



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

•

**GESTIÓN AVANZADA DE DATOS
PROCEDENTES DE SENSORES A
BORDO DE DRONES**

PRESENTADA POR:

José Luis Cárdenas Donoso

DIRIGIDA POR:

**Francisco R. Feito Higuera
Juan Manuel Jurado Rodríguez**

Jaén, septiembre de 2023

Abstract

In this thesis, the focus is placed on the three-dimensional (3D) reconstruction of the existing ramifications in tree models from data acquired with sensors, which may be mounted on drones. This research brings a series of scientific contributions, which have been published in high-impact journals related to Computer Graphics and Plant Sciences. Among them, it is worth mentioning the developments aimed at detecting parts of a tree, estimation of partially occluded geometry and the definition of the hierarchy to compose the set of branches that are part of the skeleton of the model.

First of all, an extensive literature review has been carried out in which the most relevant previous works related to 3D modeling of trees from real datasets are compiled. This survey proposes a classification of existing models based on the methodology, input and output data and analyzes the advantages and limitations.

On the other hand, a method for the semantic segmentation of natural scenes has been presented. This method uses geometric and multispectral features to identify and classify different natural entities in the scene, which can be useful for extracting tree trunks and branches.

Finally, an algorithm based on geometric calculations has been proposed for the 3D reconstruction of tree branches using LiDAR (Light Detection and Ranging). This method has been validated using synthetic models, whose different parts (leaves, branches and trunk), 3D branch structure, etc. are known. The results derived from this work are of interest for incorporation into the 3D reconstruction pipeline of the tree structure. In this field there are still open lines of research that are also discussed as future work.

Resumen

En esta tesis se pone el foco en la reconstrucción 3D de las ramificaciones existentes en modelos arbóreos a partir de datos adquiridos con sensores a bordo de drones. El presente trabajo de investigación reúne una serie de contribuciones científicas, publicadas en revistas de alto impacto, en las que se describen los principales resultados. Entre ellos cabe destacar desarrollos propios orientados a la detección de partes de un árbol, estimación de la geometría parcialmente ocluida y la definición de la jerarquía para componer el conjunto de ramas que forman parte del esqueleto del modelo.

En primer lugar, se ha realizado una revisión bibliográfica extensa en la que se recopilan los trabajos más relevantes relacionados con el modelado 3D de árboles a partir de conjuntos de datos reales. Esta recopilación propone una clasificación en base a la metodología, datos de entrada y de salida y se analizan las ventajas y limitaciones de los métodos existentes.

Por otro lado, se ha implementado un método para la segmentación semántica de escenas naturales. Este método utiliza características geométricas y multiespectrales para identificar y clasificar diferentes elementos en la escena, lo cual es útil para identificar el tronco y las ramas de los árboles.

Por último, se ha propuesto un algoritmo basado en cálculos geométricos para la reconstrucción 3D de las ramas de los árboles utilizando LiDAR (Light Detection and Ranging) aéreo. Este método ha sido validado a partir de modelos sintéticos, sobre los que se conocen sus diferentes partes (hojas, ramas y tronco), estructura de las ramas en 3D, etc. Los resultados derivados de este trabajo son de interés para incorporarlos en el flujo de reconstrucción 3D de la estructura arbórea. En este campo aún quedan líneas de investigación abiertas que son discutidas en este documento como trabajo futuro.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer el apoyo recibido por parte de mis directores, compañeros, familia, amigos a lo largo de estos años. Esta tesis ha sido financiada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte mediante la ayuda FPU17/01902.

Índice general

1. Introducción	1
2. Resultados	7
2.1. Publicaciones adicionales	11
3. Conclusiones	15
4. Publicaciones aportadas	23
4.1. Modeling of the 3D Tree Skeleton using Real-World Data: A Survey	23
4.2. Semantic Segmentation of Natural Materials on a Point Cloud Using Spatial and Multispectral Features	25
4.3. Reconstruction of tree branching structures from UAV-LiDAR data	27
5. Documentación en inglés	29
5.1. Introduction	29
5.2. Conclusion	32
A. Software desarrollado	35
A.1. Visión general	35
A.2. Componentes	37
A.3. Comandos en los menús	39
A.4. Aspectos técnicos	44
A.4.1. Listado de dependencias externas	44
A.4.2. Compilación	46

Índice de figuras

- 2.1. Flujo de trabajo de los métodos de reconstrucción 3D de geometría de árboles 8
- 2.2. Resultado de la segmentación de una escena con un árbol utilizando el método descrito. 12
- 2.3. Resultados de la reconstrucción de varios árboles obtenidos mediante el método desarrollado 12

- A.1. Vista general de la aplicación 36
- A.2. Ventana de componentes de la entidad seleccionada 38
- A.3. Ventana de opciones para el cálculo de las normales 40
- A.4. Diálogo de creación de grafo mostrando los diferentes parámetros de cada método de construcción del grafo. 43
- A.5. Diálogo de opciones de clustering 44
- A.6. Parámetros del detector de cilindros 45

Capítulo 1

Introducción

El uso de UAVs (Vehículos Aéreos no Tripulados) y sensores asociados es cada vez más frecuente con la finalidad de avanzar en la monitorización, caracterización y digitalización del mundo real. Entre las principales ventajas clave de estos sistemas de captura cabe destacar su versatilidad, su fácil manejo y la alta calidad de los datos resultantes en términos de resolución espacial, deformación de la imagen, nitidez, etc. Frente a otras alternativas de adquisición de datos, como las avionetas o los satélites, los UAVs proveen una captación más detallada del entorno utilizando sensores ópticos tales como cámaras RGB, multispectrales, termográficas o hiperespectrales y dispositivos activos como los sistemas LiDAR. En resumen, los UAVs ofrecen una toma de datos más detallada del entorno a un coste y tiempo menores en comparación con los métodos tradicionales, lo que permite tomar decisiones más informadas y eficientes en la gestión de recursos y la planificación de actividades, entre otras aplicaciones.

Recientemente, el impacto de estas plataformas en un contexto multidisciplinar es notable. En concreto, durante los últimos años se han llevado a cabo contribuciones relevantes relacionadas con los sectores agrícola y medioambiental [1], [2]. Los drones equipados con cámaras o sensores específicos pueden proporcionar información valiosa sobre el estado de los cultivos, como la salud de las plantas, la detección temprana de enfermedades o plagas y la evaluación de especies singulares en entornos naturales endémicos. En todo esto, la componente tridimensional (3D) tiene un valor significativo,

pues supone un salto cualitativo en el estudio de la evolución de la vegetación del 2D al 3D pudiendo analizar las características morfológicas y espaciales de las estructuras vegetales [3].

Respecto a la posibilidad de captura de los datos mediante drones, el Ministerio de Fomento de España presentó el Plan Estratégico para el desarrollo del sector civil de drones 2018-2021 [4]: “se prevé fortalecer su crecimiento y potenciar la competitividad del sector de drones español”. Como allí se indica, las últimas mejoras del sector están permitiendo abaratar costes y conseguir a la vez dispositivos de tamaño reducido. Las tecnologías que destacan son: avances en materia de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), Big Data e Inteligencia Artificial.

La información espacial y los sistemas informáticos que la soportan son ampliamente conocidos y utilizados en multitud de disciplinas con distintos propósitos [5]. La tecnología actual permite que muchas aplicaciones utilicen este tipo de información y sea accesible para el gran público. Los denominados SIG (Sistemas de Información Geográficos) son los precursores en este ámbito, y muchas de sus capacidades están ya disponibles en dispositivos móviles y de bajo coste. Este avance era impensable hace tan sólo unos años, y sin embargo, se ha alcanzado un alto grado en la visualización e interacción con la información 2D, sobre todo en lo referente al manejo de mapas. No obstante, la información 3D no se puede considerar totalmente extendida en ciertos ámbitos donde se manejan datos de naturaleza espacial, como pueden ser la agricultura de precisión, la construcción, la arqueología, etc. El problema radica en que, aunque se asume que están superados los procesos para la visualización, no ocurre lo mismo con los procesos de gestión integral de esta información. El reto subyacente es que estas herramientas por sí solas no son capaces de realizar una gestión integral de todos los procesos implicados. Tampoco proporcionan una interfaz adaptada ni ayudan a la metodología de trabajo de profesionales o científicos. Un sistema integrado con capacidades espacio-temporales es un paso importante para los procesos de adquisición y de documentación del entorno a registrar. Existen componentes orientados como SIG-3D, especialmente en áreas de visualización de datos. Por ejemplo aplicaciones como el sistema de visualización en Web-3D para infraestructuras del subsuelo [6] o el sistema de visualización híbrido del subsuelo de entornos urbanos [7]. Además de la visualización, existen avances relacionados con la representación de esta

información espacial, citando por ejemplo la representación de terrenos utilizada para [8]. Por otro lado, recientemente se está empezando a manejar y analizar información 3D añadiendo la componente temporal [9].

La reconstrucción de árboles a partir de datos reales es un campo de investigación activo que se sirve de diversas técnicas y tecnologías para obtener modelos 3D precisos de la estructura de los árboles. Estos modelos pueden ser útiles en áreas como la silvicultura, la ecología forestal, la arquitectura del paisaje y la conservación de la biodiversidad [10]–[12]. Existen varias soluciones utilizadas para la reconstrucción de árboles a partir de datos reales, entre las cuales se destacan:

- **Láser Escáner Terrestre (TLS):** esta tecnología integra un escáner láser montado en un trípode o en un dispositivo móvil para capturar una nube de puntos tridimensionales del árbol desde diferentes ubicaciones. Estos puntos representan la superficie externa del árbol y se utilizan para reconstruir su forma tridimensional y su estructura ramificada [13], [14].
- **Fotogrametría:** esta técnica se nutre de imágenes aéreas o terrestres tomadas desde diferentes ángulos y con una superposición entre ellas para crear modelos tridimensionales de los árboles. Al analizar las características visuales y la geometría de las imágenes, se pueden obtener medidas y estimaciones de la estructura del árbol, como la altura, el diámetro y la ramificación [15], [16].
- **Tecnología LiDAR:** el escaneo LiDAR aéreo o terrestre utiliza pulsos láser para medir la distancia entre el sensor y los objetos circundantes, lo que incluye la estructura de los árboles. Estos datos se utilizan para generar un modelo tridimensional del árbol, incluyendo la forma de las ramas y la densidad del dosel [17], [18].
- **Reconstrucción basada en imágenes:** esta técnica utiliza imágenes para estimar la estructura tridimensional del árbol. Se aplican algoritmos de visión por computador o técnicas de aprendizaje automático para identificar y mapear la forma y las ramas del árbol [19], [20].

