



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1289

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

Organiza





Supervisión del avance geográfico y cuantificación del volumen de madera apilada mediante vuelos de dron y algoritmos de inteligencia artificial en explotaciones forestales.X

BECERRA ELCINTO, J. (1), RODRÍGUEZ ECHAPRESTO, L. A. (1), MARTÍNEZ DE LAGUNA MARQUÍNEZ, R. (1) y FERNÁNDEZ PATA, Ó. (1)

(1) PANOimagen S.L.

Resumen

Las tareas forestales, como la supervisión de áreas taladas y la cuantificación de madera apilada, han dependido tradicionalmente de trabajo manual intensivo. Con el avance de la tecnología, los vehículos aéreos no tripulados (drones) han emergido como herramientas clave, proporcionando imágenes aéreas que permiten la creación de mapas georreferenciados, modelos de elevación y modelos tridimensionales mediante algoritmos fotogramétricos. Este estudio explora los recientes avances en la automatización y optimización de estas tareas utilizando aprendizaje profundo. A través de métodos de alineación y análisis de diferencias de altura con modelos digitales de superficie (MDS), se logra identificar áreas taladas de manera eficiente, independientemente de la especie arbórea o ubicación. Además, se introduce un enfoque innovador para la cuantificación de madera apilada post-tala, empleando modelos tridimensionales, segmentación de nubes de puntos y geometría computacional. Estos procesos están integrados en la plataforma Diametree, que incluye herramientas adicionales para la gestión de explotaciones forestales, como el cálculo del coeficiente de apilado de troncos, la estimación del diámetro de árboles y la visualización de datos de tala desde las máquinas procesadoras.

Palabras clave

Fotogrametría, MDS, nube de puntos, aprendizaje profundo, silvicultura.

1. Introducción

En los últimos años, el uso de vehículos aéreos no tripulados (drones) se ha popularizado enormemente en la investigación. Avances en la microelectrónica y la tecnología de baterías han permitido el desarrollo de drones de bajo coste, ampliando su accesibilidad y aplicaciones prácticas (JOHNSTON, 2019). Los drones ofrecen ventajas significativas, como teledetección a demanda, flexibilidad operativa, alta precisión, reducción de costes y menor exposición al riesgo humano (JOHNSTON, 2019; BANU et al., 2016). Estas características han fomentado su adopción en la silvicultura, donde permiten recopilar datos clave para una amplia variedad de actividades de gestión forestal.

Entre sus múltiples aplicaciones en este sector, los drones se emplean en tareas como la evaluación de la salud de las plantas o la detección de daños ocasionados por la fauna o las catástrofes naturales. Equipados con cámaras multispectrales, son capaces de identificar brotes de enfermedades mediante la detección temprana de cambios en la coloración del follaje (DASH et al., 2017).



Además de su utilidad en la gestión de incendios y detección de daños, los drones han demostrado ser herramientas eficaces en actividades tradicionales de gestión forestal, como la tala activa y la inspección post-tala. En West Virginia Division of Forestry, por ejemplo, se utilizan drones para asegurar el cumplimiento de las mejores prácticas en trabajos de tala, reduciendo significativamente los tiempos de inspección, de varias horas a menos de una (WEST VIRGINIA DIVISION OF FORESTRY, 2021). También están comenzando a usarse en inventarios madereros, especialmente en plantaciones de pinos, donde pueden estimar densidades arbóreas, áreas basales y biomasa con notable precisión incluso en terrenos difíciles (ALONZO et al., 2018).

Otra capacidad clave de los drones es su habilidad para recopilar grandes volúmenes de información visual. Mediante fotogrametría, es posible convertir imágenes bidimensionales en modelos tridimensionales que permiten medir alturas de árboles, delinear copas y obtener datos esenciales sobre los ecosistemas forestales (PANAGIOTIDIS et al., 2017).

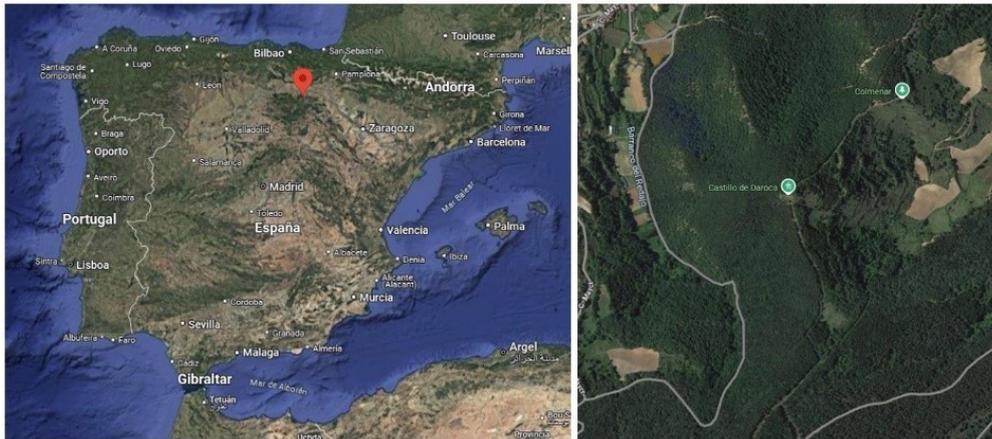
En este estudio, hemos empleado drones para mapear grandes áreas forestales mediante fotogrametría aérea y generar modelos de superficie precisos. Asimismo, hemos complementado esta técnica con fotogrametría terrestre, utilizando cámaras digitales para crear modelos tridimensionales detallados de troncos apilados. Este enfoque combinado nos permite mejorar la precisión en la recolección de datos y el monitoreo forestal.

