

## Reconstrucción 3D y estimación de volumen de copa con LiDAR móvil en viñedos

Orbea, D.<sup>a,\*</sup>, Atencia-Payares, Luz K.<sup>b</sup>, Gómez-Del-Campo, M.<sup>b</sup>, Valero, C.<sup>c</sup>, Barrientos, A.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Robótica y Cibernética (ROBCIB), Centro de Automática y Robótica (CAR) UPM-CSIC, C/ José Gutiérrez Abascal, nº2, 28006, Madrid, España.

<sup>b</sup>CEIGRAM. ETSIAAB. Universidad Politécnica de Madrid, 28040, Madrid, España.

<sup>c</sup>LPF.TAGRALIA. ETSIAAB. Universidad Politécnica de Madrid, 28040, Madrid, España.

### Resumen

La integración de sensores de agricultura de precisión en plataformas robóticas se utiliza ampliamente en el campo, lo que permite la estimación precisa de parámetros agronómicos como el volumen del dosel. Actualmente, estas metodologías se basan principalmente en mediciones de campo o en la generación de datos lidar para estimar la altura del dosel y el diámetro de la copa, aproximándolos a formas tridimensionales como elipsoides. Este artículo propone una metodología para la estimación del volumen del dosel utilizando un vehículo terrestre no tripulado (UGV), un brazo robótico y un lidar 2D para la reconstrucción 3D de plantas. La estimación del volumen se realiza mediante un proceso iterativo para determinar el poliedro cóncavo más pequeño que contiene todos los puntos. El sistema está integrado en ROS y se aplica para reconstruir una hilera de 50 plantas en un viñedo ubicado en Yepes, España. Los resultados proporcionan reconstrucciones 3D de alta resolución con un tiempo de adquisición y procesamiento de aproximadamente 46 segundos.

*Palabras clave:* agricultura de precisión, robótica, lidar, reconstrucción 3D.

### 3D reconstruction and canopy volume estimation using mobile LiDAR in vineyard

#### Abstract

The integration of precision agriculture sensors into robotic platforms is widely used in the field, enabling the accurate estimation of agronomic parameters such as canopy volume. Currently, these methodologies are primarily based on field measurements or lidar data generation to estimate canopy height and crown diameter, approximating them to three-dimensional shapes such as ellipsoids. This article proposes a methodology for estimating canopy volume using an unmanned ground vehicle (UGV), a robotic arm, and a 2D lidar for 3D plant reconstruction. Volume estimation is performed through an iterative process to determine the smallest concave polyhedron containing all points. The system is integrated in ROS and applied to reconstruct a row of 50 plants in a vineyard located in Yepes, Spain. The results provide high-resolution 3D reconstructions with an acquisition and processing time of approximately 46 s.

*Keywords:* precision agriculture, robotics, lidar, 3D reconstruction

### 1. Introducción

La adquisición oportuna y fiable de información relacionada a la agricultura es crucial para el establecimiento de políticas y planes asociados a la seguridad alimentaria, reducción de la pobreza y desarrollo sostenible (Liu et al. (2021)). Entre los indicadores agroecológicos básicos que denotan la respuesta de las plantas a condiciones ambientales se encuentran la forma y volumen de copa, siendo relevantes para la identificación de relaciones alométricas, comparación de tasas de crecimiento

en plantas y biomasa de componentes del árbol (Troxel et al. (2013)), así como una buena correlación para estimar el rendimiento de los frutos, al estar correlacionado con la calidad del fruto, rentabilidad económica en injertos, altura de copa y densidad de los árboles (Tumbo et al. (2002)). La estimación convencional de volumen de dosel se realiza a través de medición manual del diámetro de copa, asumiéndolo como un objeto geométrico sólido aproximado a un esferoide, elipsoide, un cono circular o un cilindro (Rautiainen et al. (2007)). Sin embargo, los métodos tradicionales requieren un trabajo

\*Autor para correspondencia: david.orbea@upm.es

intensivo, alto consumo de tiempo, y no son operacionalmente factibles para mediciones a larga escala espacial o temporal (Maimaitijiang et al. (2019)). Como alternativa, la agricultura de precisión incluye métodos de sensado remoto como vehículos aéreos no tripulados (UAV), imágenes satelitales, aviones tripulados o métodos basados en tierra, que permiten el análisis de una gran cantidad de datos ambientales a gran escala (Velusamy et al. (2022)). En estos sistemas, la integración de sensores de percepción ultrasónicos y LiDAR han demostrado ser recursos importantes para mapeo automático de cepas (Verma et al. (2016)), ofreciendo modelos tridimensionales de los árboles y adquiriendo la información del volumen de dosel (Rosell and Sanz (2012)).