Es importante destacar que la reconstrucción de árboles a partir de datos reales supone un desafío debido a la complejidad de las estructuras ramificadas y la presencia de hojas y otros elementos ocultos. Sin embargo, los avances en tecnología y algoritmos han mejorado la precisión y la eficiencia de estos procesos [21]. La reconstrucción de árboles a partir de datos reales tiene aplicaciones

importantes en la gestión forestal, la detección de enfermedades, el monitoreo del crecimiento y la salud de los árboles, así como en la simulación de ecosistemas y la visualización de paisajes naturales.

En esta tesis se aborda el desafío implícito en la reconstrucción de estructuras ramificadas de árboles a partir de datos reales que son adquiridos utilizando sensores a bordo de UAVs. Esto consiste en detección, estimación de la geometría y de la jerarquía de las ramas de un árbol. El hecho de manejar datos procedentes de sistemas de captura aéreos en lugar de terrestres facilita, por un lado, una adquisición más eficiente de los datos, pero plantea retos relacionados con el modelado de la geometría correspondiente al tronco y ramas inferiores. El principal inconveniente de esta perspectiva se debe a la oclusión, ya que se obtiene menos información sobre las ramas más bajas.

Los objetivos para resolver el reto planteado son los siguientes:

- Estudio de la bibliografía existente sobre los métodos de modelado 3D de árboles.
- Realización de un estudio sobre los diferentes dispositivos de captura que se pueden incorporar en un UAV.
- Estudio de las técnicas de preprocesamiento y segmentación semántica de los datos capturados para identificar automáticamente la información que puede ser de utilidad.
- Desarrollo de un algoritmo para la generación automática de árboles a partir de información capturada en escenarios del mundo real.

El cumplimiento del conjunto de objetivos presentados tiene como resultado el desarrollo de una serie de métodos que son integrados en un software con una interfaz gráfica para la generación de estructuras arbóreas en 3D, la visualización y la interacción con los modelos obtenidos ¹.

Esta tesis se presenta como un compendio de contribuciones científicas publicadas por el doctorando, las cuales se adjuntan y conforman el cuerpo del documento. La memoria se estructura de la siguiente manera:

- Capítulo 2: Resultados .
- Capítulo 3: Conclusiones.

¹En el Apéndice A se describen las principales características de la solución software desarrollada.

- Capítulo 4: Publicaciones aportadas.
- Capítulo 5: Documentación en inglés.
- Apéndice A: Documentación del software desarrollado.

Capítulo 2

Resultados

En este capítulo se presentan las principales contribuciones del proyecto de tesis doctoral. Estas se pueden resumir en tres puntos principales:

- Revisión exhaustiva del estado del arte en el ámbito de estudio relacionado con la reconstrucción 3D de estructuras arbóreas.
- Desarrollo de un método para la segmentación semántica de entidades naturales en escenarios reales.
- Desarrollo y validación de un método para la reconstrucción 3D automática del esqueleto de un árbol a partir de datos LiDAR aéreo.

Estos puntos anteriores tienen una correspondencia con los artículos que componen el cuerpo de la tesis. A continuación, se exponen de forma concisa los resultados más relevantes de cada uno de los avances de la tesis doctoral.

El primer trabajo da lugar a una revisión exhaustiva de los métodos utilizados para la reconstrucción en 3D de estructuras de ramificación de árboles botánicos. Además, se presenta una taxonomía del modelado de árboles 3D clasificando diferentes procesos de reconstrucción de árboles, tales como modelado procedimental, método geométrico y extracción basada en imágenes. Por último, se incluye un análisis comparativo de métodos recientes de reconstrucción de árboles en 3D y se proponen algunos retos futuros en este campo. Se han identificado y presentado tres categorías de métodos para la reconstrucción de las estructuras ramificadas de árboles: (1) reconstrucción procedural,

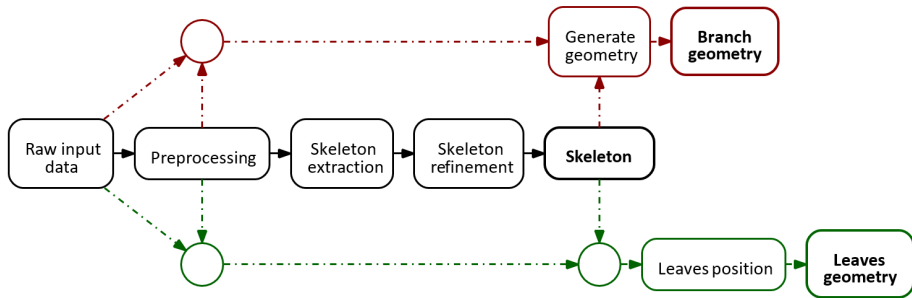


Figura 2.1: Flujo de trabajo de los métodos de reconstrucción 3D de geometría de árboles

(2) métodos de extracción geométrica del esqueleto y (3) algoritmos basados en imágenes. Todos los métodos encontrados en la literatura siguen el flujo principal presentado en la Figura 2.1. A partir de unos datos de entrada en bruto (imágenes y nubes de puntos) se aplican diversas técnicas de preprocesamiento, relacionadas con la extracción de esqueleto y refinado del mismo. A este proceso general, algunos métodos añaden un procesamiento adicional para la generación de geometría de las ramas para su visualización realista. Otros métodos añaden también geometría de las hojas, ya sea calculando las posiciones a partir de los datos de entrada o a partir del esqueleto generado. Se han comparado las ventajas y desventajas de cada categoría y se describen los criterios cruciales para elegir la metodología más adecuada según la aplicación. Las técnicas de generación procedural existentes, aunque requieren de más parámetros, son capaces de modelar estructuras complejas, mientras que los métodos de extracción basados en geometría tienen una mayor dependencia con los datos de entrada. Las técnicas basadas en imágenes son más simples pero menos precisas. En la Tabla 2.1 se muestra una comparativa de las diferentes categorías encontradas. Se puede destacar además, que las investigaciones más recientes se centran en el aprendizaje profundo y generar conjuntos de datos del mundo real para mejorar la apariencia de la geometría reconstruida.

Los métodos de extracción geométrica consisten en identificar y extraer información geométrica relevante de los datos para analizarla e interpretarla. La tecnología LiDAR es ampliamente utilizada para la reconstrucción de las ramas de un árbol a partir de datos tridimensionales. El LiDAR aéreo o terrestre emite

Table 2.1: Comparación por cada categoría de métodos según la sensibilidad a cada una de las características que influyen el modelado 3D de los árboles. Escala de menor (X) a mayor (XXXX).

Categoría	Subcategoría	Criterio		
		Complejidad de ajuste de parámetros	Densidad de follaje soportada	Tolerancia a trozos de ramas ausentes
Modelado procedural	Basados en reglas	XXX	XXX	XX
	Basados en partículas	XXXX	XXXX	XXX
Extracción geométrica	Thinning	X	X	X
	Clustering	XX	X	X
	Árbol de expansión	X	X	XX
Basados en imagen	Imagen única	XX	XXX	X
	Fusión de imágenes	XX	XXX	XX

pulsos láser hacia la superficie del árbol y mide el tiempo que tarda en reflejarse en el sensor. Estos datos de retorno se utilizan para crear una nube de puntos tridimensionales que representa la estructura del árbol.

La reconstrucción de las ramas de un árbol a partir de datos LiDAR puede realizarse mediante diferentes enfoques y algoritmos. Algunas técnicas comunes incluyen:

- Segmentación de modelo: la nube de puntos LiDAR se puede segmentar en diferentes partes correspondientes a las ramas individuales del árbol. Esto se logra mediante algoritmos de segmentación que identifican regiones de puntos cercanos que forman parte de una misma rama. Estos segmentos se utilizan para crear una representación aproximada de la estructura de

las ramas.

- Detección de características: los algoritmos de detección de características ponen el foco en identificar puntos de interés específicos que corresponden a puntos en las ramas del árbol. Estos puntos se seleccionan en base a características como la densidad de puntos, la curvatura o la diferencia de alturas. A partir de estas características, se puede realizar una estimación de la estructura de las ramas.
- Simulación del crecimiento del árbol: algunos enfoques utilizan modelos de crecimiento de ramas para reconstruir la estructura ramificada del árbol. Estos modelos se basan en patrones de crecimiento y ramificación observados en árboles reales y se ajustan a los datos LiDAR para encontrar la mejor correspondencia entre los puntos escaneados y las ramas estimadas.

Es importante tener en cuenta que la reconstrucción de las ramas de un árbol a partir de datos LiDAR puede ser un desafío debido a la presencia de ruido, oclusiones y la complejidad de la estructura ramificada. Además, la densidad de puntos y la resolución del escaneo LiDAR pueden influir en la precisión de la reconstrucción.

Una vez concluido el estudio y revisión sobre los métodos y enfoques existentes en la literatura para la reconstrucción 3D de modelos arbóreos, el siguiente trabajo consiste en un método capaz de segmentar los diferentes materiales existentes en escenas naturales. Para esto, se ha ideado un método que realiza este proceso utilizando características multiespectrales. Dado que resolución de las imágenes obtenidas de la cámara multiespectral es insuficiente para la generación de las nubes de puntos densas requeridas para la mayoría de algoritmos, se ha ideado una solución consistente en una proyección de una nube de puntos en las imágenes multiespectrales, de las cuales se añade la información a cada punto. De esta forma, las nubes de puntos densas obtenidas tras aplicar técnicas de fotogrametría a imágenes de alta resolución, se pueden ampliar con bandas espectrales no visibles. Algunas de estas bandas resultan muy útiles en la identificación de vegetación, como pueden ser la de infrarrojo cercano (de 770 nm a 810 nm de longitud de onda) y la *Red-Edge* (de 730 nm a 740 nm). Tras la ampliación de la información de la nube de puntos, se aplica una técnica de *clustering* jerárquico que separa los materiales presentes en la escena según su similitud. Esto permite eliminar elementos superfluos en la

reconstrucción de árboles (suelo, rocas) y utilizar únicamente aquellas partes útiles para modelar árboles, como pueden ser sus troncos, ramas y hojas (Figura 2.2).

