



TRABAJO FIN DE GRADO



COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE CÁLCULO DE VOLÚMENES DE COPA DE NARANJOS



Autor:

Victoria M^a Medina Ramírez

Tutores:

Dr. Antonio Miguel Pérez Romero

Dr. Antonio Rodríguez Lizana

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica.

Sevilla, Enero de 2018



TRABAJO FIN DE GRADO



COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE CÁLCULO DE VOLÚMENES DE COPA DE NARANJOS

Autor:

Fdo.: Victoria Mª Medina Ramírez

Tutores:

Fdo.: Antonio Miguel Pérez Romero

Fdo.: Antonio Rodríguez Lizana

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica.

Sevilla, Enero de 2018

“La permanencia, la perseverancia y la persistencia a pesar de todos los obstáculos, desánimo e imposibilidades: es entre todas las cosas lo que distingue al alma fuerte de los débiles.”

Thomas Carlyle

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi familia, especialmente a mis padres y mi hermana, los cuales han sido un pilar muy importante a lo largo de toda mi vida y que sin ellos nunca hubiera llegado a conseguir mis objetivos, por esas caídas que he tenido a lo largo de este viaje, pero que no sé cómo siempre me hacíais ver el porqué de todo. Gracias y mil gracias por ayudarme a ser la persona tan exigente, perseverante y luchadora que soy hoy en día.

A mi pareja por estar hay tanto en las buenas como en las malas, por esas horas, días de ausencia, de agobios y bajones. Gracias por la paciencia y el apoyo que siempre me has dado en todas mis decisiones.

Finalmente, y no por ello menos importante, quiero agradecer a mis tutores por darme la oportunidad de poder haber realizado este proyecto, por su paciencia, disposición y consejos para que este saliera adelante.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos	2
2. ANTECEDENTES	3
2.1. Emplazamiento	3
2.2. ¿Qué se entiende por Fotogrametría?	3
2.3. Principios generales de la Fotogrametría.....	5
2.4. Contexto histórico de la Fotogrametría.....	5
2.4.1. Etapa gráfica (1600 a 1900).....	7
2.4.2. Etapa analógica (1900 a 1960)	8
2.4.3. Etapa analítica (1960 a 1990)	9
2.4.4. Etapa digital (1990 a la Actualidad)	10
2.5. Clasificación de la Fotogrametría	12
2.6. Método de Volumen de Elipsoide (VMI o VME)	13
2.7. Método de Volumen de la Silueta del Árbol (VTS).....	14
2.8. Método de Volumen medio (MV)	16
3. MATERIALES UTILIZADOS Y OBJETIVO DE ESTUDIO	17
3.1. Cámara fotográfica	17
3.2. Jalones	17
3.3. Software	18
3.4. Hardware	23
3.5. Elementos auxiliares.	24
3.6. Objeto de estudio.....	25
4. METODOLOGÍA	26
4.1. TOMA DE DATOS Y TRABAJO DE CAMPO.....	26
4.1.1. Toma de datos para el método del elipsoide.	26
4.1.2. Toma de datos para el método Volumen Medio.	28
4.1.3. Toma de Fotografías	29
4.2. Trabajo de Gabinete	32
4.2.1. Trabajo con el Agisoft Photoscan.....	32
4.2.1.1. Carga y orientación de fotografías.....	33
4.2.1.2. Creación de nube de puntos densa.....	35
4.2.1.3. Creación de la malla.....	39

4.2.1.4.	Creación de la textura	41
4.2.2.	Trabajo con AutoCAD.....	43
4.2.2.1.	Cálculo del volumen con AutoCAD Civil 3D por el método de la silueta.....	43
4.2.2.2.	Mejora del planteamiento del método de la silueta.	60
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	61
6.	CONCLUSIONES.....	68
7.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	69
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	70
9.	ANEJOS	73
	Anejo 1: Características de la cámara Canon EOS 1100D.	73
	Anejo 2: Tabla de datos tomados en campo para el método manual del elipsoide y volumen medio.....	76
	Anejo 3: Tabla de datos de los volúmenes calculados con el método de la silueta.	78
	Anejo 4: Tabla de datos de los volúmenes en la mejora del método de la silueta.....	79
	Anejo 5: Mapas de situación de la finca para la toma de datos en campo.....	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Emplazamiento de la Finca “Los Naranjales”.....	3
Figura 2: Fotografía del primer fototeodolito, construido por Aimé Laussedat en el año 1850. ..	6
Figura 3:Esquema de las etapas de la fotogrametría.	6
Figura 4:Fotografía del ingeniero francés Aimé Laussedat, considerado como el fundador de la fotogrametría.	7
Figura 5: Fotografía de un Estereocomparador creado por C. Pulfich.	8
Figura 6:Fotografía de un restituidor analógico creado en 1957.....	9
Figura 7:Fotografía de un ordenador de mesa.	10
Figura 8:Esquema de la clasificación de la fotogrametría.	12
Figura 9:Dibujo del método del elipsoide.....	14
Figura 10: Captura de pantalla de la captura de imágenes en un árbol para el método de la silueta.	15
Figura 11:Captura de pantalla del revolucionado para el método de la silueta.	15
Figura 12:Dibujo de la disposición de los jalones para el método de medición manual del Volumen Medio.	16
Figura 13: Cámara fotográfica modelo Canon EOS 1100D.....	17
Figura 14: Fotografía de varios jalones.	18
Figura 15:Fotografía del programa Agisoft Photoscan.	19
Figura 16: Toma de fotografías correcta y errónea en una Fachada para el método de Fotogrametría.	21
Figura 17:Toma de fotografías correcta y errónea del interior de un lugar para el método de Fotogrametría.	21
Figura 18: Toma de fotografías correcta y errónea en un objeto aislado para el método de Fotogrametría.	22
Figura 19:Fotografía del programa AutoCAD Civil 3D.	22
Figura 20: Fotografía del programa Adobe Acrobat.	23
Figura 21: Fotografía de distintas cintas de balizar.....	25
Figura 22:Fotografía tomada en la finca “Los Naranjales”.....	25
Figura 23: Dibujo la medición del método manual del elipsoide.....	27
Figura 24: Fotografía tomada en la finca “Los Naranjales”.....	27
Figura 25:Dibujo de la disposición de los jalones para el método de medición manual del Volumen Medio.	28
Figura 26:Fotografía tomada en la finca “Los Naranjales”.....	29
Figura 27: Dibujo de la disposición de la cámara fotográfica para el método de medición SFM.	30
Figura 28: Fotografía tomada en la finca “Los Naranjales”.....	30
Figura 29: Fotografía tomada en la finca “Los Naranjales”.....	31
Figura 30:Dibujo de la disposición de los jalones y de la cámara fotográfica para el método de medición de la silueta.....	31
Figura 31: Captura de pantalla del menú "Flujo de trabajo".	33
Figura 32: Captura de pantalla de la carga de imágenes en Photoscan.	34
Figura 33:Captura del espacio de trabajo(izquierda) y captura de pantalla de las imágenes en miniaturas de las imágenes cargadas(derecha).....	34