2. Objetivos

El principal objetivo de este estudio es maximizar la automatización de dos procesos esenciales en el control de operaciones de tala: el monitoreo del avance geográfico de la explotación y la cuantificación del volumen de madera apilada. Para alcanzar este objetivo, se ha integrado en las plataformas CHAMELEON y Diametree, mejorando su capacidad para gestionar y supervisar actividades forestales de manera eficiente.

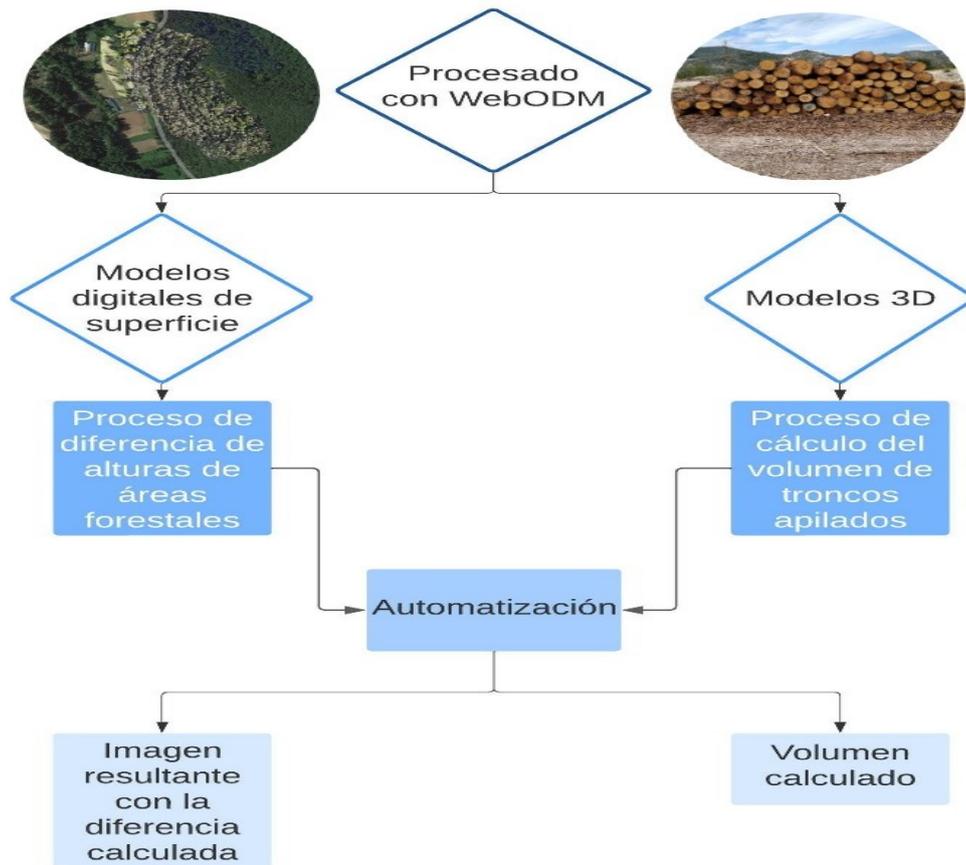
3. Metodología

El área de estudio se localiza en la Comunidad Autónoma de La Rioja (España), más concretamente en una explotación forestal de la localidad de Daroca de Rioja (Figura 1). Esta zona fue seleccionada debido a su representatividad dentro de los ecosistemas montañosos de la región, caracterizados por su diversidad biológica y su importancia en términos de gestión forestal. La vegetación predominante está compuesta principalmente por bosques de pinos, que son el foco principal de la recolección de datos en este estudio.



Los vuelos se han realizado en la misma zona para permitir la posterior comparación de ortofotos y modelos de superficie en diferentes fechas. Para la captura de datos de las pilas de troncos apilados, las grabaciones se llevaron a cabo en dos zonas de La Rioja, en Daroca de Rioja y Viguera, que son áreas de frecuente actividad de tala.

A continuación, en el siguiente diagrama de flujo (Figura 2), se representa un esquema simplificado de los pasos del procedimiento seguido. El preprocesado de los datos se realiza mediante el software WebODM, a través del cual se cargan las imágenes y videos capturados por el dron y las imágenes obtenidas con la cámara del dispositivo iPad. Posteriormente, se realiza el tratamiento de los archivos generados. Por un lado, los modelos digitales de superficie para hacer la diferencia de alturas, y por otro lado, se desarrollan los modelos tridimensionales necesarios para estimar el volumen de los troncos apilados.



Metodología de vuelo

Los drones utilizados en este estudio nos proporcionaron imágenes y videos aéreos esenciales para la creación de modelos de terreno. Para ello, se emplearon dos modelos de drones, cuyas características principales se describen a continuación:

DJI Mini 2: este modelo cuenta con una cámara equipada con un sensor de 1/2,3" y una resolución de 12 MP, capaz de grabar vídeo en 4K a 30 FPS. Incluye un estabilizador de tres ejes para minimizar las vibraciones durante el vuelo y admite el almacenamiento de fotos en formatos JPEG y RAW. Además, dispone de un sistema GPS integrado que permite obtener datos georreferenciados, cruciales para el procesamiento posterior.

YUNEEC Typhoon H PLUS: Su cámara C23 incorpora un sensor de 1" con una resolución de 20 MP, que puede grabar vídeo en 4K a 60 FPS y ofrece múltiples opciones de resolución. Este dron también cuenta con dos modos panorámicos, circular y esférico, diseñados para capturar imágenes de 360°.