Este trabajo ofrece una metodología para la reconstrucción 3D de vides utilizando un LiDAR 2D integrado en un robot móvil, y el procesamiento de la nube de puntos generada para la estimación de volumen de dosel, aplicada a una línea de un viñedo en Yepes, España. Esta herramienta es de código abierto, y parametrizable para distintos casos de uso.

## 2. Trabajos relacionados

Los métodos manuales para estimación de volumen de dosel requieren de extensivas mediciones del tamaño de tronco, altura del árbol, altura desde la base a las copa viva y ancho de copa (Troxel et al. (2013)), donde la adquisición de datos puede tomar aproximadamente diez minutos por cada planta (Thorne et al. (2002)). El cálculo de este volumen se realiza a través de aproximaciones a figuras regulares como cilindros (Troxel et al. (2013)) o elipsoides (Thorne et al. (2002)). Para reducir estos tiempos de adquisición y procesamiento de datos, se aplican métodos de sensado remoto utilizando sensores como LiDAR, imágenes satelitales, imágenes RGB obtenidas desde UAVs o fotogrametría. En el trabajo de (Verma et al. (2016)) se compara el desempeño de dos tecnologías de estimación de volumen para arboles *Eucalyptus*, la primera, sensores LiDAR aéreos, y la segunda, utilizando regresiones entre el diámetro de copa y área proyectada derivada del sistema de sensado remoto WorldView-2. (Colaço et al. (2017)) compara las metodologías de estimación de volumen de cepa procesando nubes de puntos obtenidas con un LiDAR y los métodos manuales cube-fit y cylinder-fit. Los resultados de estimación con LiDAR presentan una alta variabilidad y diferencias significativas con los modelos manuales. Para la obtención de parámetros de un árbol, en (Zhang et al. (2022)) se analiza las variables de altura y densidad de cepa utilizando nubes de puntos obtenidas con un sistema UAV-LiDAR, para obtener los índices de distancia del tronco (DBH), biomasa sobre la superficie (AGB) y volumen de planta, para el monitoreo de características de bosques urbanos. (Balenočić et al. (2017)) evalúa la aplicabilidad de los modelos de altura de dosel (CHMs) para su uso en inventarios forestales; para esto, obtiene mediante fotogrametría el modelo digital de superficie (MDS) y lo resta al modelo digital del terreno (MDT) obtenidos de una base de datos de terreno de territorio nacional.

Existen novedosas propuestas como el índice Vegetation Index Weighted Canopy Volume Model (CVM.VI) para estimación de biomasa, basado en imágenes RGB de UAVs, aplicado a un estudio en Columbia, Missouri, USA, donde los modelos 3D se obtienen a través de la técnica Structure for Motion (SFM)

aplicado junto a técnicas de fotogrametría con las imágenes del UAV (Maimaitijiang et al. (2019)). Este índice combina la información volumétrica y espectral de la cepa, obteniendo un buen ajuste ( $R^2=0.849$ ) para la estimación de biomasa sobre la superficie (AGB) comparado con los métodos tradicionales bidimensionales

## 3. Metodología

La propuesta consiste en la generación de una nube de puntos utilizando el LiDAR 2D realizando dos trayectos con el brazo robótico en los ejes horizontal y vertical. Para esto, se utiliza la posición del LiDAR, detectando que, para cada lectura, si la posición del láser ha variado 5mm, se añade a la nube de puntos, cuyo sistema de coordenadas de referencia es la base del manipulador. La nube de puntos 3D es recortada para seleccionar el dosel, filtrada para eliminar valores atípicos y voxelizada, con el fin de aplicar un proceso iterativo para la generación del poliedro convexo mínimo que contenga todos los puntos, a través del algoritmo Alpha Shape. Finalmente, se guardan el valor de volumen calculado en metros cúbicos en un archivo csv y una imagen de los vértices del poliedro sobre el que se realizó la estimación. Este procedimiento se realiza para los datos de 50 plantas para vistas frontal y posterior en las fechas descritas en la Tabla 1.

