 2025, siguiendo una metodología de escaneo móvil. Cada parcela se dividió en cuatro cuadrantes, que fueron escaneados de forma independiente para mejorar la cobertura y reducir oclusiones, incorporando además dianas esféricas para facilitar el posterior corrección de los datos. Los escaneos se realizaron mediante la aplicación Scaniverse, lo que generó nubes de puntos tridimensionales enriquecidas con información de color RGB. En cuanto a la posición de las dianas, estas se registraron mediante mediciones GNSS utilizando la técnica PPK (*Post Processed Kinematic*) con receptores de la marca Emlid: un Reach RS2+ como base y un Reach RS3 como rover.

Tabla 1. Características de escaneos TLS y MLS-iPad.

Dispositivo	TLS	MLS-iPad
Radio parcela (m)	15	5
Superficie	~ 707 m ²	$\sim 78,5$ m ²
Metodología	5 escaneos	4 cuadrantes
Información puntos	x, y, z, intensidad	x, y, z, rojo, verde, azul
Densidad media	10.024 puntos·m ⁻²	9.529 puntos·m ⁻²
Georreferenciación	GNSS + topografía clásica	PPK

2.3. Metodología

El flujo de trabajo se estructura en cinco etapas principales (Fig. 1): corrección y georreferenciación de los datos LiDAR, selección de muestras, generación de escenarios forestales semirreales, entrenamiento del modelo de *deep learning* y evaluación de los resultados.

En una primera fase, se realizó el preprocesamiento de las nubes de puntos adquiridas con ambos sistemas LiDAR. En el caso de los datos de iPad, los cuadrantes de cada parcela fueron corregidos mediante las dianas esféricas para obtener una nube unificada por parcela. El mismo proceso se siguió para los datos TLS, pero corrigiendo los cinco escaneos. El error promedio en el corrección fue de 4,4 cm para el MLS-iPad y de 1 cm para el TLS. Posteriormente, ambas nubes fueron georreferenciadas a partir de las coordenadas de sus respectivas dianas esféricas. El error promedio en la georreferenciación fue de 14,4 cm para el MLS-iPad y de 2 cm para el TLS. Los datos TLS se preprocesaron con el programa Trimble RealWorks v10.4 de Trimble y los datos MLS-iPad con CloudCompare v2.13.1.

A continuación, se definió un esquema de segmentación basado exclusivamente en estratos de vegetación, agrupando las especies según su papel estructural en el bosque (estrato arbóreo, arbustivo-arbóreo y arbustivo).

Para generar los datos de entrenamiento, se llevó a cabo la segmentación individual de árboles y arbustos por especie sobre las nubes de puntos MLS-iPad y TLS, mediciones obtenidas en campo en 2022 y correspondientes a las mismas parcelas, posteriormente escaneadas en febrero de 2025 con MLS-iPad. Este proceso consistió en una segmentación automática inicial mediante recortes espaciales aproximados alrededor de cada individuo, seguida de una depuración manual para mejorar la calidad geométrica de los segmentos. De forma paralela, se segmentó el suelo, obteniendo así un catálogo de individuos y superficies de referencia que sirvió de base para las siguientes etapas.

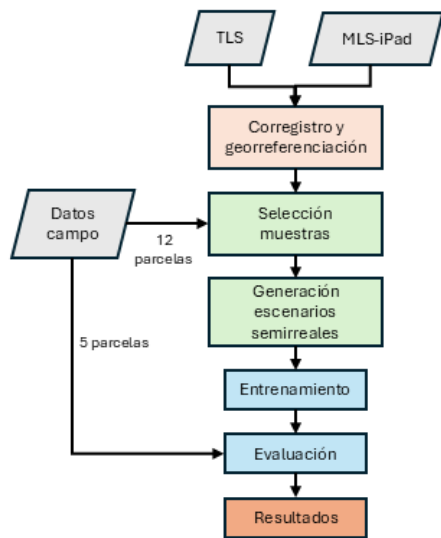


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología.