Previamente a los vuelos, se realizó una planificación basada en las normativas vigentes en España y la Unión Europea, establecidas por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) y las regulaciones aplicables a operaciones con aeronaves no tripuladas, garantizando el cumplimiento de los requisitos de seguridad y legalidad. Entre las normativas consideradas, se encuentran el Reglamento de



Ejecución (UE) 2019/945 consolidado y el Reglamento Delegado (UE) 2019/947 consolidado. Asimismo, se tuvo en cuenta la normativa nacional más reciente, como el Real Decreto 517/2024, que desarrolla el régimen jurídico para la utilización civil de UAS y complementa el marco normativo europeo.

El piloto cualificado llevó a cabo una revisión para comprobar el estado físico del dron, cargar las baterías, verificar que tanto el dron como el control remoto tengan el firmware actualizado, revisar el área de vuelo y ajustar los parámetros necesarios (Tabla 1). Posteriormente, se procedió a la ejecución de los vuelos, capturando imágenes y vídeos conforme a la planificación establecida.

2 cm/ px

Delante 70% y lateral: 40 %

Vertical

120 m

Preprocesado de los datos

El primer paso del trabajo consistió en la instalación y configuración del software WebODM, una herramienta clave para generar mapas georreferenciados, modelos de elevación, nubes de puntos y modelos 3D texturizados a partir de imágenes. El procesamiento se realizó en un servidor equipado con una tarjeta gráfica Nvidia, aprovechando su capacidad de GPU para acelerar la ejecución y mejorar la eficiencia del flujo de trabajo.

Una vez descargados los datos recogidos por el dron, procesamos las imágenes georreferenciadas y videos DJI. En el caso de los videos, fue necesario crear archivos SRT para incorporar la información de georreferenciación. Ajustando parámetros clave como el número mínimo de características detectadas o la resolución de las ortofotos, se obtuvieron los archivos objetivo.

Por una parte, se generaron modelos digitales de superficie (MDS), que son representaciones tridimensionales del terreno que incluyen todas las estructuras naturales y artificiales presentes. La creación de MDS para un mismo terreno en diferentes momentos facilita el análisis de la evolución de las masas forestales, así como el estudio del impacto de fenómenos como incendios forestales o inundaciones. En este caso, los MDS se utilizaron como herramienta principal para supervisar el avance geográfico de las operaciones de tala en el área de estudio.

Para la visualización y comprobación de los archivos resultantes, se emplearon herramientas como QGIS, CloudCompare y MeshLab. Además, el visor integrado en WebODM permitió realizar comprobaciones directamente sobre el mapa.

Por otra parte, se generaron nubes de puntos, que son conjuntos de datos en un espacio tridimensional (3D) que representan la superficie de un objeto o entorno. Cada punto se define mediante coordenadas X, Y, Z, y puede incorporar atributos adicionales como el color o la reflectancia. Estas nubes, obtenidas mediante técnicas de fotogrametría, ofrecen una representación tridimensional de alta precisión, esencial para aplicaciones detalladas. En la Figura 3 se muestra un

bosque reconstruido en tres dimensiones mediante fotogrametría.



En este estudio, las nubes de puntos generadas a partir de los troncos apilados no solo proporcionan una herramienta poderosa para medir y gestionar el volumen de madera, sino que también juegan un papel crucial en la optimización de recursos, la seguridad, la logística y el cumplimiento normativo. Estas ventajas hacen que el uso de nubes de puntos sea altamente beneficioso en industrias como la maderera, la construcción y la gestión forestal.

Comparación de los modelos de superficie de los vuelos

La correcta georreferenciación de las imágenes es un paso fundamental para el método de comparación empleado en este estudio. Sin embargo, este proceso plantea desafíos técnicos, ya que requiere el uso de sensores GPS RTK (que no siempre están disponibles) o marcadores terrestres (algo incompatible con los principios del proyecto CHAMELEON, ya que no se dispone de personal en el lugar para instalarlos y georreferenciarlos).

KORPELA (2006) exploró el uso de GCP post-posicionados, puntos de enlace inmóviles y georreferenciación directa para mejorar la orientación de series temporales de imágenes. Este estudio concluyó que es particularmente complicado identificar puntos de enlace multitemporales inmóviles en entornos forestales, especialmente con imágenes a pequeña escala. Por otro lado, los métodos basados en características mencionados por VASSILAKI et al. (2012) han demostrado ser prometedores. Compararon características lineales y GCP como control de terreno, concluyendo que las primeras ofrecen un rendimiento superior. Asimismo, NURMINEN et al. (2015) destacó el avance hacia la automatización en la georreferenciación de imágenes aéreas, específicamente en la detección y evaluación de ubicaciones de control estables para la orientación de imágenes.