Tabla 1: Descripción de los experimentos realizados en campo

Item	Fecha	Cepas reconstruidas	Vista frontal	Vista posterior	Nubes de puntos
1	25/04/2024	50	50	0	50
2	29/05/2024	50	50	50	100
3	05/06/2024	50	50	50	100
4	19/06/2024	50	50	50	100
5	03/07/2024	50	50	50	100
6	17/07/2024	50	50	50	100
7	31/07/2024	50	50	50	100
8	14/08/2024	50	50	50	100
9	28/08/2024	50	50	50	100
10	02/09/2024	50	50	50	100

La adquisición de datos se realizó con un LiDAR Hokuyo URG04-LX colocado en un brazo robótico Unitree Z1 Pro anclado a una base robótica móvil Summit XL. Los experimentos se realizan en Bodegas y Viñedos Casa del Valle, localizado en Yepes, España. El estudio se ha realizado sobre 50 plantas, con la variedad de uva Cabernet Sauvignon, en plantas de 20 años injertadas sobre SO4 (Selección Oppenheim 4), con marco de plantación 2.60x1.10m, en donde se han aplicado cinco tratamientos distintos, mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Clasificación de plantas por tratamiento aplicado

Tratamiento	Plantas	Descripción
T1	1 a 10	50 % deshojado
T2	11 a 20	25 % deshojado
T3	21 a 30	Referencia
T4	31 a 40	50 % despampanado
T5	41 a 50	25 % despampanado

El sistema realizando la adquisición de datos en campo se muestra en la Figura 1.



Figura 1: Adquisición de datos en viñedo Casa del Valle. Yepes, España

### 3.1. Escaneo y reconstrucción de la cepa

La adquisición de los datos del LiDAR 2D se realiza en dos etapas: escaneo vertical y escaneo horizontal. La descripción gráfica de los movimientos realizados por el manipulador se muestra en la Figura 2.

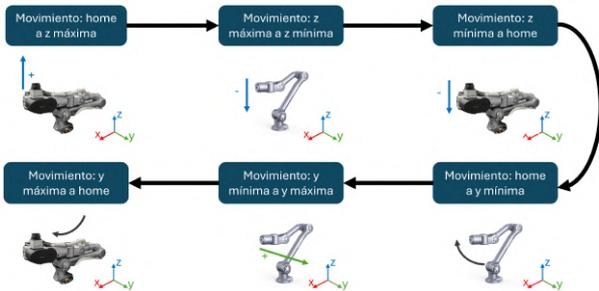


Figura 2: Movimientos de brazo robotico para generación de nube de puntos

El proceso de reconstrucción 3D de la planta para cada vista se muestra gráficamente en la Figura 3.

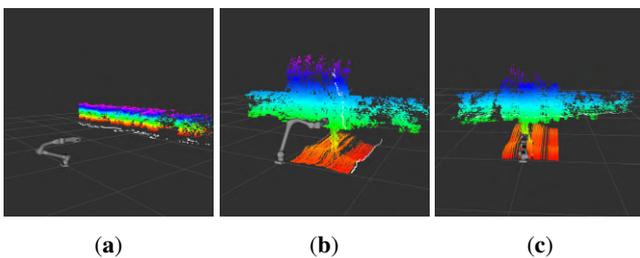


Figura 3: Proceso de reconstrucción 3D de una planta. (a) Escaneo vertical, (b) escaneo horizontal, (c) reconstrucción finalizada

Las nubes de punto obtenidas se filtran y procesan utilizando la librería Open3D. Se recorta una sección delimitada en XYZ por  $[0,0, -0,55, 0,1]$  metros y  $[1,6, 0,55, 2,0]$  metros con respecto a la base del manipulador. Un esquema referencial sobre la posición del sistema con respecto a la planta se muestra en la Figura 4.

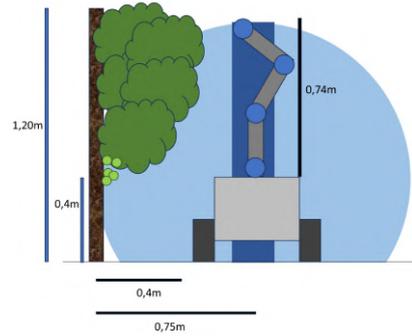


Figura 4: Esquema referencial del sistema con respecto a la planta

Luego, se aplica un proceso de voxelización con un tamaño de voxel de 0.02 metros, y la remoción de valores atípicos. Para el cálculo del volumen se utiliza el algoritmo Alpha Shape, a través de un proceso iterativo de minimización del valor de Alpha para estimar el poliedro cóncavo más pequeño que contenga todos los puntos y, en caso de no encontrar este poliedro, se calcula el volumen con un poliedro convexo. Finalmente, se almacenan los valores de volumen en metros cúbicos en un archivo csv.