La reconstrucción de nubes de puntos a partir de datos capturados con UAV plantea una serie de problemas debidos a la oclusión que surgen desde el punto de vista aéreo. Para hacer frente a estos retos, se ha presentado un nuevo método de extracción geométrica diseñado específicamente para reconstruir nubes de puntos a partir de escaneos LiDAR aéreos. El método presentado pretende resolver algunos de los problemas de oclusión aprovechando la información geométrica y utilizando una combinación de técnicas ya estudiadas en el primer trabajo. Como resultado, el método desarrollado consigue mejorar la precisión y la eficiencia en la reconstrucción de nubes de puntos a partir de escaneos LiDAR. Algunos de estos resultados se pueden apreciar en la Figura 2.3.

Esta solución presenta una baja dependencia con la calidad de los datos y los resultados obtenidos son óptimos teniendo en cuenta que los modelos de entrada pueden contener huecos como consecuencia de la oclusión durante la captura. Tal y como se muestra en la Figura 2.3, los modelos resultantes han sido validados con conjuntos de datos sintéticos. En resumen, este trabajo contribuye al campo de la Informática Gráfica al abordar un problema abierto como es la reconstrucción de estructuras de ramificación de árboles a partir de varias fuentes de datos.

2.1. Publicaciones adicionales

Junto al desarrollo de los métodos que forman parte del núcleo de esta tesis doctoral, el doctorando ha participado en la elaboración de otras contribuciones de interés relacionadas con la temática de estudio.

- Juan M. Jurado, José L. Cárdenas, Carlos J. Ogayar, Lidia Ortega, and Francisco R. Feito, “Accurate Plant Modeling based on the Real Light Incidence,” presented at the 14th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications, 2019, pp. 360–366.

Resumen: En este artículo, se propone un marco para el modelado preciso de plantas teniendo en cuenta la interacción real entre la planta y la luz a lo largo de un intervalo de tiempo. Para ello se han generado

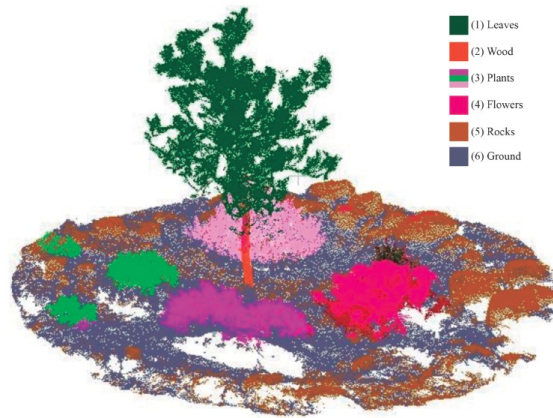


Figura 2.2: Resultado de la segmentación de una escena con un árbol utilizando el método descrito.

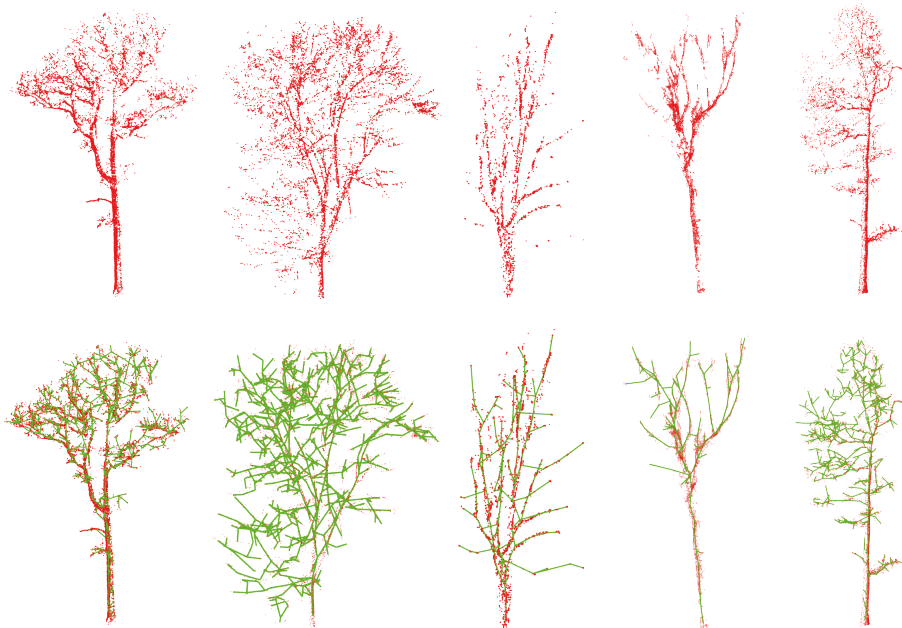


Figura 2.3: Resultados de la reconstrucción de varios árboles obtenidos mediante el método desarrollado

varios modelos de plantas utilizando datos de diferentes fuentes como escaneo LiDAR, cámaras ópticas y sensores multispectrales. A diferencia de enfoques anteriores que se centran principalmente en propósitos de representación realista, el objetivo principal de este método es mejorar la reconstrucción estéreo multivista de estructuras vegetales y la predicción del crecimiento de las plantas existentes de acuerdo con la influencia de la incidencia de la luz real. Los resultados experimentales están orientados a olivos, que están formados por muchas ramas delgadas y un follaje denso. La reconstrucción de plantas es una tarea desafiante debido a la oclusión. El enfoque se basa en el modelado inverso para generar un modelo paramétrico que describe cómo evolucionan las plantas en un intervalo de tiempo considerando el entorno circundante. Se ha utilizado un sensor multispectral para caracterizar modelos de plantas de entrada a partir de valores de reflectancia para cada banda estrecha. Se propone la fusión de datos heterogéneos para lograr un modelado más preciso de la estructura vegetal y la predicción del destino de ramificación.

- José L. Cárdenas, Juan M. Jurado, Lidia Ortega, María I. Ramos, Carlos Enríquez, and Francisco R. Feito, “3D Farm Management Information System for Precision Agriculture,” in INCREaSE 2019, J. Monteiro, A. João Silva, A. Mortal, J. Aníbal, M. Moreira da Silva, M. Oliveira, and N. Sousa, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 778–785.

Resumen: Este artículo presenta los primeros pasos para el desarrollo de un Sistema de Información de Gestión Agrícola (FMIS) 3D, que implica un modelo de simulación de una plantación de olivo virtual basado en la fusión de datos reales de diferentes sensores. Puede usarse para varios propósitos que van desde la mejora del sistema de riego, la estimación del crecimiento de las plantas con modelado de procedimientos hasta la teledetección y aplicaciones de agricultura de precisión. El objetivo principal es la simulación de diversos impactos ambientales, como el uso de pesticidas, mejoras para una óptima distribución de los sistemas de riego, etc. En las etapas iniciales propuestas en este trabajo, el objetivo principal es sentar las bases para los sistemas de riego, para lo cual describimos posibles aplicaciones de las tecnologías existentes.

- María I. Ramos, Juan M. Jurado, José L. Cárdenas, Carlos Enríquez, Lidia Ortega, María L. Martínez, Francisco R. Feito, Juan J. Cubillas,

“High Precision Geomatic Tools for Improving Harvest of Olive Grove in Advance,” in INCREaSE 2019, J. Monteiro, A. João Silva, A. Mortal, J. Anibal, M. Moreira da Silva, M. Oliveira, and N. Sousa, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 691–700.

Resumen: El trabajo presentado aborda un análisis de la sostenibilidad ambiental, y más concretamente, en la agricultura. La agricultura es un sector fundamental en la economía española y más aún en la región de Andalucía, siendo el principal exponente el cultivo del olivar. Sin embargo, a pesar de la mecanización lograda en la mayoría de los procesos de cultivo de este cultivo, así como de los permanentes avances relacionados con la aplicación de productos químicos (fertilizantes, pesticidas, etc.), existe una importante brecha digital entre el agricultor y su finca. En este sentido, se tienen en cuenta aspectos como tener un seguimiento rápido y detallado del estado de la finca como datos de humedad, estado sanitario de cada planta, erosión del suelo, datos de producción prevista de cada planta, la evolución que puede tener en función del clima, parámetros a corto o largo plazo, el tipo de labranza, etc. Todos estos son factores a los que las herramientas Geomáticas actuales pueden dar cobertura con precisión adecuada. Así, el desarrollo de tecnologías que permitan el seguimiento detallado en el tiempo de un olivar, tanto a nivel de parcela como de olivo individual, supone un avance muy importante en la práctica agrícola. El objetivo de este trabajo es analizar cómo las herramientas geomáticas pueden ayudar a abordar estos elementos. En este sentido análisis de una serie de parámetros físicos y ambientales que deben integrarse en una base de datos geolocalizada. Entonces, el principal avance de este trabajo es analizar el comportamiento de la finca con anticipación mediante el uso de minería de datos espaciales.

Capítulo 3

Conclusiones

En este capítulo se presenta una visión global de las conclusiones y se proponen líneas de trabajo futuro. El modelado de árboles es una tarea que supone un desafío y que se ha abordado mediante la aplicación de una amplia variedad de métodos. Las plataformas de captura versátiles como los UAVs y sistemas de adquisición de alta resolución espacial nos permiten obtener datos del mundo real y monitorizar espacios naturales complejos desde múltiples puntos de vista. La captura de imágenes de alta resolución y datos escaneados en 3D de los entornos naturales es cada vez más accesible. En consecuencia, se pueden adquirir grandes conjuntos de datos, sobre los que posteriormente aplicar técnicas para la reducción y limpieza de los mismos. En este trabajo se han expuesto aquellos métodos de reconstrucción de árboles encontrados en la literatura científica. Además, se han presentado dos métodos relacionados con la temática de reconstrucción del esqueleto de árboles. El primero de ellos está basado en geometría para la reconstrucción de árboles que maneja partes de ramas ocluidas a partir de LiDAR aéreo validando los resultados usando el esqueleto real del árbol. El segundo método propone una segmentación de los troncos y ramas de los árboles para hacer un preprocesado que pueda servir como datos de entrada para los algoritmos anteriores.