Figura 34: Capturas de pantalla del Proceso de "Orientación de fotos" (Arriba a la derecha), características para generar la orientación (Arriba a la izquierda) y posición de la cámara y nube de punto dispersa (Abajo en el centro).....	35
Figura 35: Captura de pantalla de la edición de la nube de puntos densa, donde captura 1 es "Opción de redimensionar la región", captura 2 "Opción de rotar la región", captura 3 "Opción de girar objetos" y captura 4 "Modelo en edición".	36
Figura 36: Captura de pantalla de pasos a seguir para crear la nube de puntos densa, a la izquierda "selección del proceso" y a la derecha "elección de la calidad del proceso".	37
Figura 37: Captura de pantalla del modelo en edición, donde en la izquierda se encuentra el cuadro de opción y el modelo en edición con "la nube de puntos dispersa" y a la derecha se encuentra la opción y modelo en edición de "la nube de puntos densa".	37
Figura 38: Capturas de pantalla de la Herramienta de selección, de arriba hacia abajo; "selección rectangular y modelo en edición", "selección circular y modelo en edición" y "selección libre y el modelo en edición".....	38
Figura 39: Captura de imagen de borrado y cortado de la nube de puntos densa; modelo en edición (Izquierda) y opciones de borrado (derecha).....	39
Figura 40: Captura de pantalla del proceso de creación de la malla, "Selección de opciones, creación malla"(izquierda) y "Selección del tipo de superficie"(derecha).....	40
Figura 41: Captura de pantalla del proceso de creación de la malla, "Selección de los datos de la fuente"(izquierda) y "selección del número de caras del modelo" (derecha).....	40
Figura 42: Captura de pantalla del proceso de creación de la textura; "Selección de la opción crear textura"(Izquierda) y "Opciones para crear la textura" (Derecha).	41
Figura 43: Captura de imagen de la elección del "Modo de mapeado" para la creación de la textura.	41
Figura 44: Captura de pantalla de elección del "Modo de mezcla" en la creación de la textura.	42
Figura 45: Captura de pantalla de "Opciones Avanzadas" para la creación de la textura.....	42
Figura 46: Captura de pantalla de la Opción para insertar la imagen en el programa, cuadro del proceso de "inserción de la imagen" (Izquierda) y cuadro de "enlazar la imagen" (Derecha)....	44
Figura 47: Captura de pantalla de uno de los árboles medidos con una toma de puntos en un jalón para realizar la escala de la imagen.	44
Figura 48: Captura de pantalla de los procesos a seguir para escalar una imagen: 1 Opción del comando "ESCALA"; 2 Opción del comando "Designar objetos"; 3 Opción del comando "Precise punto base" y 4 Opción para designar el "Punto base".	45
Figura 49: Captura de pantalla de los pasos a seguir para realizar la escala de la imagen.....	46
Figura 50: Captura de pantalla de la precisión de la medida conocida en el proceso de escalar la imagen.	47
Figura 51: Captura de pantalla del proceso de realización del eje del árbol.	48
Figura 52: Captura de pantalla de ejemplo de organización de distintas capas.	48
Figura 53: Captura de pantalla de la herramienta "Propiedades de capa".....	49
Figura 54: Captura de pantalla del "Administrador de propiedades de las capas".....	49
Figura 55: Captura de pantalla de cómo se crea una nueva capa y como se modifica una existente.	50
Figura 56: Captura de pantalla de la creación de la silueta del árbol.	50
Figura 57: Captura de pantalla de la polilínea cerrada de nuestra silueta del árbol.	51
Figura 58: Captura de pantalla de los pasos a seguir para crear un contorno, 1 es el comando "POLCONT" y el 2 el cuadro de dialogo para crear el contorno.	52
Figura 59: Captura de pantalla de la imagen de la creación de la nueva silueta.	52

Figura 60: Captura de pantalla de la imagen de la nueva silueta creada y todos los elementos de nuestro diseño.....	53
Figura 61: Captura de pantalla de la copia de elementos.	54
Figura 62: Captura de pantalla de la barra de herramienta para realizar un revolucionado.	55
Figura 63: Captura de pantalla del proceso de creación de una figura de revolución.	55
Figura 64: Captura de pantalla del proceso de creación de una figura de revolución.	56
Figura 65: Captura de pantalla de la figura revolucionada en vista 3D	56
Figura 66: Captura de pantalla del cálculo de volumen escribiendo el comando.	57
Figura 67: Captura de pantalla del cálculo del volumen mediante el icono.....	58
Figura 68: Imagen de la distorsión creada con una cámara fotográfica.	59
Figura 69: Captura de pantalla de la figura creada con cinco puntos en la silueta inicial.....	60
Figura 70: Captura de pantalla de todas las siluetas creadas.....	60
Figura 71: Captura de pantalla del resultado de la orientación de las imágenes de los naranjos.....	61
Figura 72: Captura de pantalla de la orientación del ejemplo del naranjo.	62
Figura 73: Histogramas de los dos métodos de medición de volumen empleado. Arriba "histograma a" y debajo "Histograma b".....	64
Figura 74: Valores de los coeficientes de correlación lineal de Pearson.	66
Figura 75: Captura de pantalla del modelo digital de naranjos realizado mediante un “DRON”.	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Requisitos de solape de las imágenes dependiendo del tipo de terreno y de la forma de captura.....	20
Tabla 2:Exigencias de memoria RAM en función del número de fotografías y la calidad del modelo.....	23
Tabla 3:Número de fotografías y tiempo empleado respecto al método utilizado.....	32
Tabla 4: Parámetros medidos y calculados en los ensayos.	63
Tabla 5: Valores de los coeficientes de correlación lineal de Pearson.....	65
Tabla 6: El decrecimiento del volumen de copa medidos según el método de la silueta en función del incremento del número de puntos.	67
Tabla 7: Tiempos empleados en gabinete utilizados para la definición de los contornos.....	67

1. INTRODUCCIÓN

La decisión de realizar este Trabajo Final de Grado, en adelante TFG, titulado, “Comparación de métodos de cálculo de volúmenes de copa de naranjos”, es motivada, porque la utilización de una nueva herramienta modernizada, tras los últimos avances en fotografía digital, como es la fotogrametría, y poder compararla con las herramientas manuales que ya existían y se utilizan, supone un reto tanto a nivel personal como profesional.

Si se hace referencia a la fotogrametría, ya sea aplicada a la topografía, arquitectura o a simples objetos, ésta ha tenido una evolución bastante notable. Esto ha sido posible gracias al desarrollo de herramientas como ordenadores, cámaras fotográficas y software de restitución¹, que la han convertido en una herramienta eficaz y de bajo coste frente a otras como el escáner láser, por ejemplo (Pérez Salazar et al., 2013).