El algoritmo 1 muestra el pseudocódigo para este procesamiento. Las siguientes funciones explican los procesos:

- **get\_files**: función para leer los nombres de los archivos pcd (PointCloud) almacenados en carpetas por fecha, nombre de planta, y tipo de vista (frontal o posterior)
- **voxel\_down\_sample**: función de la librería Open3D, se define un tamaño de voxel de 2cm para reducir el tiempo de procesamiento.
- **remove\_outliers**: función de la librería Open3D, se define el número de puntos vecinos y el radio para considerar o no un valor atípico, se define en 5cm.
- **alpha\_shape**: función de la librería Open3D para generación de una malla cóncava que contenga todos los puntos.
- **convex\_hull**: función de la librería Open3D para generación de una malla convexa que contenga todos los puntos. Se utiliza cuando no se encuentra un poliedro concavo.
- **get\_volume**: función para obtener el volumen del poliedro cerrado. Si no encuentra un valor, retorna False.
- **draw\_lines**: función de la librería para generar los vértices y líneas de una malla triangular. Se utiliza para visualización.
- **visualize**: función para generar la perspectiva visual de la nube de puntos y el poliedro que contiene a los puntos. Se utiliza para visualización.
- **write\_image**: función para almacenar la imagen de visualización en formato JPEG.
- **write\_line**: función para escribir en un archivo txt el nombre de la planta y el volumen calculado.

---

**Algorithm 1** Estimación de volumen de dosel

---

```
Input: directorio
Output: volumen.txt
1: //bounding_box = [(0, -0,55, 0,1), (1,6, 0,55, 2)]: vértices
del recorte
2: //alpha_inicial = 0,08
3: //volumen = 0: inicialización
4: lista_pcd = get_files(directorio)
5: for pcd ∈ list_pcd do
6:   pcl = leer(pcd)
7:   pcl_cortada = recortar(pcl, bounding_box)
8:   pcl_voxel = voxel_down_sample(pcl_cortada, t_voxel =
0,02)
9:   pcl_filtrada = remove_outliers(pcl_voxel, nb_points =
6, radius = 0,05)
10:  while volumen = 0 do
11:    if alpha < 0,9 then
12:      malla = alpha_shape(pcl_filtrada, alpha) =
13:    else
14:      malla = convex_hull(pcl_filtrada) =
15:    end if
16:    volumen = get_volume(malla)
17:    if volumen! = False then
18:      break
19:    else
20:      volumen = 0
21:    end if
22:    alpha = alpha + 0,01
23:  end while
24:  poliedro = draw_lines(malla)
25:  imagen = visualize(malla, poliedro)
26:  write_image(imagen)
27:  write_line('volumen.txt', nombre_archivo, volumen)
28: end for
29: return volumen.txt
```

---

### 3.2. Calculo manual del volumen

Para la comparación de las metodologías, el análisis se realiza en base a la evolución temporal del volumen de dosel individual de cada planta, así como para cada tratamiento. El cálculo de volumen medido en campo se realiza a través de la ecuación 1, descrita en trabajos previos de los autores (Nowack et al. (2024)).

$$VC(m^3) = H * W * SV \quad (1)$$

Siendo  $H$  la altura del dosel (m),  $W$  la anchura del dosel (m),  $SV$  el espacio entre plantas (m), y  $VC$  el volumen de dosel.

## 4. Resultados

De forma gráfica, se muestra la evolución temporal del volumen de los poliedros obtenidos de las nubes de puntos en la Figura 5.