La evaluación visual de los resultados de la reconstrucción puede ser suficiente cuando la reconstrucción de árboles tiene fines decorativos, como en entornos virtuales, videojuegos y simuladores. Hay una reducida variedad de métodos

que proponen validaciones cuantitativas basadas en medidas de similitud. En el trabajo de reconstrucción presentado en esta tesis se ha incluido un método para evaluar la similitud entre esqueletos de árboles que puede resultar de ayuda cuando se dispone del esqueleto real del árbol. La ventaja de validar con árboles generados procedualmente a través de alguna de las técnicas vistas (L-systems, autómatas celulares) es la de poder comparar el resultado del esqueleto reconstruido con aquel que se ha utilizado para generar el árbol. Una posible tarea futura es la comparación cuantitativa de la reconstrucción del árbol usando diferentes métodos para así ver cómo pueden comportarse en diferentes escenarios reales.

El algoritmo presentado para la reconstrucción basada en geometría se puede aplicar a conjuntos de datos procedentes de escaneos aéreos con oclusión notable. El método de reconstrucción ha sido evaluado utilizando un conjunto de datos de nube de puntos LiDAR sintético, obtenido mediante la realización de un escaneo virtual sobre árboles sin follaje generados procedualmente. Además, la reconstrucción se evalúa a través de una métrica que significativamente simplifica los enfoques anteriores, mientras que produce resultados similares. En consecuencia, se ha demostrado que el método es capaz de manejar segmentos de rama que faltan, en comparación con trabajos anteriores que resuelven este inconveniente manualmente. Además, el algoritmo es únicamente parametrizado por dos atributos: el radio de la búsqueda en las proximidades de cada punto de la nube y la longitud del segmento para la agrupación de distancia. En trabajos futuros, se podría extender el método propuesto a múltiples árboles en la misma nube de puntos, resolviendo así este problema en paralelo para múltiples instancias detectadas a través de la agrupación jerárquica. Finalmente, el método puede ser mejorado con algunas técnicas de postprocesado con el objetivo de eliminar ramas falsas.

Un avance interesante es el uso de técnicas de aprendizaje profundo (*Deep Learning*) en algunos pasos del proceso de extracción del esqueleto del árbol. En este ámbito, se han desarrollado métodos recientes que lo utilizan para inferir partes ocluidas de árboles [22], la reconstrucción de conjuntos de reglas en L-systems 2D [23], para obtener modelos 3D de árboles a partir de una imagen [19], [24] o a partir de nubes de puntos [25]. En esta investigación se ha optado por el desarrollo de métodos basados en imágenes debido a la alta disponibilidad de grandes conjuntos de imágenes donde aparecen una amplia

variedad de especies de árboles. Las ventajas del uso de métodos de aprendizaje automático permiten trabajar con datos incompletos. En consecuencia, los algoritmos actuales podrían ser capaces de procesar geometría ocluida, infiriendo las ramas que faltan. Además, la precisión de los algoritmos existentes continúa mejorando, haciéndolos más confiables en condiciones ruidosas. Esta es una línea que está abierta y en la que se prevén futuros desarrollos de interés a corto plazo.

Referencias

- [1] L. Pádua, T. Adão, A. Sousa, E. Peres, and J. J. Sousa, “Individual Grapevine Analysis in a Multi-Temporal Context Using UAV-Based Multi-Sensor Imagery,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/rs12010139.
- [2] N. Guimarães, L. Pádua, P. Marques, N. Silva, E. Peres, and J. J. Sousa, “Forestry Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: A Review Focusing on the Data, Processing and Potentialities,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2020, doi: 10.3390/rs12061046.
- [3] J. M. Jurado, L. Ortega, J. J. Cubillas, and F. R. Feito, “Multispectral Mapping on 3D Models and Multi-Temporal Monitoring for Individual Characterization of Olive Trees,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 7, Art. no. 7, Jan. 2020, doi: 10.3390/rs12071106.
- [4] Ministerio de Fomento, “Plan Estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021,” 2018.
- [5] J. M. Jurado, A. López, L. Pádua, and J. J. Sousa, “Remote sensing image fusion on 3D scenarios: A review of applications for agriculture and forestry,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 112, p. 102856, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jag.2022.102856.
- [6] J. M. Jurado, A. Graciano, L. Ortega, and F. R. Feito, “Web-based GIS application for real-time interaction of underground infrastructure through virtual reality,” in *Proceedings of the 25th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, in SIGSPATIAL '17. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Nov. 2017, pp. 1–4. doi: 10.1145/3139958.3140004.

- [7] A. Graciano, A. J. Rueda, L. Ortega, and F. R. Feito, “Towards a hybrid framework for the visualization and analysis of 3D spatial data,” in *Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL Workshop on Smart Cities and Urban Analytics*, in UrbanGIS’17. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Nov. 2017, pp. 1–8. doi: 10.1145/3152178.3152183.
- [8] A. Graciano, A. J. Rueda, and F. R. Feito, “A formal framework for the representation of stack-based terrains,” *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 32, no. 10, pp. 1999–2022, Oct. 2018, doi: 10.1080/13658816.2018.1475671.
- [9] J. Dong, J. G. Burnham, B. Boots, G. Rains, and F. Dellaert, “4D crop monitoring: Spatio-temporal reconstruction for agriculture,” in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2017, pp. 3878–3885. doi: 10.1109/ICRA.2017.7989447.
- [10] J. Roberts, S. Tesfamichael, M. Gebreslasie, J. van Aardt, and F. Ahmed, “Forest structural assessment using remote sensing technologies: an overview of the current state of the art,” *Southern Hemisphere Forestry Journal*, vol. 69, no. 3, pp. 183–203, Dec. 2007, doi: 10.2989/SHFJ.2007.69.3.8.358.
- [11] D. Li, D. Hu, X. Tan, and Y. Ding, “Dynamic simulation of large-scale forest scene for wind field,” in *Proceedings - 2016 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IHMSC 2016*, vol. 1. 2016, pp. 429–432. doi: 10.1109/IHMSC.2016.48.
- [12] K. Liu, X. Shen, L. Cao, G. Wang, and F. Cao, “Estimating forest structural attributes using UAV-LiDAR data in Ginkgo plantations,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 146, pp. 465–482, 2018, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2018.11.001.
- [13] E. Bournez, T. Landes, M. Saudreau, P. Kastendeuch, and G. Najjar, “From TLS point clouds to 3D models of trees: A comparison of existing algorithms for 3D tree reconstruction,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 42. 2017, pp. 113–120. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-113-2017.

- [14] R. Li, G. Bu, and P. Wang, “An Automatic Tree Skeleton Extracting Method Based on Point Cloud of Terrestrial Laser Scanner,” *International Journal of Optics*, vol. 2017, pp. undefined–undefined, 2017, doi: 10.1155/2017/5408503.
- [15] P. Tan, G. Zeng, J. Wang, S. B. Kang, and L. Quan, “Image-based tree modeling,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 26, no. 3, pp. 87–es, Jul. 2007, doi: 10.1145/1276377.1276486.
- [16] L. Fu, J. Liu, J. Zhou, M. Zhang, and Y. Lin, “Tree Skeletonization for Raw Point Cloud Exploiting Cylindrical Shape Prior,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 27327–27341, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2971549.
- [17] Y. Gong, Y. Yang, and X. Yang, “Three-Dimensional reconstruction of the virtual plant branching structure based on terrestrial LiDAR technologies and L-system,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 42. 2018, pp. 403–410. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-403-2018.
- [18] H. Huang, L. Tang, and C. Chen, “A 3D individual tree modeling technique based on terrestrial LiDAR point cloud data,” in *ICSDM 2015 - Proceedings 2015 2nd IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services*. 2015, pp. 152–156. doi: 10.1109/ICSDM.2015.7298043.
- [19] B. Li *et al.*, “Learning to reconstruct botanical trees from single images,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 40, no. 6, pp. 231:1–231:15, Dec. 2021, doi: 10.1145/3478513.3480525.
- [20] J. Guénard, G. Morin, F. Boudon, and V. Charvillat, “Realistic plant modeling from images based on analysis-by-synthesis,” *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 8177 LNCS, pp. 213–229, 2014, doi: 10.1007/978-3-642-54382-1_12.
- [21] J. Guo, S. Xu, D. Yan, Z. Cheng, M. Jaeger, and X. Zhang, “Realistic Procedural Plant Modeling from Multiple View Images,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 26, no. 2, pp. 1372–1384, Feb. 2020, doi: 10.1109/TVCG.2018.2869784.

- [22] T. Isokane, F. Okura, A. Ide, Y. Matsushita, and Y. Yagi, “Probabilistic Plant Modeling via Multi-view Image-to-Image Translation,” in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, Jun. 2018, pp. 2906–2915. doi: 10.1109/CVPR.2018.00307.
- [23] J. Guo *et al.*, “Inverse Procedural Modeling of Branching Structures by Inferring L-Systems,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 39, no. 5, pp. 155:1–155:13, Jun. 2020, doi: 10.1145/3394105.
- [24] Z. Liu, K. Wu, J. Guo, Y. Wang, O. Deussen, and Z. Cheng, “Single Image Tree Reconstruction via Adversarial Network,” *Graphical Models*, vol. 117, p. 101115, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.gmod.2021.101115.
- [25] Y. Liu, J. Guo, B. Benes, O. Deussen, X. Zhang, and H. Huang, “TreePartNet: neural decomposition of point clouds for 3D tree reconstruction,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 40, no. 6, pp. 232:1–232:16, Dec. 2021, doi: 10.1145/3478513.3480486.

Capítulo 4

Publicaciones aportadas

4.1. Modeling of the 3D Tree Skeleton using Real-World Data: A Survey

- **Estado:** Aceptado.
- **Revista:** IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics.
- **ISSN:** 1941-0506.
- **DOI:** 10.1109/TVCG.2022.3193018
- **Factor de impacto:** (JCR 2022) 5.2.
- **Cuartiles por área de conocimiento**
 - Computer Science, Software Engineering: Q1 (13/110).