En el presente proyecto, trabajamos con reconstrucciones de una misma zona forestal tomadas en diferentes fechas, que presentan varios metros de error en el plano del suelo y valores de altitud aleatorios (sin una referencia válida y constante). Se propone un proceso de alineado basado en el MDS reconstruido, que



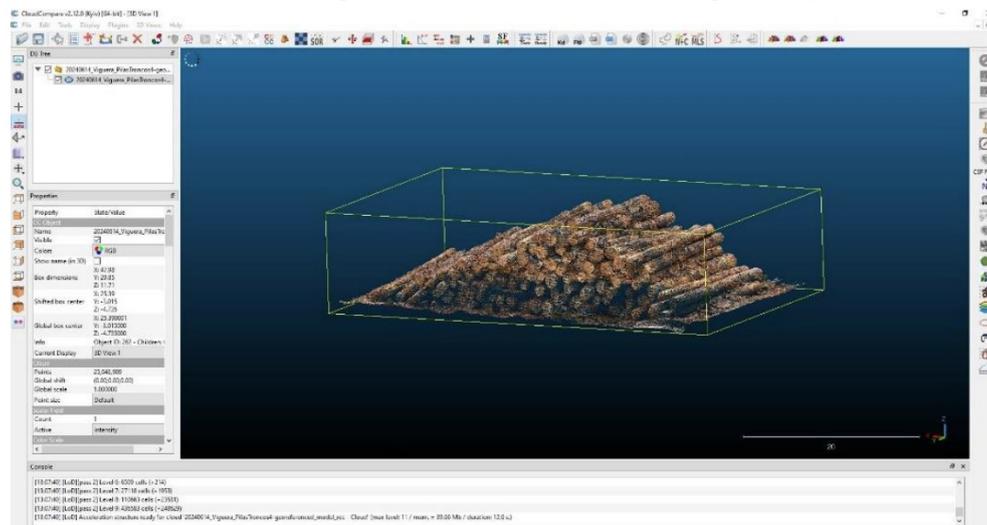
permite corregir tanto la alineación horizontal mediante el método RANSAC y marcadores SIFT sobre el gradiente MDS, como alineación vertical, obteniendo el modelo digital del terreno (MDT) mediante un proceso de filtrado no lineal. Posteriormente, los datos de las imágenes registradas y rectificadas se compararon con respecto al MDT correspondiente.

El resultado final ofrece una estimación de las diferencias de altura en el terreno. Las áreas donde la altura se ha reducido significativamente (puede modularse en función de la especie de árbol) se marcan como zonas "taladas". Este enfoque es independiente de la especie arbórea o de la localización geográfica, lo que permite su implementación a escala global.

Cálculo del volumen de los troncos apilados

Para medir las pilas de troncos, se empleó una tablet Apple iPad Pro 12,9" de 6ª generación montada en un palo selfie especializado. La cámara cuenta con un objetivo gran angular de 12 MP, apertura f/1,8, zoom digital de hasta x5 y estabilización automática de imagen. Las imágenes se capturaron en formatos HEIF y JPEG. Este dispositivo, con unas dimensiones de 280,6 x 214,9 x 6,4 mm, permitió registrar imágenes mediante un movimiento de barrido ondulatorio, asegurando la captura de todas las caras visibles de la pila de troncos. Este enfoque buscaba generar una reconstrucción 3D precisa al cubrir completamente la superficie de la madera y evitar huecos que pudieran dificultar el procesamiento posterior. Además, se tomaron medidas manuales de anchura, longitud y altura para comparar el volumen calculado con el real.

El procesamiento de las imágenes y videos capturados se realizó utilizando WebODM, con el objetivo de generar nubes de puntos y mallas 3D. Estos archivos, más complejos de manejar que las imágenes 2D, fueron visualizados y analizados mediante herramientas especializadas como CloudCompare (Figura 4).



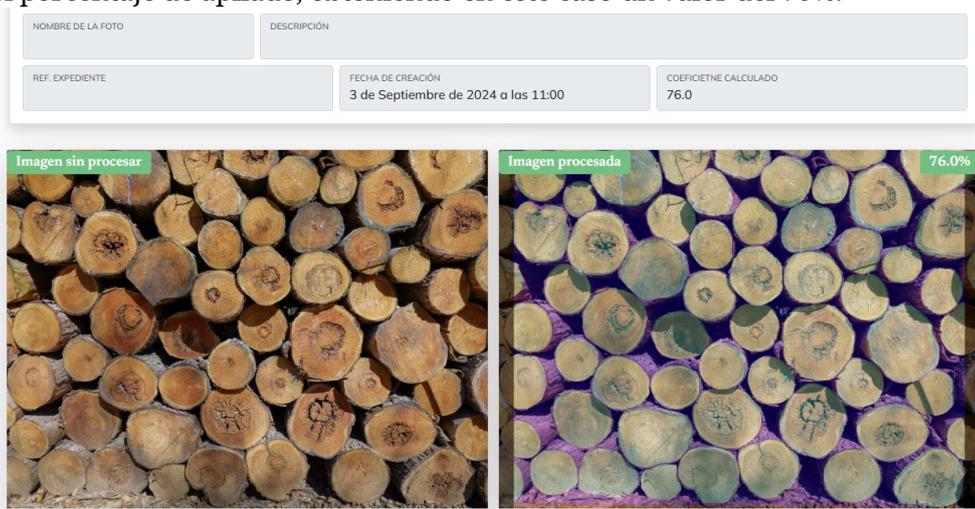
Para determinar el volumen de los troncos a partir de una nube de puntos, se combinaron varias técnicas avanzadas como el procesamiento de nubes de puntos (segmentación de planos), geometría computacional (triangulación de Delaunay) y cálculo numérico (integración de volúmenes). El desarrollo se implementó

utilizando bibliotecas de Python como Open3D, TriMesh y SciPy. Además, se probaron distintos métodos, como Convex Hull, Poisson Reconstruction y Clustering, para optimizar la reconstrucción tridimensional.

Es crucial garantizar que la malla generada sea estanca, de lo contrario, el cálculo del volumen puede ser incorrecto. También se deben considerar las unidades de medida configuradas en WebODM, ya que determinarán las unidades del volumen calculado.

Otra métrica relevante es el diámetro de cada árbol. Este puede ser medido manualmente sobre el terreno, al igual que las dimensiones anteriores, o calculado de manera automatizada mediante algoritmos de aprendizaje profundo, aplicando segmentación de instancias. Este método permite identificar los árboles en la nube de puntos y calcular su diámetro.