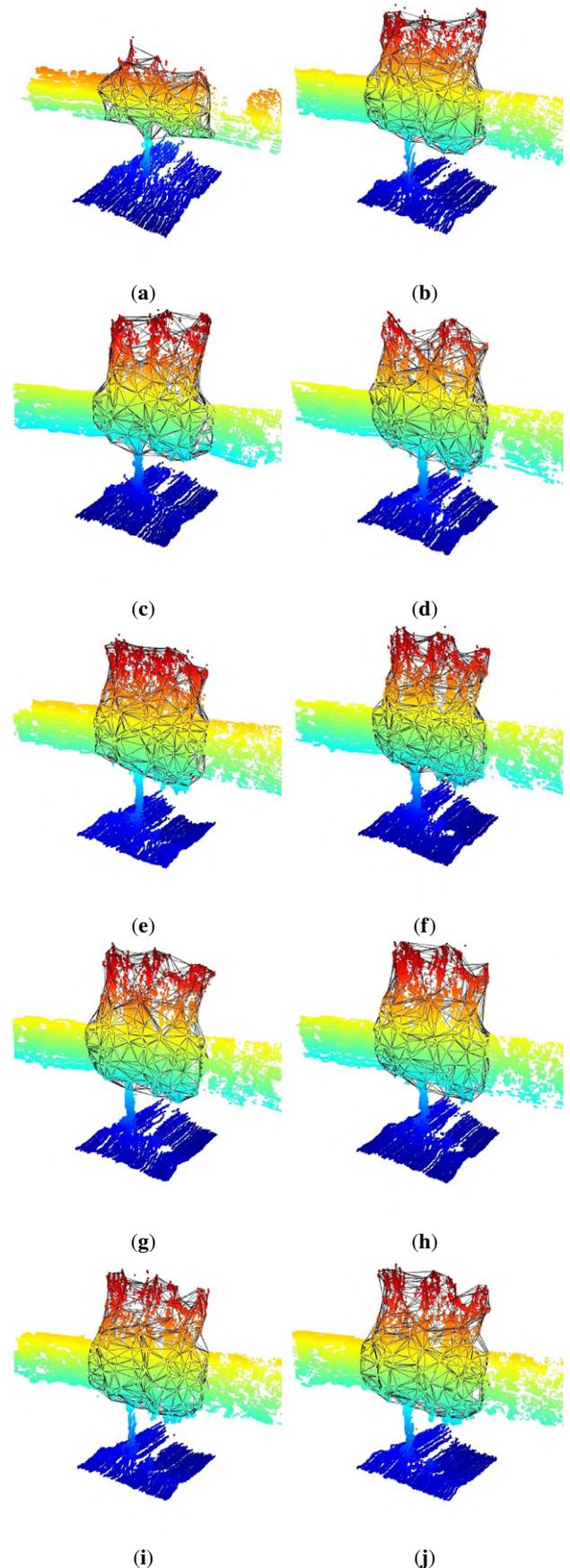
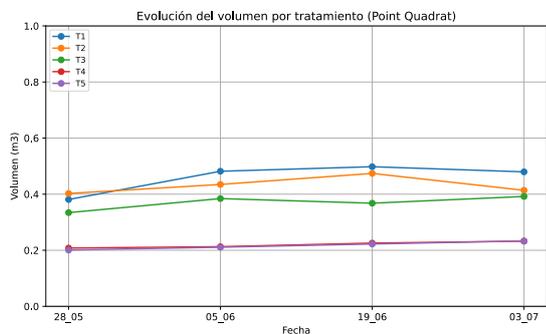
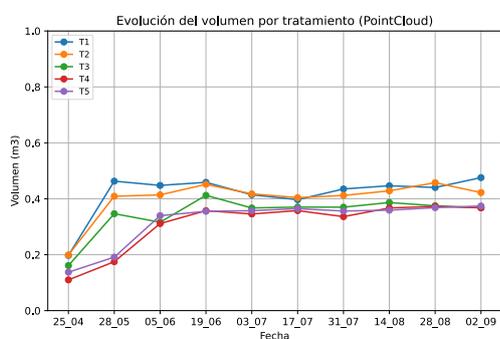


Figura 5: Vista frontal de evolución del volumen de dosel para planta 2, tratamiento T1 en las fechas (a) 25/04, (b) 28/05, (c) 05/06, (d) 19/06, (e) 03/07, (f) 17/07, (g) 31/07, (h) 14/08, (i) 28/08, (j) 02/09

La evolución temporal de los volúmenes medidos en campo y las nubes de puntos se muestran en la Figura 6.



(a)



(b)

Figura 6: Evolución temporal del volumen foliar de las plantas clasificadas según su tratamiento. (a) Calculado a través de mediciones en campo, (b) estimado a través de las nubes de puntos

Se observa un comportamiento creciente del volumen desde el 25/04 hasta el 19/06. A partir del 03/07 se observa una estabilización del volumen en todos los tratamientos, principalmente los tratamientos T3, T4 y T5. Los tratamientos T1 y T2 presentaron un ligero incremento a partir del 31/07, sin embargo estas diferencias no son significativas con respecto a los días 03/07 y 17/07.