Resumen

El modelado de árboles se ha estudiado ampliamente en Informática Gráfica. Los recientes avances en el desarrollo de sensores de alta resolución y técnicas de procesamiento de datos son extremadamente útiles para recopilar conjuntos de datos 3D de árboles del mundo real y generar las estructuras de las ramas cada vez más plausibles. El rápido desarrollo de plataformas de adquisición de datos versátiles nos permite capturar imágenes desde diferentes vistas y datos escaneados que pueden utilizarse para el modelado guiado de árboles en 3D. En este artículo, realizamos una revisión exhaustiva del estado del arte de los métodos para el modelado 3D de la geometría de árboles tomando datos de

entrada de escenarios reales. Se ha propuesto una amplia gama de estudios siguiendo diferentes enfoques. Para resumir las contribuciones más relevantes, éstas se han clasificado en tres categorías: (1) reconstrucción procedural, (2) extracción basada en la geometría y (3) modelado basado en imágenes. Además, describimos otros enfoques destinados a mejorar el proceso de reconstrucción añadiendo características adicionales para lograr una apariencia realista de los modelos de árboles. Así, proporcionamos una visión general de los procedimientos más eficaces para ayudar a los investigadores en el modelado fotorrealista de árboles en geometría y apariencia. El artículo concluye con observaciones y tendencias sobre las oportunidades de investigación prometedoras en el modelado 3D de árboles utilizando datos del mundo real.

4.2. Semantic Segmentation of Natural Materials on a Point Cloud Using Spatial and Multispectral Features

- **Estado:** Publicado.
- **Revista:** Sensors.
- **ISSN:** 1424-8220
- **DOI:** 10.3390/s20082244
- **Factor de impacto:** (JCR 2020) 3.576
- **Cuartiles por área de conocimiento**
 - Chemistry, Analytical: Q2 (26/87)
 - Engineering, Electrical & Electronic: Q2 (82/273)
 - Instruments & Instrumentation: Q1 (14/64)

Resumen

La caracterización de espacios naturales mediante la observación precisa de sus propiedades materiales es muy demandada en teledetección y visión artificial. La producción de nuevos sensores permite la recopilación de datos heterogéneos para obtener un conocimiento completo de las entidades vivas y no vivas del ecosistema. La alta resolución de las cámaras RGB se utiliza con frecuencia para la reconstrucción geométrica de muchos tipos de entornos. Sin embargo, la comprensión de los espacios naturales sigue siendo un desafío. La segmentación automática de materiales homogéneos en la naturaleza es una tarea compleja porque hay muchas estructuras superpuestas y una iluminación indirecta, por lo que el reconocimiento de objetos es difícil. En este artículo, se propone un método basado en la fusión de características espaciales y multispectrales para la clasificación no supervisada de materiales naturales en una nube de puntos. Una cámara de alta resolución y un sensor multispectral están montados en un equipo de cámara personalizado para capturar simultáneamente imágenes RGB y multispectrales. El método se prueba en un escenario controlado, donde coexisten diferentes objetos naturales. Inicialmente, las imágenes RGB de entrada se procesan para generar una nube de puntos mediante la aplicación del algoritmo *Structure from Motion* (SfM). A continuación, las imágenes multispectrales se mapean en el modelo tridimensional para caracterizar la geometría con la reflectancia capturada de cuatro bandas estrechas (verde, rojo, borde rojo e

infrarrojo cercano). La reflectancia, el color visible y el componente espacial se combinan para extraer diferencias clave entre todos los materiales existentes. Para este propósito, se aplica un análisis de *clustering* jerárquico para agrupar la nube de puntos e identificar el patrón de características para cada material. Como resultado, el tronco del árbol, las hojas, diferentes especies de plantas bajas, el suelo y las rocas se pueden reconocer claramente en la escena. Estos resultados demuestran la factibilidad de realizar una segmentación semántica al considerar características multiespectrales y espaciales con un número desconocido de grupos a detectar en la nube de puntos. Además, la solución planteada se compara con otro método basado en el aprendizaje supervisado para probar la mejora del enfoque propuesto.

4.3. Reconstruction of tree branching structures from UAV-LiDAR data

- **Estado:** Publicado.
- **Revista:** Frontiers in Environmental Science.
- **ISSN:** 2296-665X
- **DOI:** 10.3389/fenvs.2022.960083
- **Factor de impacto:** (JCR 2022) 4.6.
- **Cuartiles por área de conocimiento**
 - Environmental Sciences: Q2 (82/279).

Resumen

La reconstrucción de las estructuras ramificadas de los árboles es un problema presente en Informática Gráfica que se ha estudiado con diversas fuentes de datos, desde nubes de puntos de fotogrametría hasta tecnologías láser terrestres y aéreas. Sin embargo, la mayoría de las fuentes de datos presentan errores de adquisición que dificultan la reconstrucción. Entre ellos, el principal reto es la oclusión parcial o completa de segmentos de ramificación, lo que da lugar a componentes desconectados si la reconstrucción se resuelve mediante enfoques basados en grafos. En este trabajo, se propone un método híbrido basado en la búsqueda por radios y en el árbol generador minimal para la reconstrucción de ramas de árboles mediante el tratamiento de la oclusión y de las ramas desconectadas. Además, se simplifica el trabajo previo de evaluación de la similitud entre el esqueleto original y los reconstruidos. Utilizando este enfoque, este método demuestra ser más eficaz que los métodos de referencia, en lo que respecta a los resultados de reconstrucción y al tiempo de respuesta. El método produce mejores resultados en todo el intervalo de radios explorados, aunque la mejora es especialmente significativa en la distancia de muestreo del suelo. En términos de latencia, se consigue un rendimiento sobresaliente en comparación con el método de referencia.

Capítulo 5

Documentación en inglés

5.1. Introduction

The use of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) and associated sensors has indeed become increasingly common for a variety of applications due to their numerous advantages related to the monitoring, characterization and digitization of the real world. Among the main advantages of these capture systems are their versatility, easy handling and high data quality in terms of spatial resolution, image deformation, sharpness, etc. Compared to other data acquisition alternatives, such as airborne or satellite, UAVs provide a more detailed capture of the environment using optical sensors such as RGB, multispectral, thermographic or hyperspectral cameras and active devices such as LiDAR systems. In summary, UAVs offer a more detailed capture of the environment at a lower cost and in less time than traditional methods, enabling more informed and efficient decisions to be made in resource management and activity planning, among other applications.

Recently, the impact of UAV sensors in a multidisciplinary context is remarkable. In particular, in recent years there have been relevant contributions related to the agricultural and environmental sectors [1], [2]. Drones equipped with cameras or specific sensors can provide valuable information on the state of crops, such as plant health, early detection of diseases or pests, and the assessment of species in endemic natural environments. In all this, the three-dimensional (3D) component

has a significant value, as it represents a qualitative leap in the study of the evolution of vegetation from 2D to 3D, being able to analyze the morphological and spatial characteristics of plant structures [3].

According to the possibility of capturing data using drones, the Spanish Ministry of Public Works presented the Strategic Plan for the development of the civil drone sector 2018-2021 [4], where it is planned to strengthen its growth and enhance its competitiveness in Spain. As mentioned in this document, the latest improvements in the sector are making it possible to reduce costs, while achieving smaller devices at the same time. The technologies that stand out are advances in IoT (Internet of Things), Big Data, Artificial Intelligence and machine learning.

Spatial information and the computer systems that support these mentioned technologies are widely known and used in a multitude of disciplines for different purposes [5]. Current advancements allow many applications to use this type of information and make it accessible to the general public. The so-called GIS (Geographic Information Systems) are the precursors in this area, and many of their capabilities are already available on mobile and low-cost devices. This advance was unthinkable just a few years ago, and yet, a high degree of development has been achieved in the visualization and interaction with 2D information, especially related to map management. 3D information, however, cannot be considered fully extended in certain areas where spatial data are handled, such as precision agriculture, construction, archaeology, etc. Although it is assumed that the processes for visualization are surpassed, the problem is that it does not happen the same with the comprehensive management processes of multisensorial information. The underlying problem is that these tools alone are not capable of performing a comprehensive management of all the processes involved. Neither do they provide an a friendly and easy-to-use interface, nor do they support the working methodology of professionals or scientists. An integrated system with spatio-temporal capabilities is an important step for the acquisition and documentation processes of the environment to be recorded. In this context, there are some solutions, such as GIS-3D, especially in areas of data visualization and analysis. For instance, applications such as the Web-3D visualization system of underground infrastructures [6] or the hybrid underground visualization system for urban environments [7]. In addition to visualization, there have been advances related to the representation of this

spatial information, citing for example the representation of terrain used by [8]. On the other hand, recently some studies started to manage and analyze 3D information by adding a temporal component [9].

Tree reconstruction from real data is an active field of research that uses various techniques and technologies to obtain accurate three-dimensional models of the tree structure. These models can be useful in areas such as forestry, ecology, landscape architecture and biodiversity conservation [10]–[12]. There are several techniques used to reconstruct trees from real data, among which are:

- **Terrestrial Laser Scanner (TLS):** This technology integrates a laser scanner mounted on a tripod or mobile device to capture a three-dimensional point cloud of the tree from different locations. These points represent the external surface of the tree and are used to reconstruct its three-dimensional shape and branching structure [13], [14].
- **Photogrammetry:** This technique uses aerial or terrestrial images taken from different angles with overlapping between them to create three-dimensional models of trees. The analysis of visual characteristics and geometry of the images allows for measurements and estimation of the tree structure, such as height, diameter, and branching [15], [16].
- **LiDAR Technology:** Aerial or ground-based LiDAR scanning uses laser pulses to measure the distance between the sensor and surrounding objects, such as the tree structure. This data is used to generate a 3D model of the tree, including branch shape and canopy density [17], [18].
- **Image-based reconstruction:** This technique uses images to estimate the 3D structure of the tree. Computer vision algorithms or machine learning techniques are applied on images to identify and map the shape and branches of the tree [19], [20].

Reconstructing trees from real data is challenging due to the complexity of branching structures and the presence of leaves and other hidden elements. However, advances in technology and algorithms have improved the accuracy and efficiency of these processes [21]. Tree generation leads to demanding applications in forest management, disease detection, monitoring tree growth and health, as well as ecosystem simulation and visualization of natural landscapes.