A su vez, la segmentación de instancias también se utiliza para calcular el coeficiente de apilado de madera, que mide la relación entre el volumen aparente y el volumen real de los troncos. En la Figura 5, se muestra un ejemplo de la aplicación de Diametree, donde se detectaron las testas de los troncos y se calculó el porcentaje de apilado, obteniendo en este caso un valor del 76%.



Plataformas web para la automatización

Para implementar los procesos y cálculos descritos en este artículo, se han empleado las plataformas CHAMELEON y Diametree, ambas diseñadas para abordar los desafíos del sector forestal mediante soluciones tecnológicas avanzadas.

CHAMELEON (<https://chameleon-heu.eu/>) es un proyecto de Horizonte Europa, orientado a optimizar la producción y resolver problemas en agricultura, ganadería, silvicultura y áreas rurales. Destaca por el uso de un dron reconfigurable innovador, capaz de adaptar su configuración y tamaño según las necesidades específicas. Este dron puede desplegarse en grupos homogéneos o heterogéneos para abordar escenarios complejos, respaldado por un sistema modular, interoperable y conectado en red. Los avances tecnológicos de

CHAMELEON han sido validados a través de tres casos piloto en España, Grecia y Austria. Gracias a su enfoque innovador, esta plataforma facilita la recopilación de datos mediante drones, lo que resulta fundamental para proyectos como este.

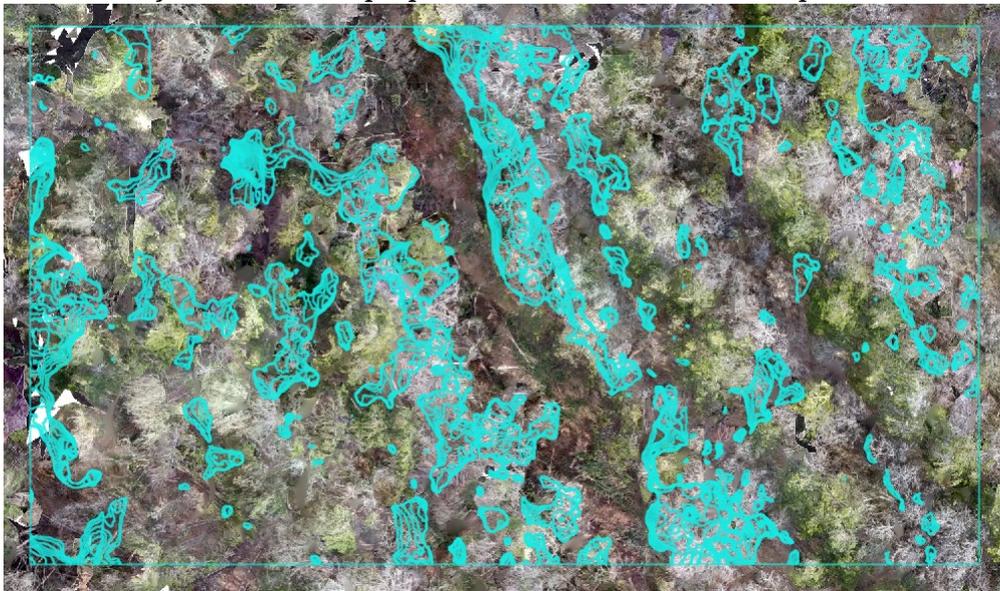
Diametree (<https://www.diametree.com/es/>), por su parte, es una plataforma web especializada en la gestión forestal, diseñada para realizar tareas como el cálculo del coeficiente de apilado de troncos, la estimación del diámetro de los árboles a partir de nubes de puntos y la visualización de datos de tala obtenidos desde máquinas procesadoras. Este estudio ha incorporado nuevas funcionalidades a Diametree, ampliando sus capacidades y complementando las herramientas ya existentes para una gestión forestal más eficiente.

4. Resultados

Resultados de las comparaciones entre MDS

Como resultado de los métodos descritos anteriormente, se obtiene una imagen que muestra las zonas con diferencias de altura, en caso de que estas existan.

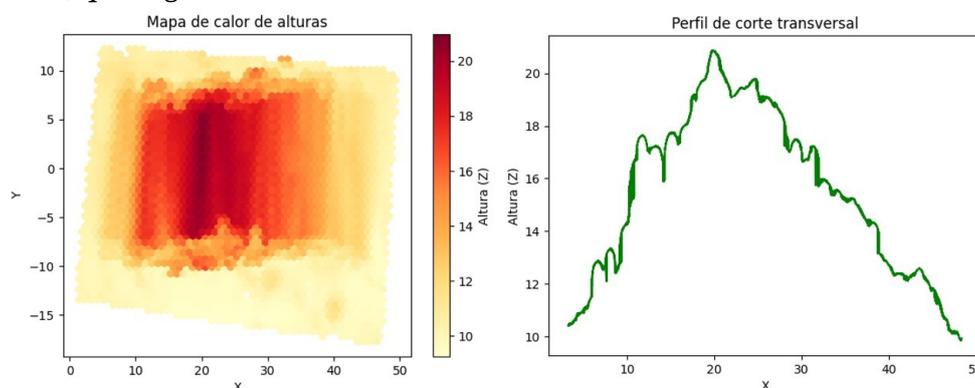
Para verificar la correspondencia entre los resultados y la realidad, utilizamos como referencia las ortofotos generadas junto con los MDS originales. Estas ortofotos actúan como un mapa base que nos permite evaluar y analizar los resultados obtenidos. Con la ayuda de la interfaz gráfica de QGIS, superponemos capas y empleamos herramientas de edición sobre las imágenes, facilitando una interpretación precisa de los datos. En la Figura 6 se observa un archivo GeoJSON (líneas azules), que contiene las intersecciones entre dos MDS de fechas diferentes (10/03/2024 y 24/03/2024), superpuesto sobre la ortofoto correspondiente.