Este trabajo se ha desarrollado en base a la utilización de cuatro métodos para la obtención del volumen de copa del cultivo del naranjo. Para ello se han comparado, por un lado, los utilizados de manera manual, método del elipsoide y método volumen medio, con los que precisan de la utilización de material digital, método SFM y método de la silueta, como es el caso de la cámara fotográfica y posteriormente diferentes softwares para obtención de los volúmenes.

La parte digital, se ha desarrollado en base a dos programas. En un primer lugar, con el método SFM el software PhotoScan en su versión 2017 1.3.4-64bit, que permite obtener una representación tridimensional de los objetos a partir de nubes de puntos, obtenidos mediante fotografías digitales. En este último apartado es donde han surgido los mayores inconvenientes debido al marco de plantación de los naranjos, que no permitieron la obtención de las imágenes de árboles de forma aislada, a esto hay que sumar las limitaciones técnicas de los equipos informáticos, puesto que requieren de un ordenador dotado de una buena Tarjeta Gráfica y una considerable cantidad de memoria RAM. En segundo lugar, el método de la silueta con la utilización del software AutoCAD Civil 3D en su versión 2016, para la obtención de la silueta de la copa del árbol, mediante polilíneas cerradas, para posteriormente realizar un revolucionado para el cálculo del volumen de dicha copa.

A lo largo del desarrollo de éste TFG se expone la metodología que se ha seguido durante todo el proceso, lo que abarca desde los aspectos propios de la fotografía, los distintos métodos utilizados, hasta las limitaciones, inconvenientes y soluciones que se han adoptado.

¹ La **restitución** se puede entender como la última etapa dentro de la secuencia de trabajo en fotogrametría, y no es más que la reconstrucción tridimensional de un objeto, aplicando los principios de la perspectiva cónica, a partir de fotografías.

Realizada esta presentación, se procede al desarrollo del presente Trabajo Final de Grado.

1.1. Objetivos

Como se ha mencionado en la introducción, el objetivo principal que se persigue en este TFG es la comparativa de distintos métodos de medición, tanto manuales como digitales, para la obtención del volumen de copa en el cultivo del Naranja, realizado en la Finca “Los Naranjales” que se encuentra en el municipio de Alcalá del Río.

Los métodos utilizados han sido:

- Método del Volumen Elipsoide (VMI).
- Método del Volumen medio (MV).
- Método de Volumen de la Silueta del Árbol (VTS).
- Fotogrametría (SFM).

Algunos de los programas utilizados para la realización del presente trabajo han sido el software de restitución² fotogramétrica Agisoft Photoscan en su versión 2017 1.3.4-64bit y al Software de diseño asistido por ordenador AutoCAD Civil 3D en su versión 2016.

Durante el desarrollo del TFG se han analizado los parámetros que interfieren en el mismo, como son el tiempo de trabajo, forma de proceder, la climatología, ventajas e inconvenientes, recomendaciones operacionales, etc., con el objetivo de valorar la metodología de trabajo establecida en el rendimiento de la misma y los resultados obtenidos.

El empleo del Agisoft Photoscan y del AutoCAD Civil 3D, como las principales herramientas para llevar a cabo dicho proyecto, ha requerido un trabajo previo de familiarización, en el que se incluyen las asignaturas relacionadas con dichos programas (Expresión gráfica y Cartografía, Topografía y Geomática), la realización de ensayos previos con otros objetos y distintos tipos de árboles, pruebas de texturas, ensayo de la metodología para la toma de fotografías, etc.

Un trabajo previo y necesario con el objetivo de aprovechar al máximo las características que brindan dichos programas informáticos.

² La **restitución** se puede entender como la última etapa dentro de la secuencia de trabajo en fotogrametría, y no es más que la reconstrucción tridimensional de un objeto, aplicando los principios de la perspectiva cónica, a partir de la fotografía.

2. ANTECEDENTES

2.1. Emplazamiento

La Finca “Los Naranjales” (Figura 1), se encuentra situada en el Término Municipal de Alcalá del Río en la Provincia de Sevilla. Desde la E.T.S. de Ingeniería Agronómica se accede por la carretera Sevilla Utrera/A-376, 750 metros, utiliza el carril derecho de incorporación a SE-30/E-5/A-4 por la rampa en dirección A-92/Granada/Aeropuerto/A-4/Córdoba como se muestra en la Figura 1 del plano de situación de la Finca, cerca del IFAPA Centro Las Torres-Tomejil.



Figura 1: Emplazamiento de la Finca “Los Naranjales”.
Fuente: (Google Map, 2017).

2.2. ¿Qué se entiende por Fotogrametría?

Desde sus inicios, la fotogrametría se ha convertido en la herramienta indispensable en la producción de la base cartográfica de todos los países del mundo; de hecho, la mayoría de la cartografía topográfica de nuestro planeta ha sido realizada por medio de esta disciplina. Si bien la fotogrametría tuvo su inicio en el levantamiento de fachadas arquitectónicas y plantas de edificios, mediante el uso de fotografías terrestres, pronto se utilizaron las fotografías aéreas para el levantamiento de la cartografía de base, lo que le dio el tremendo auge que se ha mantenido hasta nuestros días. Esta capacidad de cartografiado de base la convierte también en la fuente primigenia de información para la cartografía temática y para los sistemas de información geográficos.

La fotogrametría es una disciplina que crea modelos en 3D a partir de imágenes 2D, para de esta manera obtener características geométricas de los objetos que representan, mediante el uso de relaciones matemáticas establecidas en la geometría proyectiva, y de la visión estereoscópica que posee en forma natural el ser humano. Las imágenes de los objetos son obtenidas por medios fotográficos, la medición se realiza a distancia, sin que exista contacto físico con el objeto (Jauregui, L., 2016).

Etimológicamente, la palabra fotogrametría se deriva de las palabras griegas *φωτος* *photos*, que significa luz; *γραμμα*, *gramma*, que significa lo que está dibujado o escrito, y *μετρον*, *metrón*, que significa medir. Usando en conjunto esas palabras la fotogrametría significa medir gráficamente por medio de la luz (Jauregui, L., 2016).

La Fotogrametría puede definirse como “La técnica cuyo objeto es estudiar y definir con precisión la forma, dimensión y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto” (H. Boneval, 1972).

No obstante, la ISPRS³, define la Fotogrametría como “la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado” (Lauregui, L. 2006).

Por otra parte, la ASPRS⁴ tiene la siguiente definición, ligeramente más completa que la anterior, donde define la Fotogrametría como “el arte, la ciencia y la tecnología de obtener información confiable de objetos físicos y su entorno, mediante el proceso de exponer, medir e interpretar tanto imágenes fotográficas como otras, obtenidas de diversos patrones de energía electromagnética y otros fenómenos” (Lauregui, L. 2006).