This thesis addresses the challenge of modeling the structure of tree branches

from real data that are acquired using sensors on board UAVs. This consists of detection, estimation of the geometry and hierarchy of the branches of a tree. Handling data from aerial rather than terrestrial capture systems facilitates, on the one hand, more efficient data acquisition, but poses challenges related to the modeling of the geometry corresponding to the trunk and lower branches. The main drawback of this perspective is due to occlusion, since less information is obtained about the lower branches.

The objectives for solving the stated problem are as follows:

- Review of the existing literature on 3D tree modeling methods.
- Study on the different capture devices that can be incorporated into a UAV.
- Study of preprocessing techniques and semantic segmentation of the captured data to automatically identify the crucial data for tree modeling.
- Development of a new algorithm suitable for information captured from the air taking into account aspects related to efficiency and spatial resolution.

The achievement of the set of objectives presented above leads to the development of a series of methods that are integrated in a software with a graphical interface for the generation of 3D tree structures, visualization and interaction with the models obtained.

This thesis is presented as a compendium of scientific contributions published by the doctoral student, which constitute the body of the document. The doctoral dissertation is structured as follows:

- Chapter 2: Results.
- Chapter 3: Conclusions.
- Chapter 4: Contributed publications.
- Chapter 5: Documentation in English.
- Appendix A: Documentation of the developed software.

5.2. Conclusion

This chapter summarizes the findings and insights of the doctoral thesis and proposes open lines as future work. Tree modeling is a challenging task that has been addressed by applying a wide variety of methods. Versatile capture platforms such as UAVs and high spatial resolution acquisition systems allow

us to obtain real-world data and monitor complex natural spaces from multiple points of view. Capturing high-resolution images and 3D scanned data of natural environments is becoming more accessible. Consequently, it is possible to acquire large data sets on which some techniques can be applied in order to reduce and clean them. In this research, a compilation of existing method for tree modeling has been provided. In addition, two methods related to the topic of tree skeleton reconstruction have been presented. The first one is based on geometry for the reconstruction of trees that handles parts of occluded branches from aerial LiDAR, validating the results using the real skeleton of the tree. The other one can be used for the segmentation of tree trunks and branches to perform a pre-processing suitable as an input for the previous algorithms.

Visual evaluation of reconstruction results may be enough when tree reconstruction is for decorative purposes, such as in virtual environments, video games, and simulators. There are only a few methods that propose quantitative validations based on similarity measures. According to the proposed method for tree modeling, which has been developed through this thesis, a method has been included to evaluate the similarity between tree skeletons that can be helpful when the real skeleton of the tree is available. The main advantage of using synthetic trees that are procedurally generated through one of the techniques seen (L-systems, cellular automata) is that the skeleton used for the generation can be compared to the one reconstructed from the data. A possible future task is the quantitative comparison of the tree reconstruction using different methods, in order to see how they behave in different real scenarios.

The presented algorithm for geometry-based reconstruction can be applied to data sets from aerial scans with a high occlusion. This method has been evaluated using a synthetic LiDAR point cloud dataset, obtained by performing a virtual scan on procedurally generated bare trees. Furthermore, the reconstruction is evaluated through a metric that significantly simplifies previous approaches, while producing similar results. Consequently, we have shown that our method is capable of handling missing branch segments, compared to previous works that solve this drawback manually. Furthermore, our algorithm is only parameterized by two attributes: the radius of the search in the vicinity of each cloud point and the length of the segment for distance pooling. In future work, the proposed method could be extended to modeling multiple trees in the same point cloud, thus solving this problem in parallel for multiple instances detected through

hierarchical clustering. Furthermore, the method can be improved with some of the post-processing techniques studied to avoid the generation of wrong branches.

An interesting advance in the field of tree reconstruction is the use of Deep Learning techniques in some steps of the skeleton extraction process. In this area, there have been recent methods that use Deep Learning to infer occluded parts of trees [22], the reconstruction of rule sets in 2D L-systems [23], the generation of 3D models of trees from an image [19], [24] or from point clouds [25]. In this research topic, the development of image-based methods has been chosen due to the high availability of large sets of images where many tree species are collected. The advantages of using machine learning methods enables working with incomplete data. Consequently, current algorithms could better process occluded geometry, by minimizing missing branches. In addition, the accuracy of existing algorithms continues to improve, making them more reliable in noisy conditions. This is a research line that remains open and in which considerable progress is being made.

Apéndice A

Software desarrollado

En este apéndice se presenta la documentación del software desarrollado como complemento a esta tesis doctoral. En la aplicación se encuentran agrupados todos los algoritmos y procesos implementados. Actualmente se puede acceder al código fuente del software en la siguiente URL: <https://github.com/joseluiscd/Groot>.

A.1. Visión general

La principal función de esta aplicación es la visualización de los datos de entrada (principalmente nubes de puntos) y los resultados de cada paso de los algoritmos que se pueden aplicar. A través de su interfaz gráfica se pueden ejecutar los algoritmos implementados, permitiendo modificar los parámetros necesarios para realizar experimentos. Asimismo, se puede utilizar su interfaz con el lenguaje de programación Python para ejecutar *scripts*. Gracias a estos, se pueden hacer procesamiento por lotes, aplicando un conjunto de algoritmos a diferentes datos de entrada y agregar pequeñas utilidades al programa escritas en este lenguaje. Otro aspecto a destacar es que la aplicación es multi-plataforma, habiendo sido probada en los sistemas operativos Windows y GNU/Linux.

En la figura A.1 se encuentra una captura de pantalla en la que se muestra una visión general de la aplicación. La parte central de la aplicación es ocupada por una ventana para la visualización 3D (*3D View*), en la cual se puede interactuar

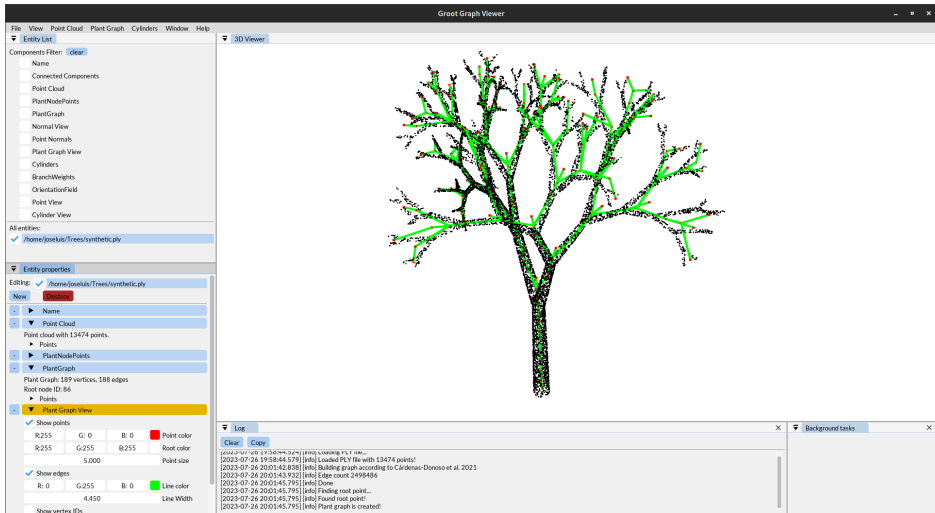


Figura A.1: Vista general de la aplicación

con la cámara.

Para representar los diferentes objetos con los que se puede trabajar en la aplicación existen los conceptos de entidad y componente. Cada objeto es una entidad, lo que quiere decir que cada árbol representará una entidad. Cada una de las entidades tiene asociados una serie de componentes, los cuales pueden ser grafos, nubes de puntos, etc. Los tipos de componentes que puede contener una entidad se detallan más adelante. Las entidades y los componentes tienen cada uno su propia ventana en la aplicación (*Entity List* y *Entity properties* respectivamente), situadas en la parte izquierda de la aplicación.

La ventana de entidades muestra una lista de todas las entidades de la aplicación. Contiene en la parte superior un filtro en el cual se pueden visualizar en la lista únicamente aquellas entidades que tengan los tipos de componentes seleccionados (i.e. aquellas que tengan nubes de puntos, normales, grafo, etc.). La casilla de verificación a la izquierda de cada entidad permite modificar la visibilidad de la entidad, esto es si se muestra en la vista 3D. También se pueden seleccionar las entidades presionando sobre su nombre.

En la vista de componentes (Figura A.2), se pueden editar las propiedades de cada uno de los componentes de la entidad que está actualmente seleccionada.

Se pueden agregar algunos componentes o eliminarlos, además de la opción de destruir la entidad con todos sus componentes. En esta ventana se muestra la lista de todos los componentes asociados a la entidad, cada uno como un desplegable en el cual se encuentran las propiedades asociadas a este que se pueden visualizar o editar.

A.2. Componentes

En este apartado se describen los diferentes componentes que pueden tener las entidades. Existen dos tipos de componentes: los componentes de datos y los componentes de visualización. Por un lado, los componentes de datos (desplegable azul) contienen los datos con los que se hacen las operaciones lógicas de la aplicación. Por otro lado, los componentes de visualización (desplegable naranja) son los encargados de almacenar las propiedades de visualización 3D de los distintos componentes, como colores, tamaños de los puntos, etc. Ambos tipos de componentes aparecen en la ventana de propiedades de la entidad (Figura A.2) y se pueden visualizar o editar algunas de sus propiedades asociadas.

Los componentes de datos son los siguientes:

- *Name*: nombre de la entidad, visible en la lista de entidades. Esta propiedad se puede editar.
- *Visible*: determina si un objeto se va a dibujar en la vista 3D o no. No aparece en el editor de propiedades, pero se puede modificar con la casilla de verificación que aparece junto a cada una de las entidades en *Entity List*.
- *Point Cloud*: contenido con las coordenadas de los puntos de la nube de puntos. Se pueden visualizar el número de puntos y una lista de las coordenadas de los puntos.
- *Point Normals*: normales de cada punto en una nube.
- *Point Colors*: colores de cada uno de los puntos de la nube de puntos.
- *Plant Graph*: estructura de grafo con vértices y aristas. También puede existir un nodo marcado como raíz, útil en varias operaciones.
- *Plant Node Points*: coordenadas 3D asociadas a cada uno de los vértices del grafo del componente anterior. En el editor de propiedades existe una opción para volcar los vértices como una nube de puntos a un fichero y otra para ver las coordenadas.