Resultados del cálculo de los volúmenes

Antes de realizar los cálculos finales, se verificó la calidad de los datos obtenidos a partir de las nubes de puntos para garantizar su utilidad en las operaciones posteriores. Como parte de esta verificación, se generaron gráficos como mapas de calor de alturas y perfiles de corte transversales. En la Figura 7 se muestra un

ejemplo representativo, el mapa de calor evidencia una notable concentración de alturas elevadas en el centro, lo que indica la región con mayor densidad o volumen de troncos apilados. Por su parte, la gráfica del perfil de corte transversal revela un patrón ondulante en las alturas, con un pico principal próximo a la zona media, que sugiere una acumulación de troncos más alta en esa área.



Tras completar el pretratamiento de los datos, se procedió al cálculo del volumen. Utilizando las dimensiones medidas (longitud, anchura y altura), se obtuvo el volumen aparente, es decir, el volumen total ocupado, que incluye tanto el volumen de los troncos como los espacios vacíos entre ellos (vacíos intersticiales). Sin embargo, este volumen es mayor que el volumen real de madera aprovechable. Para ajustar esta estimación inicial, es necesario aplicar un factor de corrección, el coeficiente de apilado que hemos calculado previamente mediante la segmentación de instancias. Este factor oscila dependiendo de la uniformidad y disposición de los troncos.

El volumen calculado corresponde al resultado de los procedimientos descritos mediante nubes de puntos. La Tabla 2 presenta los valores obtenidos para dos nubes de puntos distintas. Los resultados están expresados en unidades cúbicas de WebODM, las cuales corresponden a metros cúbicos escalados automáticamente por el software en ausencia de georreferenciación precisa. El coeficiente de apilado es un valor adimensional, ya que representa la relación entre volúmenes.

1	0,66	7034	4642	4363
2	0,59	4838	2854	2753

Al analizar los resultados, se observa que el volumen medido por métodos tradicionales (físicos o geométricos convencionales) es significativamente mayor que las otras dos estimaciones. Este resultado es razonable, ya que los métodos físicos no consideran los vacíos entre los troncos. Por otro lado, el volumen ajustado, que aplica el factor de corrección, y el volumen calculado a partir de las nubes de puntos, presentan valores más próximos entre sí, aunque el segundo suele ser ligeramente menor. Esto podría atribuirse a limitaciones inherentes a las nubes de puntos, como una densidad insuficiente, errores en la triangulación o la eliminación de ruido durante el procesamiento.



En resumen, si bien existen diferencias entre los métodos, el volumen ajustado y el calculado mediante nubes de puntos, ofrecen estimaciones más realistas al considerar las características específicas de la pila de troncos.

5. Discusión

El análisis de diferencias de alturas en los DSM aplicado en este estudio permitió identificar zonas taladas mediante la comparación de reconstrucciones multitemporales de áreas forestales. Si bien el método es funcional, los resultados indican que su precisión puede mejorar. Factores como las limitaciones en la georreferenciación de las imágenes capturadas por drones o las inexactitudes derivadas del proceso de alineación contribuyen a errores en la estimación de diferencias de altura.

Los resultados de este estudio pueden complementarse con trabajos previos como el de GINI (2010), que compararon DSM generados mediante drones, sensores LiDAR y métodos fotogramétricos tradicionales (ADS40). Aunque ambos enfoques buscan mejorar la precisión en la obtención y alineación de modelos digitales de superficie, las diferencias metodológicas son significativas. Mientras nuestro método utiliza drones y algoritmos de alineación basados en RANSAC y SIFT para corregir errores en modelos multitemporales y detectar zonas taladas, el enfoque de GINI (2010) evalúa la fiabilidad de los DSM mediante transformaciones de similitud en 3D y análisis de los residuales en X, Y y Z con herramientas como LS3D.

La integración de sensores LiDAR con drones podría ofrecer una alternativa interesante, combinando la flexibilidad y cobertura de los drones con la alta precisión de los sensores LiDAR. Este enfoque ha demostrado ser particularmente útil en áreas con densa cobertura forestal o topografías complejas, donde los métodos fotogramétricos tradicionales presentan limitaciones (CHOI et al., 2023; HU et al., 2021). No obstante, su implementación aún presenta desafíos técnicos y económicos, como la necesidad de sistemas de estabilización avanzados para garantizar la calidad de los datos durante el vuelo. Investigaciones recientes han demostrado que los sistemas LiDAR de bajo costo montados en drones pueden proporcionar estimaciones de altura de árboles y métricas de copa comparables a las obtenidas con sensores de gama alta, lo que representa un avance importante hacia la democratización del uso de LiDAR en el monitoreo forestal (HU et al., 2021). Además, la integración de sensores LiDAR con drones podría potenciarse con algoritmos de aprendizaje profundo, optimizando la detección de estructuras y reduciendo errores en la clasificación de elementos en los DSM.