Debido a la estabilización del crecimiento vegetativo (paro de crecimiento y desarrollo de hojas) a raíz del aumento de las temperaturas, los cálculos con el método manual se acotaron a la ventana temporal entre el 28 de mayo y 3 de julio.

La gráfica comparativa entre las metodologías aplicadas se muestra en la Figura 7.

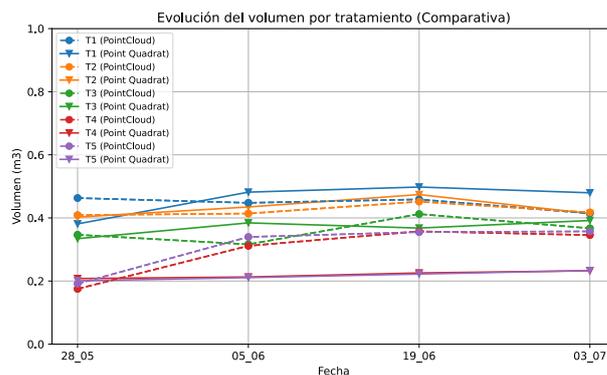


Figura 7: Evolución temporal del volumen foliar clasificado según su tratamiento

Los resultados del cálculo de tiempo de procesamiento de la nube de puntos, Alpha mínimo, Alpha máximo y moda de Alpha clasificado por fechas se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultados del procesamiento de nube de puntos para estimación de volumen de dosel

Fecha	Tiempo medio para estimación volumen de dosel (s)	Alpha mínimo	Apha máximo	Moda Alpha
25-abr	0,75	0,1	0,23	0,14
28-may	0,62	0,09	0,24	0,15
05-jun	0,81	0,09	0,24	0,14
19-jun	0,76	0,09	0,3	0,13
03-jul	0,78	0,09	0,23	0,14
17-jul	0,7	0,09	0,24	0,13
31-jul	0,7	0,09	0,37	0,12
14-ago	0,83	0,1	0,22	0,14
28-ago	0,72	0,09	0,27	0,15
02-sep	0,86	0,1	0,34	0,14

El error cuadrático medio (RMSE) de los datos obtenidos con el método manual y procesamiento de la nube de puntos clasificados por fechas se muestran en la Tabla 4, y clasificados por tratamiento en la Tabla 5

Tabla 4: RMSE entre método propuesto y cálculo manual clasificado por fechas

Fecha	RMSE (m3)
28-may	0,0057
05-jun	0,0128
19-jun	0,0129
03-jul	0,0109

Tabla 5: RMSE entre estimación de volumen con método propuesto y volumen medido en campo clasificado por tratamiento

Tratamiento	RMSE (m3)
T1	0,0034
T2	0,0002
T3	0,0018
T4	0,0102
T5	0,0124

El tiempo de adquisición de datos del LiDAR para la reconstrucción de la nube de puntos es de 45 segundos por planta; el procesamiento y estimación de volumen tiene una media de 0.75 segundos. El valor de Alpha mínimo es de 0.09 y el Alpha máximo es 0.37 para todos los poliedros procesados, con una moda de 0.14.

## 5. Conclusiones

Este trabajo presenta una herramienta de código abierto para la generación de un Canopy Volume Model (CVM) y la estimación de su volumen utilizando un LiDAR 2D ubicado en un robot manipulador móvil. El proceso se valida con varios experimentos en campo realizados en un viñedo en la localidad de Yepes, España, demostrando ser una herramienta útil y robusta para tareas de monitoreo en agricultura de precisión al ofrecer un bajo tiempo en la adquisición de datos y procesamiento de la nube de puntos. Los resultados muestran diferencias significativas con los datos obtenidos a través del método manual, utilizado como Ground Truth; esto se debe a la simplificación del modelo 3D, el cual genera polígonos cóncavos y consiste en muestras limitadas para la estimación del volumen de dosel. Se observa que la principal fuente de error del volumen estimado se encuentra en la evolución temporal de los tratamientos T4 y T5 (tratamientos con menor densidad foliar), que pueden deberse a la presencia de ruido en los datos medidos en campo. La resolución de las nubes de puntos procesadas y filtradas es alta con respecto a otras metodologías propuestas en el estado del arte, permitiendo que la generación del volumen del poliedro tenga una alta precisión. Como trabajos futuros, se propone la integración de un LiDAR 3D en el extremo del brazo robótico, con el fin de reducir el tiempo de generación de la nube de puntos al optimizar y agilizar los movimientos del manipulador.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por Telefonica SA en el marco del proyecto "Smart Agro 5G: sistema de predicción inteligente para viñedos". Los autores agradecen a viñedos "Casa del Valle" (Bodegas Olarra Group) por las instalaciones,

y a Telefonica SA por la colaboración continua con su Departamento de Innovación.