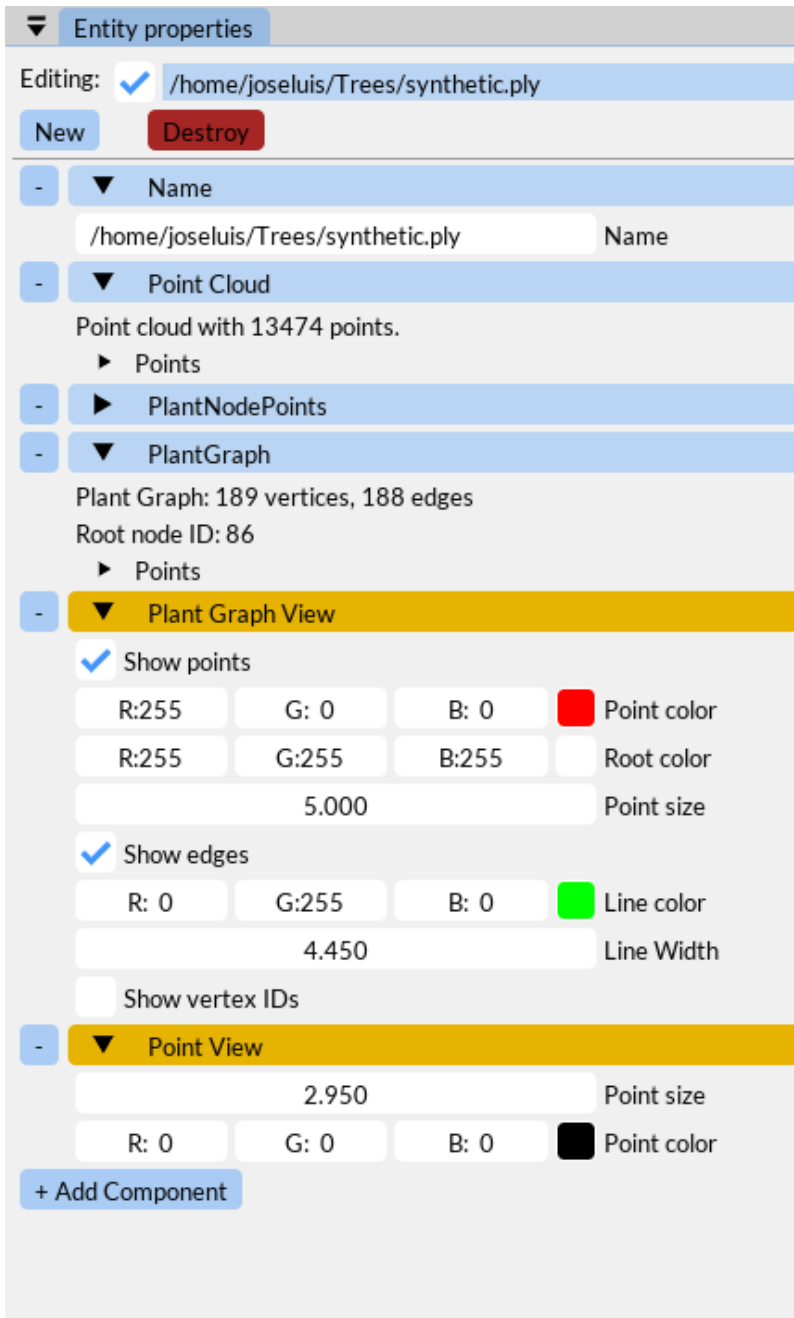


Figura A.2: Ventana de componentes de la entidad seleccionada

- *Connected Components*: componentes conexas etiquetadas en el grafo. En las propiedades se puede ver el número de componentes conexas y una pequeña herramienta para comprobar la etiqueta de componente de un vértice elegido por el usuario.
- *Branch Weights*: longitud acumulada de las ramas que cuelgan de cada vértice del grafo comenzando desde el nodo raíz.
- *Orientation Field*: a cada vértice del grafo se le asocia un valor de orientación.
- *Cylinders*: lista de cilindros asociada a una componente. De cada cilindro se puede ver su centro, dirección, radio y longitud. Un cilindro puede tener también una lista de puntos asociada.

A continuación se describe la otra clase de componentes, los que se utilizan para la visualización:

- *Point View*: datos para la visualización de las nubes de puntos. Se pueden modificar propiedades como el tamaño de renderizado de los puntos, el color uniforme con el que se pinta la nube completa o si se utilizan aquellos presentes por cada punto en el componente *Point Colors*.
- *Point Normal View*: al visualizar las normales como líneas, se pueden editar propiedades como la longitud, grosor y color de las mismas.
- *Graph Viewer*: para los vértices incluye opciones para activarlos y desactivarlos, color de los puntos, color del nodo raíz, tamaño de los puntos. Además tiene una opción para mostrar un texto con los identificadores de cada vértice en la vista 3D. En el caso de las aristas, permite activarlas y desactivarlas o cambiar el color y grosor de las líneas.

A.3. Comandos en los menús

En el menú *File* están las siguientes opciones:

- *Open Workspace* y *Save Workspace*: mediante estos elementos del menú podemos abrir y cargar el espacio de trabajo de la aplicación desde un archivo. Todas las entidades y sus componentes serán cargadas o guardadas del archivo que especifique el usuario.
- *Clear Invisible*: todas las entidades marcadas como no visibles serán eliminadas del espacio de trabajo.
- *Clear Workspace*: borrar todas las entidades.

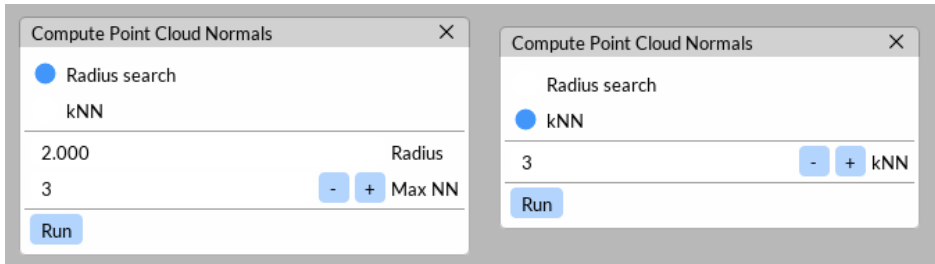


Figura A.3: Ventana de opciones para el cálculo de las normales

- *Save 3D window screenshot*: guarda en la carpeta actual una captura de pantalla de la vista 3D actual.

En el menú *View* solo existe la opción *Hide all*, que lo que hace es ocultar todas las entidades, marcándolas como no visibles.

En *Point Cloud* se hallan todas las operaciones relativas a nubes de puntos. Tenemos las siguientes opciones:

- *Import PLY*: importar nubes de puntos en formato *PLY*. Esta operación crea los componentes necesarios automáticamente según el contenido del fichero: además de la nube de puntos puede incorporar las normales y los colores.
- *Export PLY*: exportar nubes de puntos en formato *PLY*. De forma análoga a la función de importar, si existen los componentes de normales o colores, los exporta también.
- *Normals*: herramienta para calcular normales en la nube de puntos. Tiene dos opciones para el cálculo: usando un radio de búsqueda o con un número especificado de vecinos más cercanos por cada punto (Fig. A.3).
- *Split Voxels*: divide nube de puntos seleccionada en varias, aplicando cortes uniformes en los tres ejes. En un diálogo se especifica la distancia entre los cortes. El resultado son varias entidades con los componentes de nube de puntos original divididos espacialmente.
- *Recenter cloud*: centra la nube de puntos en el origen de coordenadas. Permite seleccionar si el centro de la nube se considera como el centroide de los puntos (el origen está desplazado hacia las zonas con más puntos) o el centro de la caja envolvente.

En el menú *Plant Graph* están las opciones relativas a la creación y procesamiento de los grafos de la estructura del árbol:

- *Create Graph from cloud*: a partir de una nube de puntos genera un grafo. Permite seleccionar entre diferentes algoritmos. (Fig. A.4):
 - *Radius search* (a): conecta cada punto con los vecinos que se encuentren dentro del radio especificado.
 - *kNN* (b): conecta cada punto con los k vecinos más cercanos, donde k es un parámetro que se puede especificar.
 - *3D Delaunay*(c): genera una triangulación Delaunay tridimensional de los puntos (tetraedralización). La forma exterior de este grafo tiene la forma de la envolvente convexa.
 - *Alpha-shape* (d): partiendo de la triangulación Delaunay, permitiendo que la forma exterior tenga concavidades. Se puede parametrizar por un radio alpha o por el número de componentes conexas deseadas.
 - *Cárdenas-Donoso et al. (2021)* (e): se utiliza el método descrito en el artículo “Reconstruction of tree branching structures from UAV-LiDAR data” de la presente tesis doctoral.