En cualquier caso, podemos decir que la Fotogrametría es la ciencia que nos permite, a partir de fotografías ya sean aéreas o terrestres, obtener las medidas del objeto fotografiado.

A partir de los años ochenta, el desarrollo acelerado de los ordenadores y sus sistemas informáticos condujo al establecimiento de la teledetección⁵ como consecuencia lógica de la evolución de la fotointerpretación, así como al desarrollo de técnicas de tratamiento de imágenes digitales y al desarrollo de la visión por ordenador. Actualmente, con el apoyo de la digitalización, la fotogrametría se ha convertido en una disciplina indispensable en el campo de la cartografía, aumentando a su vez el número de sus usuarios debido a que los equipos fotogramétricos de elevado precio están siendo desplazados por

³ ISPRS corresponde con las siglas de Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos.

⁴ ASPRS corresponde con las siglas de Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos.

⁵ La **teledetección** se puede definir como la obtención de información a distancia de determinados objetos, sin estar en contacto con ellos y, que se realiza con unos sensores especializados.

programas de precio menor, o por programas desarrollados por los mismos usuarios.

2.3. Principios generales de la Fotogrametría

La fotografía como tal, está basada en un sistema automático de captura de imágenes perspectivas. La perspectiva, definida como un sistema de representación de proyección centrada, es el resultado de la intersección con un plano de proyección o plano imagen, del haz de direcciones generado al unir los puntos a representar con el centro de proyección. Esto quiere decir que si tenemos una imagen fotográfica y conocemos la posición relativa de su centro de proyección (orientación interna), podremos reconstruir el haz proyectivo y con ello las direcciones de los puntos que aparecen registrados en la imagen. Si a esto le sumamos que conocemos la posición y orientación de la cámara en el momento de la obtención de la imagen (orientación externa), tendremos determinadas las direcciones en el espacio de todos esos puntos referidos no sólo al punto de donde se toman las fotografías, sino al sistema general de coordenadas (Buill Pozuelo et al.,2003).

Sin embargo, con una sola imagen, es decir con un solo haz de direcciones, no es posible determinar la posición en el espacio de ningún punto, salvo que dispongamos de algún otro dato, como por ejemplo conocer la pertenencia a un mismo plano perfectamente definido en su situación y orientación. Pero si utilizamos dos perspectivas o lo que es lo mismo, dos fotografías tomadas desde dos puntos diferentes, tendremos los datos suficientes para obtener la forma de una superficie y así los objetos pueden ser modelados tridimensionalmente.

Este conjunto de técnicas variadas, tienen un punto en común, y es que el primer paso que hay que realizar para obtenerlas es la toma de fotografías.

2.4. Contexto histórico de la Fotogrametría

La Fotogrametría va ligada a los avances de la ciencia. Comienza con el descubrimiento de la fotografía en el año 1839 por parte de Arago, perfeccionada por Niepce y Daguerre. Posteriormente, en el año 1850, Aimé Laussedat aprovechó la fotografía para realizar planos topográficos, diseñando y haciendo construir el primer fototeodolito⁶ (figura 2), dando a esta técnica el nombre de

⁶ El **fototeodolito** puede definirse como dispositivo para medir y registrar los ángulos horizontales y verticales para un misil al fotografiar su vuelo. También se define como instrumento de fotogrametría terrestre constituido por una cámara fotográfica asociada a un teodolito. Un **teodolito** es un instrumento topográfico para la medición mecánica-óptico que se utiliza para obtener ángulos horizontales y verticales.

metrofotografía⁷, de ahí que se le nombrara el “Padre de la Fotogrametría” (Sánchez Sobrino, J.A., 2006-2007).

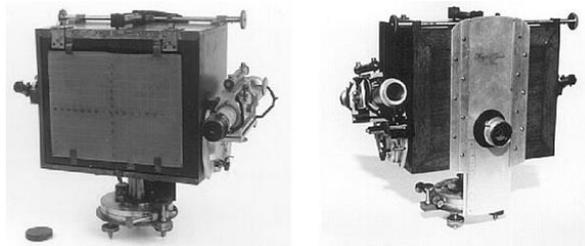


Figura 2: Fotografía del primer fototeodolito, construido por Aimé Laussedat en el año 1850.
Fuente: (Google, 2017).

Para entender el proceso evolutivo por el que ha pasado la fotogrametría hasta convertirse en lo que hoy conocemos, se hace necesario hacer una división en cuatro etapas (Figura 3).



Figura 3: Esquema de las etapas de la fotogrametría.
Fuente: (Diapositivas de “es.slideshare.net”).

⁷ La **metrofotografía** se puede definir como un método de levantamiento fotográfico.

2.4.1. Etapa gráfica (1600 a 1900)

En 1636 Girard Desargues publicó su primer libro con el objetivo de sentar las bases de la geometría proyectiva.

En 1726, con anterioridad al nacimiento de la fotografía, Capellar traza una carta del macizo de Pilates, partiendo de perspectivas dibujadas a mano. Hasta el año 1759 el matemático de origen alemán Johann Heinrich Lambert en su obra “perspectiva libre”, donde desarrolla el procedimiento sistemático para la transformación de una perspectiva y se realizan aplicaciones aisladas tales como el levantamiento de cartas de costas (web es.slideshare.net, 2012).

Posteriormente en 1816, Nicéphore Niépce logra imágenes sobre papel mediante la cámara obscura, y en 1839, François Arago después de que Faguerre hace público el invento de la fotografía, inmediatamente piensa en utilizar el descubrimiento en los levantamientos topográficos (web es.slideshare.net, 2012).

Es necesario esperar hasta el siglo XIX para que el Ingeniero Francés Aimé Laussedat (1819-1904), quién se consideró el fundador de la fotogrametría (figura 4), a la que designo metofotografía, crea entre el año 1851 y 1857, el primer instrumento apropiado para los levantamientos fotogramétricos y el primer método de restitución por intersecciones, que es un procedimiento gráfico en el que es necesario conocer la posición desde la que se han tomado las fotografías y las direcciones de los ejes ópticos de la cámara en cada estación(web es.slideshare.net, 2012).

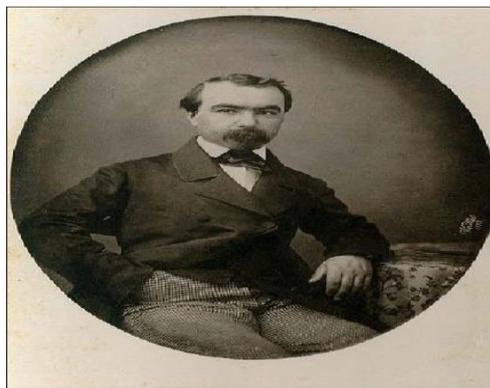


Figura 4: Fotografía del ingeniero francés Aimé Laussedat, considerado como el fundador de la fotogrametría.