## Referencias

- Balenović, I., Milas, A. S., Marjanović, H., 3 2017. A comparison of stand-level volume estimates from image-based canopy height models of different spatial resolutions. *Remote Sensing* 9 (3).  
DOI: 10.3390/rs9030205
- Colaço, A., Trevisan, R., Molin, J., Rosell-Polo, J., Escolà, A., 2017. Orange tree canopy volume estimation by manual and LiDAR-based methods. *Advances in Animal Biosciences* 8 (2), 477–480.  
DOI: 10.1017/s2040470017001133
- Liu, J., Xiang, J., Jin, Y., Liu, R., Yan, J., Wang, L., 11 2021. Boost precision agriculture with unmanned aerial vehicle remote sensing and edge intelligence: A survey. *Remote Sensing* 13 (21).  
DOI: 10.3390/rs13214387
- Maimaitijiang, M., Sagan, V., Sidike, P., Maimaitiyiming, M., Hartling, S., Peterson, K. T., Maw, M. J., Shakoor, N., Mockler, T., Fritsch, F. B., 5 2019. Vegetation Index Weighted Canopy Volume Model (CVM VI) for soybean biomass estimation from Unmanned Aerial System-based RGB imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 151, 27–41.  
DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.03.003
- Nowack, J. C., Atencia-Payares, L. K., Tarquis, A. M., Gomez-del Campo, M., 5 2024. Application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Sensing for Water Status Estimation in Vineyards under Different Pruning Strategies. *Plants* 13 (10).  
DOI: 10.3390/plants13101350
- Rautiainen, M., Mõttus, M., Stenberg, P., Ervasti, S., 2007. Crown Envelope Shape Measurements and Models. *Silva Fennica* 42, 19–33.  
URL: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf42/sf421019.pdf>
- Rosell, J. R., Sanz, R., 2 2012. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture* 81, 124–141.  
DOI: 10.1016/j.compag.2011.09.007
- Thorne, M. S., Skinner, Q. D., Smith, M. A., Rodgers, J. D., Laycock, W. A., Cerekci, S. A., 5 2002. Evaluation of a technique for measuring canopy volume of shrubs. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives* 55 (3), 235–241.
- Troxel, B., Piana, M., Ashton, M. S., Murphy-Dunning, C., 2013. Relationships between bole and crown size for young urban trees in the northeastern USA. *Urban Forestry and Urban Greening* 12 (2), 144–153.  
DOI: 10.1016/j.ufug.2013.02.006
- Tumbo, S. D., Salyani, M., Whitney, J. D., Wheaton, T. A., Miller, W. M., Salyani, M., 2002. Investigation of Laser and Ultrasonic Ranging Sensor for measurements of Citrus Canopy Volume. *Applied Engineering in Agriculture* 18 (3), 367–372.  
DOI: 10.13031/2013.8587
- Velusamy, P., Rajendran, S., Mahendran, R. K., Naseer, S., Shafiq, M., Choi, J. G., 1 2022. Unmanned aerial vehicles (Uav) in precision agriculture: Applications and challenges. *Energies* 15 (1).  
DOI: 10.3390/en15010217
- Verma, N. K., Lamb, D. W., Reid, N., Wilson, B., 2016. Comparison of canopy volume measurements of scattered eucalypt farm trees derived from high spatial resolution imagery and LiDAR. *Remote Sensing* 8 (5).  
DOI: 10.3390/rs8050388
- Zhang, B., Li, X., Du, H., Zhou, G., Mao, F., Huang, Z., Zhou, L., Xuan, J., Gong, Y., Chen, C., 12 2022. Estimation of Urban Forest Characteristic Parameters Using UAV-Lidar Coupled with Canopy Volume. *Remote Sensing* 14 (24).  
DOI: 10.3390/rs14246375