Además se permite elegir el método por el cual se busca el nodo raíz del grafo, seleccionando entre los puntos extremos en cada uno de los ejes. También se puede seleccionar un método para eliminar ciclos en el grafo en caso de ser necesario:

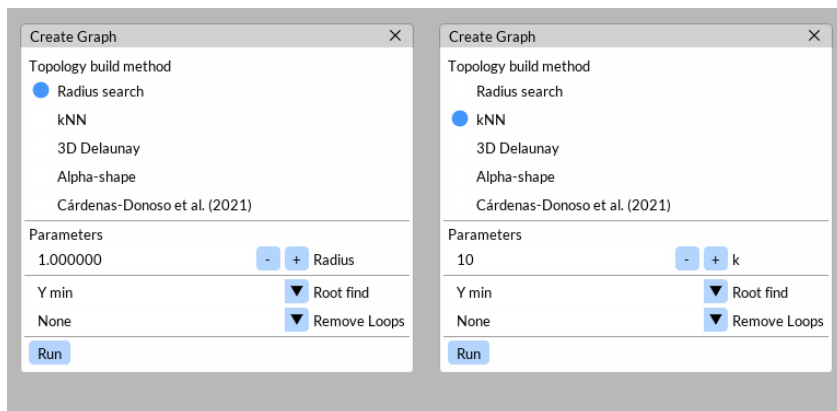
- *Geodesic*: se calcula el grafo geodésico, que es aquel en el que sólo se conservan los caminos mínimos hacia el nodo raíz.
 - *Minimum Spanning Tree*: se calcula el árbol generador minimal, que es aquel que conecta todos los vértices teniendo un peso mínimo.
- *Clustering* (Fig. A.5): algoritmo de agrupación usado para simplificar el grafo: divide el grafo en tramos de distancia desde el nodo raíz, y en cada uno de estos tramos separa las componentes conexas. Posteriormente se conectan las componentes conexas: cada par de estas se conectará según si existen vértices pertenecientes a cada una que estuvieran conectados entre sí. Para seleccionar los tramos, se puede realizar fijando la longitud o número de los mismos. Además, para el cálculo del centro se puede utilizar la media o mediana de los puntos. Esta herramienta también crea un componente *Plant Node Points*, asociando los puntos de cada cluster al

nodo del grafo que se crea.

- *Compute from cylinders*: usa los cilindros para construir un grafo. Útil si se ha reconstruido el árbol detectando cilindros en las ramas.
- *Geodesic graph*: calcula el grafo geodésico.
- *Minimum Spanning Tree*: calcula el árbol generador minimal.
- *Line graph*: crea un grafo nuevo con nodos en los puntos medios de cada una de las líneas que forman las aristas del grafo original.
- *Import Plant Graph*: importa el grafo desde un archivo en formato OBJ con vértices y líneas.
- *Export Plant Graph*: exporta el grafo a un archivo OBJ.
- *Resample Graph*: remuestrea el grafo creando o eliminando nodos intermedios. Para esto utiliza una longitud parámetro con la que se van tomando muestras a las ramas. Cualquier rama con longitud inferior a este número será eliminada.
- *Compute Connected Components*: crea un componente *Connected Components* etiquetando las componentes conexas.
- *Repair Connectivity*: algoritmo para fusionar las componentes aisladas a la principal.
- *Compute orientation field*: calcula un campo de orientación suavizado del grafo, con un valor de orientación por cada nodo del grafo.
- *Make Livny et al. 2010*: utiliza el método de reconstrucción indicado, en el que se desplazan los nodos en varias iteraciones hasta extraer el grafo de la estructura del árbol.

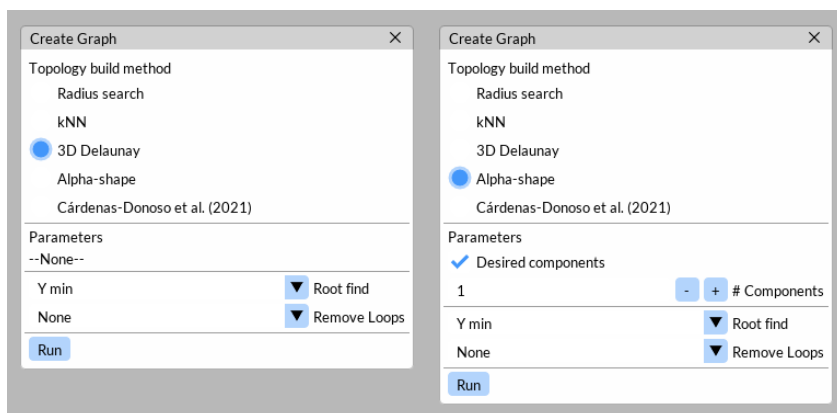
En el menú *Cylinders* nos encontramos con las opciones para trabajar con cilindros de las ramas:

- *Cylinders*: detector de cilindros a partir de una nube con normales. Es un algoritmo muy poco tolerante al ruido, y con bastantes parámetros (Fig. A.6).
- *Filter Cylinders*: filtrado de cilindros por rangos de longitud y radio. Aquellos que no estén en rango se eliminan.

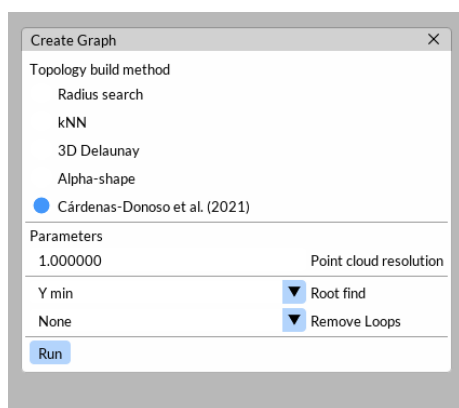


(a) Búsqueda por radio

(b) Búsqueda por número de vecinos más cercanos



(c) Haciendo tetraedralización

(d) Calculando el *alpha-shape*

(e) Usando el método descrito en uno de los artículos de esta tesis

Figura A.4: Diálogo de creación de grafo mostrando los diferentes parámetros de cada método de construcción del grafo.

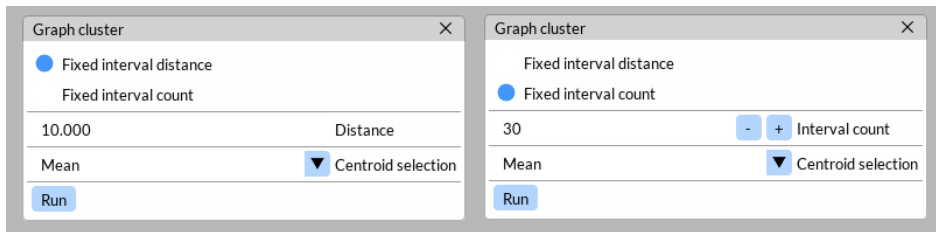


Figura A.5: Diálogo de opciones de clustering

- *Build Cloud from Cylinders*: reconstruir una nube de puntos con la unión de los puntos asociados a cada cilindro. Junto con la herramienta *Cylinders*, se puede filtrar aquellos puntos de una nube que no generan cilindros.

A.4. Aspectos técnicos

Se ha desarrollado el software utilizando el lenguaje de programación C++, compatible con los principales compiladores que soportan la versión del estándar C++17. La aplicación se ha dividido en varios módulos compilables:

- Módulo *groot*: biblioteca con utilidades generales que se usan desde otros módulos (nubes de puntos, mallas, cilindros...).
- Módulo *groot_graph*: biblioteca con las funciones y tipos de datos para trabajar con grafos.
- Módulo *groot_app*: unidad compilable con la aplicación principal. Dota de interfaz gráfica a los métodos de las otras bibliotecas.
- Módulo *groot_python*: módulo de python. Exporta casi toda la funcionalidad de *groot_app* para ser utilizada desde el lenguaje de programación Python. En el directorio */scripts* se incluyen ejemplos de uso.

A.4.1. Listado de dependencias externas

Se enumeran a continuación las bibliotecas externas que se utilizan para compilar la aplicación:

- *Boost Graph Library*: Representación de los grafos y algoritmos para trabajar con ellos.

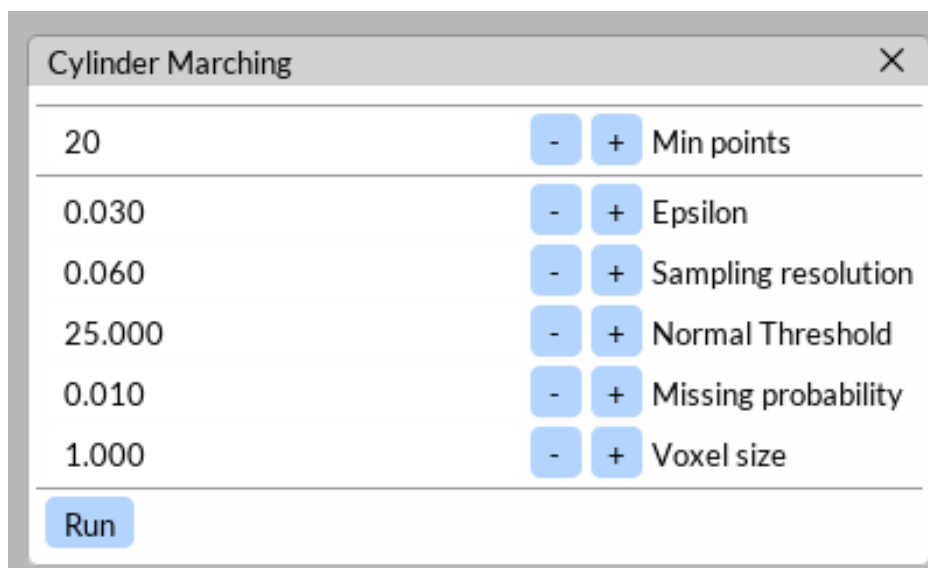


Figura A.6: Parámetros del detector de cilindros

- *CGAL*: Algoritmos geométricos.
- *EnTT*: Biblioteca base para la arquitectura Sistema-Entidad-Componente.
- *GLFW*: Gestión de la ventana y entrada a la aplicación.
- *glm*: Biblioteca matemática con utilidades para informática gráfica.
- *Eigen3*: Dependencia de algunos algoritmos de *CGAL*.
- *OpenGL 4.5*: Visualización y renderizado.
- *Dear ImGui*: Interfaz gráfica de la aplicación.
- *Async++*: Gestión de tareas y operaciones asíncronas dentro de la aplicación.
- *TBB*: Paralelización de algunos algoritmos de *CGAL*.
- *Python 3.9*: Soporte para scripts.
- *pybind11*: Simplificación de la interfaz de Python en C++.
- *Ceres solver*: Biblioteca para resolver problemas de optimización no lineal.
- *Cereal*: Serialización de componentes para cargar y guardar el entorno de trabajo.
- *spdlog*: Logging.

A.4.2. Compilación

Para compilar, se utiliza la herramienta CMake, cuya descarga está disponible para los principales sistemas operativos. A esta herramienta se le especifican los directorios de las dependencias externas y genera el proyecto necesario para compilar la aplicación. En equipos con Windows puede compilar la solución de Visual Studio generada por CMake. En sistemas tipo UNIX, por defecto, genera un Makefile que puede ser utilizado para compilar el proyecto.