Fuente: (Imágenes Google, 2017).

En 1867, el arquitecto alemán Albrecht Meydenbauer completó el primer registro fotogramétrico de un monumento arquitectónico, y en 1885 instauró el primer instituto fotogramétrico (Sánchez Sobrino, J.A., 2006-2007).

2.4.2. Etapa analógica (1900 a 1960)

Ciclo que se inicia con dos inventos importantísimos, por un lado, la estereoscopia⁸ dando origen a la estereofotogrametría⁹ y por otro lado el invento de plataformas adecuadas para los sensores (cámaras) como los zeppelines y el aeroplano.

En 1892 F. Stolze propone el llamado principio de la marca flotante, como una forma de medir y trazar, ya que permitía la identificación estereoscópica de puntos homólogos de un par de fotos.

En 1903, los hermanos Wright descubren el aeroplano, con lo que el uso de fotografías obtenidas desde este se popularizó en los trabajos de topografía.

Un poco más tarde en 1909 un oficial del ejército, R. Von Orel, modificaría el estereocomparador¹⁰ de C. Pulfrich (Figura 5) añadiéndole una especie de reglas metálicas complementarias, lo que permitió trazar automáticamente las curvas de nivel, mientras se las iba recorriendo virtualmente. A partir de entonces la estereofotogrametría terrestre logró su máximo desarrollo, aplicándose con un rotundo éxito para levantamientos topográficos tanto a pequeña como a gran escala (Ruíz Morales, M., 2003).

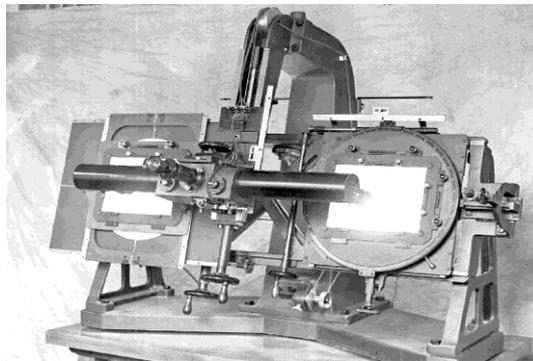


Figura 5: Fotografía de un Estereocomparador creado por C. Pulfrich.
Fuente: (Imágenes Google 2017).

⁸ La **estereoscopia** se define como cualquier técnica capaz de recoger información visual tridimensional y/o crear la ilusión de profundidad mediante una imagen 3D. Muchas pantallas 3D utilizan este método para transmitir imágenes.

⁹ La **estereofotogrametría** se puede definir como la construcción de un modelo tridimensional basado en las posiciones de los puntos reconocibles o puntos de referencia en varias fotografías diferentes.

¹⁰ El **monocomparador** o **estereocomparador**, se define de la misma manera como aparato de gran precisión usado en la elaboración de planos a partir de fotografías, con el que se determinan con exactitud la situación de puntos topográficos.

2.4.3. Etapa analítica (1960 a 1990)

Aparece en 1957 como un desarrollo natural de la interrelación entre los aparatos restituidores analógicos (Figura6) y el surgimiento de los ordenadores.

En ella, los componentes electrónicos sustituyen a los componentes mecánicos, donde la toma de información es analógica y el modelado geométrico es matemático.

Mediante el uso de un monocomparador o de un estereocomparador integrado en el restituidor, se miden las coordenadas x e y de los puntos pertinentes de las fotografías, coordenadas que son procesadas por los programas del ordenador del sistema. Este realiza el procesamiento de la orientación interior y exterior en forma analítica y procesa el levantamiento de la información del modelo que realiza el operador, para llevarla a su correcta posición ortogonal, y finalmente almacenarla en una base de datos tipo CAD (Jauregui, L.,2006).

En 1953 el norteamericano Dr. Helmut Schmidt, establece las bases matemáticas de la fotogrametría analítica, permitiendo resolver las ecuaciones fotogramétricas mediante matrices e incluyendo múltiples imágenes y analizando la propagación de errores.

Más tarde, en 1957 el profesor Uki Heleva idea la restitución digital, proponiendo los principios para la construcción del restituidor analítico (Figura 6), el cual tenía como base el restituidor analógico de la etapa anterior, pero al que se le habían sustituido los componentes óptico-mecánicos por servomecanismos¹¹ (Konecny, G., 2014).

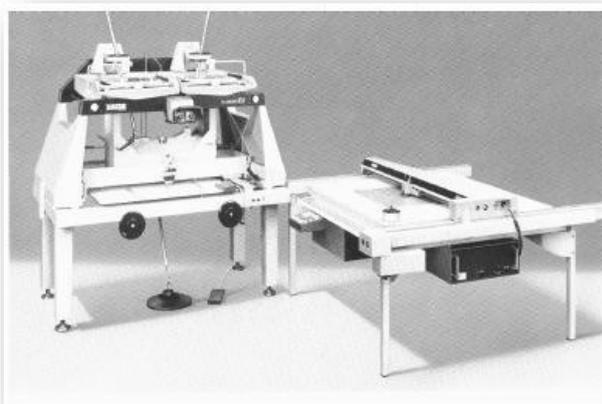


Figura 6: Fotografía de un restituidor analógico creado en 1957.

Fuente: (Imágenes Google 2017).

¹¹ **Servomecanismos** se define como sistema electromecánico que se regula por sí mismo al detectar un error entre su propia actuación real y la deseada.

2.4.4. Etapa digital (1990 a la Actualidad)

Esta etapa surge como consecuencia del gran desarrollo de los sistemas informáticos, que permitió realizar todos los procesos fotogramétricos mediante el uso de ordenadores (Figura 7).

En dicha etapa crecen las posibilidades de explotación de las imágenes, a la vez que se simplifican las tecnologías, permitiendo con ello la generación automática de modelos de elevación del terreno, ortofotos y estereortografías¹², generación y visualización de modelos tridimensionales etc.

Podemos decir que la fotogrametría digital surge en 1990 cuando se utilizan imágenes, como fuente primaria para la obtención de datos, procedentes de una cámara digital o imágenes analógicas digitalizadas a través de un escáner fotogramétrico de precisión (Jauregui, L., 2006).



*Figura 7: Fotografía de un ordenador de mesa.
Fuente: (Imágenes Google 2017).*

Los avances que se han producido en el terreno de la informática a finales del siglo XX y la aparición de las cámaras digitales han permitido que la fotogrametría alcance la importancia que tiene hoy en día.

¹² **Estereografías** se puede definir como la técnica de representación de los cuerpos sólidos proyectados en un plano. Imagen producida por la técnica de **estereograma**, que es representación en relieve de un cuerpo sólido.