Los algoritmos de aprendizaje profundo integrados en nuestro enfoque representan un avance significativo respecto a los métodos tradicionales. Estos métodos no solo reducen la dependencia de mediciones manuales, sino que también optimizan la detección de patrones complejos y la clasificación de elementos en los DSM. HU & YUAN (2016), mediante una red neuronal profunda



entrenada con datos LiDAR aéreos, lograron filtrar automáticamente la vegetación y estructuras con alta precisión, reduciendo errores de omisión del terreno frente a métodos tradicionales. Además, los resultados de AMINI AMIRKOLAEI et al. (2022) indican que la red profunda pudo reducir errores sistemáticos al remover edificaciones y árboles del DSM, evidenciando mejoras en la detección de patrones de relieve y reducción de errores frente a métodos tradicionales de filtrado. Este avance optimiza la obtención de DTM confiables para aplicaciones topográficas y de monitoreo ambiental complejas.

Con respecto a la cuantificación de madera apilada, en estudios recientes, PURFÜRST et al. (2023) señala que ningún método puede considerarse el más preciso debido a la alta variabilidad en los enfoques y la influencia humana inesperadamente significativa. Nuestro trabajo busca superar estas limitaciones mediante la implementación de algoritmos de pretratamiento para las nubes de puntos, que corrigen defectos como zonas de ruido o puntos considerados outliers. Investigaciones adicionales han mostrado que los métodos de escaneo 3D con LiDAR, ya sea mediante dispositivos portátiles o integrados en drones, pueden reducir los errores en la cuantificación de madera apilada, aunque aún existen desafíos en la estandarización de estas técnicas. UÇAR et al. (2024) analizan cómo el uso de aplicaciones móviles con visión artificial para la estimación de volumen de troncos ha mostrado resultados prometedores, con errores comparables a los de métodos manuales, pero con una mayor eficiencia operativa en campo. No obstante, señalan la necesidad de preprocesamiento de las nubes de puntos e imágenes, por ejemplo, usar referencias de escala y eliminar oclusiones para mejorar la exactitud, advirtiendo que factores como la distancia a la pila o la iluminación pueden influir en los resultados. Las herramientas digitales para cuantificar madera apilada tienen gran potencial, pero requieren calibraciones y ajustes para una integración confiable en la gestión forestal.

En nuestro estudio, los volúmenes calculados fueron menores que los volúmenes aparentes y ajustados (Tabla 2), una tendencia consistente con los hallazgos de UÇAR et al. (2024), quienes también identificaron diferencias notables al comparar distintos métodos de medición volumétrica mediante aplicaciones móviles. Basándonos en las diferencias porcentuales con respecto al volumen de referencia, nuestro método muestra la menor diferencia promedio entre los volúmenes calculados y los reales (4,78%), en comparación con los resultados obtenidos por UÇAR et al. (2024), quienes encontraron que Timbeter presenta una leve sobreestimación con una diferencia promedio de 8,83% en valores absolutos, mientras que iFovea Pro tiende a subestimar los volúmenes de manera más pronunciada, con una diferencia promedio de 10,58%. Los resultados de Timbeter e iFovea Pro mostraron que, en general, ambos métodos estimaron volúmenes más pequeños que el volumen de referencia. Sin embargo, Timbeter produjo estimaciones de volumen y diámetro medio más cercanas al volumen de referencia que iFovea Pro. Cabe destacar que estas diferencias presentan más variabilidad debido a su mayor número de pilas de troncos medidas. Además, las diferencias observadas podrían explicarse por factores como los tipos de madera, la densidad del apilado o las condiciones experimentales específicas de cada estudio. Nuestros hallazgos refuerzan la importancia del preprocesamiento adecuado de las nubes de puntos para mejorar la precisión en las estimaciones



volumétricas.

En términos de implicaciones prácticas y futuras investigaciones, herramientas integradas como Diametree, diseñadas para la gestión forestal digital, responden a la necesidad de avanzar hacia la estandarización del sector. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con su aplicabilidad en condiciones climáticas extremas, zonas de difícil acceso o escenarios con variaciones drásticas de iluminación. NITOSLAWSKI et al. (2021) destacan estos desafíos en entornos adversos como bosques tropicales con baja conectividad o condiciones climáticas extremas, que dificultan la implementación continua de tecnologías digitales. Concluye con recomendaciones para impulsar la transformación digital del sector forestal, fomentando colaboraciones entre investigadores, industria y administraciones para estandarizar metodologías, mejorar la interoperabilidad de datos y adaptar las innovaciones a las condiciones del mundo real. Estas acciones ayudarían a que la digitalización aporte plenamente a la gestión sostenible de los bosques.

Estas limitaciones requieren investigaciones adicionales para garantizar la robustez de estas tecnologías en entornos más exigentes. En esta línea, la adopción de modelos de transformación digital en la gestión forestal, alineados con el concepto de "Forestal 4.0", plantea la necesidad de superar obstáculos técnicos y regulatorios para garantizar una integración efectiva de estas innovaciones en la industria (DAMAŠEVIČIUS et al., 2024).

En definitiva, el desarrollo continuo de estas tecnologías no solo mejorará la gestión forestal, sino que también contribuirá a la sostenibilidad y conservación de los ecosistemas forestales.

6. Conclusiones

Los resultados de este estudio destacan la relevancia y aplicabilidad de la metodología desarrollada, mostrando un interés significativo para todas las partes involucradas en las operaciones de tala, desde propietarios de terrenos hasta autoridades ambientales. La posibilidad de integrar este enfoque en plataformas web y en la nube, amplía enormemente su potencial, haciendo que los servicios puedan ser accesibles a clientes a nivel global.