Dado que los modelos de *deep learning* requieren grandes volúmenes de datos para un entrenamiento robusto, se generaron escenarios forestales semirreales a partir de los individuos segmentados y del suelo (Fig. 2). Estos escenarios se construyeron combinando árboles, arbustos y superficies de terreno en distintas configuraciones espaciales, variando su posición, orientación, densidad y pendiente, con el fin de reproducir de forma realista la variabilidad estructural del bosque mediterráneo. Esta estrategia permitió aumentar significativamente el número de muestras disponibles y mejorar la capacidad de generalización del modelo, generando un total de 2.969 y 2.966 escenarios para el MLS-iPad y el TLS, respectivamente.

El entrenamiento de segmentación semántica se llevó a cabo utilizando la arquitectura KPCConv (*Kernel Point Convolution*), un modelo de *deep learning* diseñado específicamente para el procesamiento directo de nubes de puntos tridimensionales (Thomas *et al.*, 2019). El modelo fue entrenado para asignar a cada punto una etiqueta correspondiente a uno de los estratos de vegetación definidos o al suelo, empleando los escenarios semirreales como conjunto de entrenamiento.

Finalmente, la evaluación del modelo se realizó sobre dos conjuntos de datos independientes: (i) 990 y 989 nuevos escenarios forestales semirreales para el MLS-

iPad y el TLS, respectivamente, y distintos de los utilizados durante el entrenamiento; y (ii) las cinco parcelas forestales reales adquiridas con MLS-iPad en julio de 2025. El rendimiento de la segmentación se analizó mediante métricas estándar de segmentación semántica, incluyendo *precision*, *recall*, *f1-score*, e *Intersection over Union* (IoU), lo que permitió evaluar de forma objetiva la capacidad del modelo para discriminar los distintos estratos de vegetación en escenarios tanto sintéticos como reales.

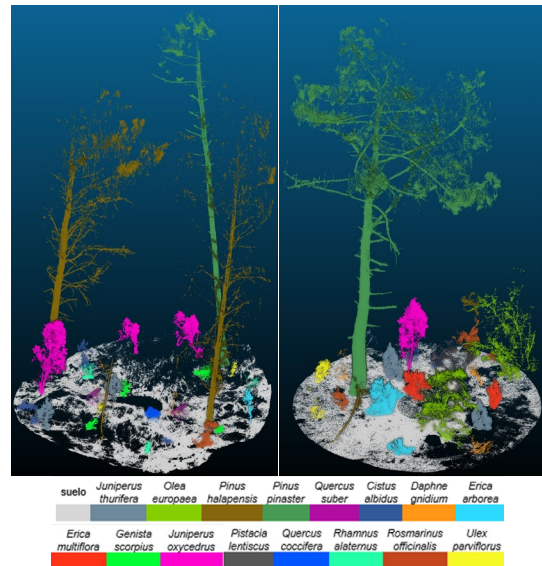


Figura 2. Ejemplo de escenarios semirreales creados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan las métricas de segmentación por estratos forestales (arbóreo, arbustivo-arbóreo y arbustivo) para nubes de puntos adquiridas con TLS y MLS-iPad, evaluadas tanto en escenarios semirreales como en escenarios reales. En conjuntos semirreales, el modelo basado en KPCConv alcanzó rendimientos elevados en todos los estratos, con *f1-score* e IoU superiores al 94% y al 89%, respectivamente, para ambos sensores. El estrato arbóreo obtuvo las métricas más altas, con IoU cercanos al 99% (TLS) y superiores al 97% (MLS-iPad), destacando la robustez del enfoque para caracterizar la parte dominante de la estructura vertical. Los estratos arbustivo y arbustivo-arbóreo mostraron valores ligeramente menores, posiblemente debido al solapamiento geométrico y a la mayor variabilidad morfológica de estos componentes en el bosque.