Con el desarrollo en hardware y software, ha salido al mercado una gran cantidad de software fotogramétrico, desde código abierto hasta los más sofisticados que tienen su licencia libre y una para profesionales, entre ellos podemos citar: Arc3D, Acute3D, Autodesk 123D Catch, Insight 3D, Bundler, PMVS2, FIT3D, VisualSFM, Hypr3D, APERO, 3DSOM, Photoscan, PhotoBuilder, Photomodeler, etc.

En la actualidad, la última tendencia en la obtención de imágenes 3D a partir de fotografías es el empleo de SFM (del inglés, *Structure from Motion*) que, aunque se inspira en la fotogrametría, procede del mundo de la visión artificial y permite realizar modelos 3D a partir de colecciones de imágenes no estructuradas, sin cámaras calibradas, e incluso usar distintas cámaras, por lo cual se propone como una estrategia más polivalente y robusta que la fotogrametría (Pérez Romero, A.M. ,2016).

La técnica *Structure from Motion* (SFM) es considerada como un método fotogramétrico automatizado de alta resolución y bajo coste en relación con otras técnicas. Este método se basa en los mismos principios que la fotogrametría estereoscópica clásica, es decir, que la estructura en 3D se puede resolver a partir de una superposición de imágenes ópticas obtenidas desde distintos puntos de vista. Sin embargo, el SFM tiene sus orígenes en el campo de la visión artificial y el desarrollo de los algoritmos automáticos de correlación automática de imágenes (CAI) y difiere fundamentalmente de la fotogrametría convencional, en que la geometría de la escena, las posiciones de cámara y la orientación y deformaciones de la misma se resuelven mediante cálculos por ordenador, como es el caso de este proyecto utilizando el software Agisoft Photoscan. No obstante, la calibración de la cámara es recomendable, en caso de que nuestro trabajo requiera de gran precisión, por lo cual se propone como una estrategia más polivalente, robusta y barata que la fotogrametría tradicional o los sistemas más modernos como pueden ser los scanners basados en la tecnología LIDAR¹³ (Adrián Riquelme, M.C. et al, 2016).

El resultado de un proceso de fotogrametría o SFM es en primera instancia una nube de puntos discreta, la cual puede variar en densidad en función de las correspondencias detectadas entre imágenes.

Estas nubes son el resultado de lo que se conoce como ajuste Bundler que permite realizar la recolocación espacial tanto de una serie de puntos coincidentes entre imágenes como de las posiciones de las cámaras que tomaron dichas imágenes respecto a la escena.

¹³ LIDAR son las siglas de *Light Detection and Ranging*. Es la tecnología en la que están basados los scanners laser que se utilizan para generar nubes de puntos. Es una herramienta muy precisa, sin embargo, su alto coste hace que sea poco accesible para cualquier usuario.

Dichos puntos, en el caso del SFM son detectados automáticamente mediante lo que se conoce como el proceso SIFT o *Scale-Invariant Feature Transform* (Pérez Romero, A.M. ,2016).

2.5. Clasificación de la Fotogrametría

La fotogrametría se puede clasificar según el tipo de fotografía y según el tipo de tratamiento que se le aplica, como se muestra en el esquema (Figura 8).

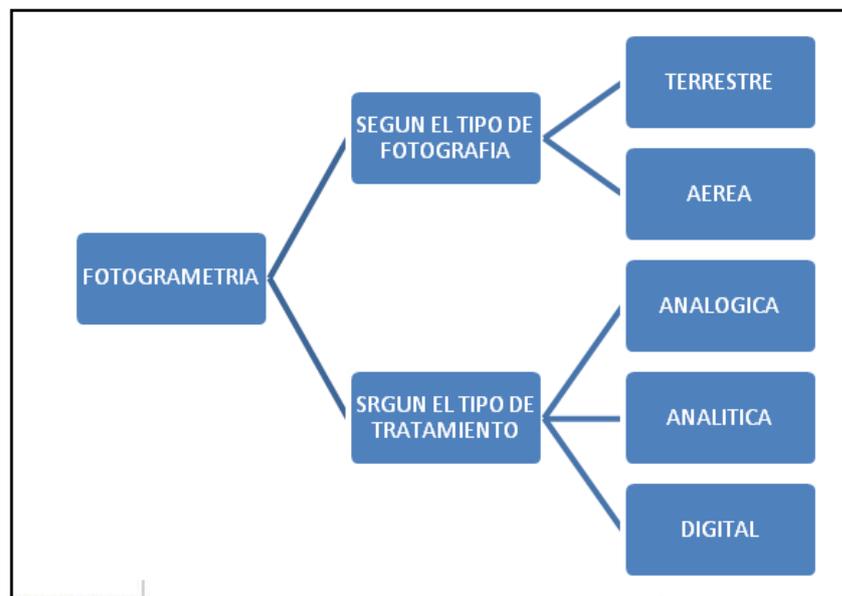


Figura 8: Esquema de la clasificación de la fotogrametría.

Fuente: (Apuntes de Fotogrametría de la Universidad Nacional del Nordeste).

Por una parte, podemos clasificar la fotogrametría según el tipo de fotografía, que puede ser terrestre o aérea, donde la fotogrametría terrestre tiene su principal aplicación en la arquitectura y la arqueología y se basa en el principio de la toma de fotografías desde la tierra, como se hace habitualmente; donde la posición de la cámara y el objeto es perfectamente conocida y la fotogrametría aérea es la que utiliza fotografías aéreas, como su nombre indica, tomadas desde una cámara de toma de vistas, ubicada en una plataforma especial Avión o Dron (Universidad Nacional del Nordeste, 2011).

Por otro lado, se puede clasificar la fotogrametría según el tipo de tratamiento que se le realice. En este caso se clasifica en tres tipos: fotogrametría analógica, analítica y digital.

En primer lugar, la fotogrametría analógica se basa en la utilización de aparatos de restitución ópticos o mecánicos, donde el operador realizaba la alineación de las imágenes para crear un modelo estereoscópico

debidamente nivelado y escalado. Por otro lado, la colección de mapas, con información taquimetría¹⁴, se realizaba con el principio de la marca flotante o graficadoras basadas en este principio.

En segundo lugar, la fotogrametría analítica se basará en la utilización de los restituidores analógicos y la incorporación de los ordenadores, agilizando los tiempos y logrando niveles de detalle de diferentes escalas, dando la posibilidad del vuelco de la información a programas del tipo CAD (Universidad Nacional del Nordeste, 2011).

Por último, en tercer lugar, la fotogrametría digital que se basará en el uso de ordenadores y los programas o software aplicados, que darán origen a los modelos digitales del terreno en 3D, etc.