Una de las principales ventajas de este sistema radica en la capacidad de ofrecer mecanismos de control independientes, lo cual resulta crucial tanto para la detección y prevención de talas ilegales como para el monitoreo de talas legales que puedan exceder los límites acordados. Esta funcionalidad no solo refuerza la transparencia en las operaciones forestales, sino que también contribuye a fomentar una gestión más sostenible de los recursos naturales.

Gracias a la inspección aérea mediante drones y la implementación de nuevas tecnologías como la fotogrametría y el aprendizaje profundo, no solo logramos una mayor eficiencia en nuestras operaciones, sino que también ofrecemos a los



propietarios y autoridades, herramientas más precisas para supervisar y regular las actividades forestales minimizando el impacto ambiental.

En definitiva, este estudio establece una base sólida para la digitalización de la gestión forestal, proponiendo una solución innovadora que combina precisión técnica, accesibilidad y flexibilidad. A medida que la tecnología continúa evolucionando, el enfoque aquí presentado tiene el potencial de convertirse en una herramienta clave para fortalecer la sostenibilidad ambiental a nivel global.

7. Agradecimientos

Parte de este estudio, en concreto el proceso de diferencia de alturas de áreas forestales y el cálculo del volumen de los troncos apilados, se ha llevado a cabo gracias a la primera convocatoria abierta (OC1) del proyecto CHAMELEON, en el subproyecto TILO (Timber stack Inventory for Logging Operations with UAVs), financiado por la Unión Europea (<https://chameleon-heu.eu/open-calls/>).

8. Bibliografía

ALONZO, M.; ANDERSEN, H.E.; MORTON, D.C.; COOK, B.D.; 2018. Quantifying boreal forest structure and composition using UAV structure from motion. *Forests* 9(3).

AMINI AMIRKOLAEI, H.; AREFI, H.; AHMADLOU, M.; RAIKWAR, V.; 2022. DTM extraction from DSM using a multi-scale DTM fusion strategy based on deep learning. *Remote Sens. of Environ.* 274, 113014.

BANU, T.P.; BORLEA, G.F.; BANU, C.; 2016. The Use of Drones in Forestry. *J. Environ. Sci. Eng. B* 5(11).

CHOI, S.-K.; RAMIREZ, R. A.; KWON, T.-H.; 2023. Acquisition of high-resolution topographic information in forest environments using integrated UAV-LiDAR system: System development and field demonstration. *Heliyon* 9(9) e20225.

DAMAŠEVIČIUS, R.; MOZGERIS, G.; KURTI, A.; MASKELIŪNAS, R.; 2024. Digital transformation of the future of forestry: an exploration of key concepts in the principles behind Forest 4.0. *Frontiers in Forests and Global Change* 7, 1424327.

DASH, J.P.; WATT, M.S.; PEARSE, G.D.; HEAPHY, M.; DUNGEY, H.S.; 2017. Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 131, 1-14.

GINI, R.; 2010. Processing of high resolution and multispectral aerial images for forest DSM production and tree classification. Politecnico di Milano. 87 páginas.



Milan.

HU, T.; SUN, X.; SU, Y.; GUAN, H.; SUN, Q.; KELLY, M.; 2021. Development and performance evaluation of a very low-cost UAV-Lidar system for forestry applications. *Remote Sens.* 13(1), 77.

HU, X.; YUAN, Y.; 2016. Deep-learning-based classification for DTM extraction from ALS point cloud. *Remote Sens.* 8(9), 730.

JOHNSTON, D.W.; 2019. Unoccupied Aircraft Systems in Marine Science Conservation. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 11(1), 439-463.

KORPELA, I.; 2006. Geometrically accurate time series of archived aerial images and airborne lidar data in a forest environment. *Silva Fenn.* 40, 109-126.

NITOSLAWSKI, S. A.; WONG-STEVENS, K. W.; STEENBERG, J. W. N.; 2021. The Digital Forest: Mapping a Decade of Knowledge on Technological Applications for Forest Ecosystems. *Earth's Future* 9(8), e2021EF002123.

NURMINEN, K.; LITKEY, P.; HONKAVAARA, E.; VASTARANTA, M.; HOLOPAINEN, M.; LYYTIKÄINEN-SAARENMAA, P.; KANTOLA, T.; LYYTIKÄINEN, M.; 2015. Automation Aspects for the Georeferencing of Photogrammetric Aerial Image Archives in Forested Scenes. *Remote Sens.* 7, 2: 1565:1593.

PANAGIOTIDIS, D.; ABDOLLAHNEJAD, A.; SUROVÝ, P.; CHITECULO, V.; 2017. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *Int. J. Remote Sens.* 38(8-10), 2392-2410.

PURFÜRST, T.; DE MIGUEL-DÍEZ, F.; BERENDT, F.; ENGLER, B.; CREMER, T.; 2023. Comparison of wood stack volume determination between manual, photo-optical, iPad-LiDAR and handheld LiDAR based measurement methods. *Iforest* 16: 243-252.

UÇAR, Z.; ÇALIŞKAN, E.; EKER, M.; 2024. Evaluating the use of smartphone applications for log stacks volume measurement. *Croatian J. of Forest Eng.* 45(2), 263-276.

VASSILAKI, D.; IOANNIDIS, C.; STAMOS, A.; 2012. Recovery of the geometry of historical aerial photos associating self-calibration with ground control linear features. *Proc. 1st EARSeL Workshop Temporal Anal. Satellite Images.* Mykonos, Greece, 23–25 May 2012, 202-207.

WEST VIRGINIA DIVISION OF FORESTRY; 2021. Air support: West Virginia Division of Forestry's drone program speeds up logging inspections and wildfire recon. *WV*



Division of Forestry.