Al evaluar los escenarios reales, se observó una reducción general de las métricas, más marcada en el estrato arbustivo, especialmente en los datos de MLS-iPad. Esta caída sugiere que la variabilidad estructural presente en bosques reales no está plenamente representada en los escenarios generados para entrenamiento, lo que puede conducir a un cierto sobreajuste del modelo. En la comparación entre sensores, el TLS mostró resultados más consistentes en condiciones reales, aunque los valores de las métricas en MLS-iPad no fueron críticamente distintos para los

estratos arbóreo y arbustivo-arbóreo. Estos resultados indican que, si bien el TLS puede proporcionar un leve

Tabla 2. Resultados de la segmentación de nubes de puntos por estratos verticales para los datos TLS y MLS-iPad, evaluados en escenarios semirreales y reales.

Escenarios	Estrato	precisión		recall		f1-score		IoU (%)	
		TLS	MLS-iPad	TLS	MLS-iPad	TLS	MLS-iPad	TLS	MLS-iPad
Semirreales	Arbustivo	0,906	0,936	0,986	0,991	0,944	0,963	89,46	92,79
	Arbustivo-arbóreo	0,988	0,997	0,954	0,976	0,971	0,986	94,30	97,31
	Arbóreo	0,999	0,980	0,996	0,997	0,998	0,989	99,57	97,75
Reales	Arbustivo	0,675	0,492	0,956	0,548	0,791	0,518	65,46	34,99
	Arbustivo-arbóreo	0,878	0,794	0,546	0,763	0,673	0,778	50,77	63,70
	Arbóreo	0,927	0,890	0,984	0,891	0,954	0,891	91,26	80,28

beneficio en la precisión, los sensores MLS de bajo coste constituyen una alternativa viable para la segmentación de estratos verticales cuando el objetivo es la caracterización estructural del bosque.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran la viabilidad de segmentar estratos verticales forestales en nubes de puntos tridimensionales de bosques mediterráneos mediante técnicas de *deep learning*. La metodología propuesta mostró altos niveles de precisión en escenarios semirreales, confirmando su capacidad para discriminar robustamente entre los estratos considerados. La disminución de las métricas en escenarios reales sugiere que las configuraciones semirreales no capturan completamente la variabilidad estructural del sotobosque; por ello, además de ampliar la diversidad de los escenarios generados, es necesario incorporar más datos reales en el entrenamiento para mejorar la generalización del modelo. Aunque el uso de TLS ofreció resultados algo más estables en datos reales, el MLS-iPad presentó un rendimiento competitivo, lo que indica que los dispositivos de bajo coste pueden ser adecuados para aplicaciones operativas de segmentación por estratos. En trabajos futuros se explorarán estrategias de aumento de datos y se evaluará la metodología en condiciones estructurales más diversas para reforzar su aplicabilidad.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada con Ayuda a Primeros Proyectos de Investigación (PAID-06-23), Vicerrectorado de Investigación de la Universitat Politècnica de València (UPV) y por el proyecto PID2024-158591OB-100, financiado por el MICUI/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

6. REFERENCIAS

- Carbonell-Rivera, J. P., Torralba, J., Estornell, J., Ruiz, L. Á., & Crespo-Peremarch, P. (2022). Classification of Mediterranean Shrub Species from UAV Point Clouds. *Remote Sensing*, 14(1), 199. <https://doi.org/10.3390/rs14010199>
- Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A., & Nothdurft, A. (2021). Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology. *Remote Sensing*, 13(16), 3129. <https://doi.org/10.3390/rs13163129>
- Thomas, H., Qi, C. R., Deschaud, J.-E., Marcotegui, B., Goulette, F., & Guibas, L. J. (2019). Kpconv: Flexible and deformable convolution for point clouds. *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, 6411-6420.
- Torralba, J., Carbonell-Rivera, J. P., Ruiz, L. Á., & Crespo-Peremarch, P. (2022). Analyzing TLS Scan Distribution and Point Density for the Estimation of Forest Stand Structural Parameters. *Forests*, 13(12), 2115. <https://doi.org/10.3390/f13122115>
- Viedma, O., & Moreno, J. M. (2025). Impact of LiDAR pulse density on forest fuels metrics derived using LadderFuelsR. *Ecological Informatics*, 88, 103135. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103135>