2.6. Método de Volumen de Elipsoide (V_{MI} o V_{ME})

El método de Volumen de Elipsoide es un método manual con el cuál se puede calcular el volumen de la copa de árboles aislados, tomando mediciones de la proyección del eje mayor de la copa, de su eje perpendicular y de la altura efectiva del árbol, entendida como la diferencia entre la altura del árbol y la de las ramas bajas (Figura 9).

Este método no es factible para todo tipo de árboles, ya que la copa del árbol debe ser de una forma parecida a un elipsoide, ya se logre esto de forma natural o mediante poda.

Cuando ello no sea posible, en el caso de las coníferas, se utilizarán fórmulas alternativas para la determinación de los volúmenes buscados (Piñol y Martínez Vilalta, 2006).

Un ejemplo en el que sería factible este método, serían en Olivar, la mayoría de los Cítricos, y algunos frutales con estas características.

¹⁴ La **taquimetría** se puede definir como la rama de la topografía centrada en el levantamiento de planos a través del taquímetro (un dispositivo que permite la medición de ángulos y distancias). Se considera a la taquimetría como un método para realizar mediciones con rapidez, aunque sin demasiada precisión. Por lo general se emplea en aquellas situaciones en las cuales, por sus características, resulta imposible emplear una cinta métrica.

$$V_E = \frac{4\pi}{3} \times E_a \times E_b \times E_c \quad (3)$$

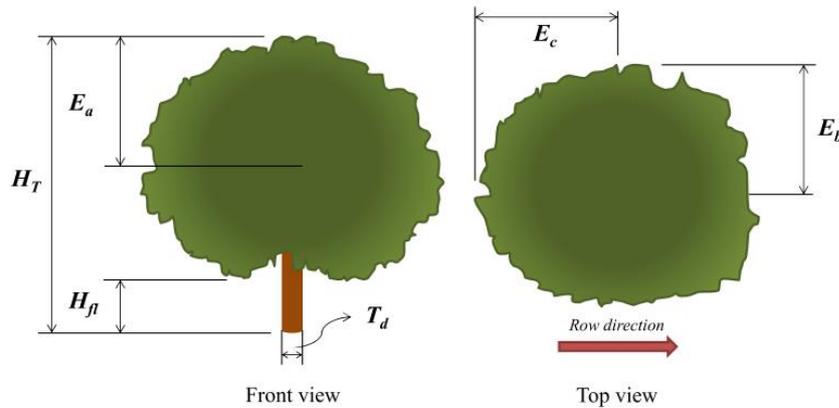


Figura 9: Dibujo del método del elipsoide
 Fuente: (Artículo “Towards an Optimized Method of Olive Tree Crown Volume Measurement”).

Una vez recopilados todos los datos se puede calcular el volumen de la copa del árbol mediante la siguiente fórmula:

$$V_{Elipsoide} = \frac{4}{3} \pi E_a E_b E_c \quad (m^3)$$

2.7. Método de Volumen de la Silueta del Árbol (VTS)

El método de cálculo del volumen por la Silueta del Árbol (VTS) consiste en la determinación del volumen del árbol por zonas delimitadas en las fotografías tomadas desde varias posiciones alrededor de un eje vertical en el centro del árbol revolucionando la silueta del contorno exterior respecto a dicho eje.

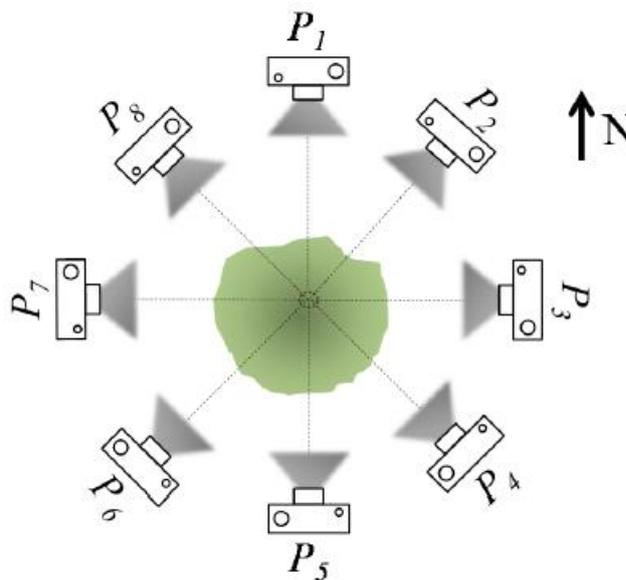


Figura 10: Captura de pantalla de la captura de imágenes en un árbol para el método de la silueta.

Fuente: (Artículo “Towards an Optimized Method of Olive Tree Crown Volume Measurement”).

Se toman fotografías en la misma orientación que la utilizada en el método de Elipsoide (Figura 10), más otras cuatro giradas 45°, haciendo así un total de ocho capturas por árbol. Las fotografías son ajustadas en función de una referencia con medición conocida (como un jalón), en el software de procedimientos de las imágenes (En el presente proyecto el programa utilizado será AutoCAD Civil 3D). El software del programa digital elegido calculará automáticamente el volumen de la copa revolucionada.

El volumen final de la copa del árbol será calculado con la media aritmética de los ocho volúmenes calculados como se muestra en la figura 11.

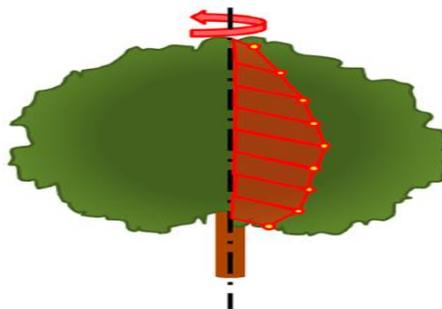


Figura 11: Captura de pantalla del revolucionado para el método de la silueta.
Fuente: (Miranda Fuentes, A., et, 2015).

2.8. Método de Volumen medio (MV)

El método de Volumen Medio es un método manual con el cuál se puede calcular el volumen de la copa de árboles aislados, tomando mediciones de ocho vértices, a lo largo de toda la circunferencia del árbol (Figura 12).

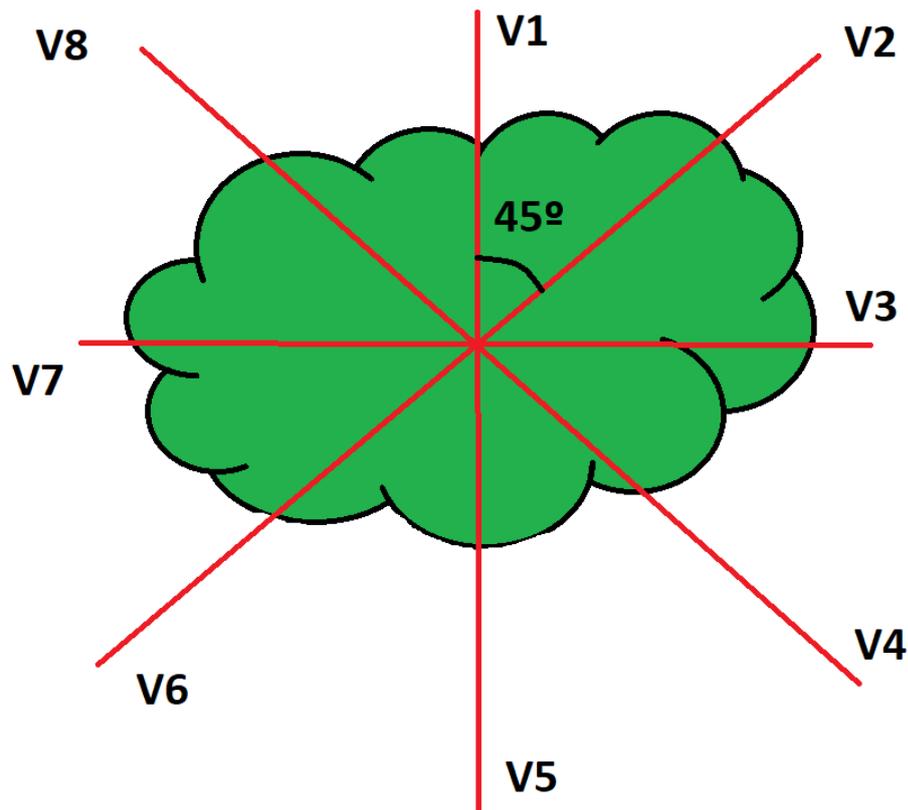


Figura 12: Dibujo de la disposición de los jalones para el método de medición manual del Volumen Medio.

En la figura 12 se puede observar un árbol, en el cual se ha dividido la circunferencia en ocho vértices, cada uno separado uno del otro por 45°, donde se mide el radio del árbol en cada uno de los ocho vértices. El volumen final de la copa del árbol será calculado con la media aritmética de los ocho vértices medidos con la siguiente fórmula:

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n}{n} \quad (\text{metros})$$

Este método tampoco es factible para todo tipo de árboles, ya que la copa del árbol debe ser de una forma parecida a un elipsoide, ya se logre esto de forma natural o mediante poda.

3. MATERIALES UTILIZADOS Y OBJETIVO DE ESTUDIO

3.1. Cámara fotográfica

Dado los tipos de software que se van a utilizar la elección de la cámara fotográfica utilizada para la toma de datos es un factor muy importante a tener en cuenta. La cámara fotográfica seleccionada ha sido la Canon EOS 1100D (Figura 13), que es una réflex digital de 12.2 megapíxeles con un precio que oscila entre los 400-500 €, dependiendo de los accesorios que incluya. Las características completas de la cámara se pueden consultar en el Anexo 1.



Figura 13: Cámara fotográfica modelo Canon EOS 1100D.
Fuente: (Imágenes Google, 2017).

3.2. Jalones

El jalón (Figura 14) es un instrumento usado en topografía para marcar puntos fijos mientras se realiza el estudio de un terreno. Se conoce como jalón topográfico al accesorio de medición cilíndrico de madera, acero o aluminio que puede tener entre unos 2 y 3 metros de longitud y que está

pintado en franjas alternas de color blanco y rojo. En cuanto a su utilidad, este instrumento topográfico simple dispone de una punta metálica para clavarse en la tierra y de esta forma poder determinar puntos fijos mientras se hace el plano de un terreno.

El jalón se ha utilizado en dos ocasiones, en la primera para la obtención de las mediciones por el método del elipsoide y en la segunda para poder escalar las fotografías de los árboles en el método de la silueta del árbol por el programa AutoCAD Civil 3D.



Figura 14: Fotografía de varios jalones.
Fuente: (Imágenes Google 2017)

3.3. Software

Para procesar la información generada por cada uno de los métodos propuestos se emplearán programas distintos. Para el método de obtención del volumen mediante fotogrametría, se utilizó el software Agisoft Photoscan, ya que es el más utilizado en el mercado hoy en día, por ser un programa fácil de utilizar, muy eficiente en la generación de modelos digitales y tener un precio de adquisición relativamente bajo. Para el método de obtención del volumen mediante el método de la silueta del árbol, se utilizó el programa AutoCAD Civil 3D, en su versión 2016.

Agisoft PhotoScan (Figura 15): es un software de escritorio para procesar imágenes digitales y, mediante la combinación de técnicas de fotogrametría digital y visión por ordenador (SFM), generar una reconstrucción 3D del entorno.

Es usado en aplicaciones SIG¹⁵, documentación de patrimonio cultural y producción de efectos visuales, así como para mediciones indirectas de objetos de diversas escalas. También es usado para la técnica de fotogrametría digital aplicada de forma inteligente con métodos de visión por ordenador (SFM).

El fundamento de Photoscan se encuentra en la tecnología SFM del inglés “*structure from motion*”, que permite obtener modelos en 3D a partir de colecciones de imágenes no estructuradas, como se ha explicado con anterioridad en el apartado “Etapa Digital” de la fotogrametría.



Figura 15: Fotografía del programa Agisoft Photoscan.
Fuente: (Imágenes Google 2017).

Este sistema de procesamiento automatizado inteligente puede ser manejado fácilmente por un novato en el campo de la fotogrametría y, por otro lado, tiene mucho que ofrecer a un especialista que puede ajustar el flujo de trabajo a numerosas tareas y diferentes tipos de datos.

En general, para trabajar con este programa puede ser muy útil realizar una planificación y seguir una serie de pautas antes de realizar una sesión de fotografías, para que el trabajo salga lo más correcto posible. Sin embargo, en ocasiones actúan otros factores que pueden causar errores y hacer que los resultados no sean los esperados, como se verá más adelante. Las pautas recomendadas, tras muchas pruebas previas son:

- Número de fotografías: Dependiendo del objeto a procesar se deberá tener en cuenta el número, aunque mientras más fotografías tomadas más densa será la nube de puntos y mejor saldrá el modelo final.
- Número de zonas ciegas: Estas zonas deben minimizarse para evitar errores o zonas vacías, puesto que Agisoft Photoscan sólo es

¹⁵ **SIG** se corresponde con las siglas de Sistemas de Información Geográfica, el cual es un sistema empleado para describir y categorizar la Tierra y otras geografías con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que se hace referencia espacialmente. Este trabajo se realiza fundamentalmente con los mapas.

capaz de reconstruir la geometría visible y debe de haber un mínimo de solape entre una fotografía y otra, que dependerá del terreno y la forma en la que se realice la imagen (Tabla 1).

- No colocar el objeto completo en el marco de la imagen, si faltan algunas zonas no es un problema, ya que con que salga en la siguiente imagen es suficiente.
- Se requiere una buena iluminación para lograr una mejor calidad de los resultados.
- No se debe utilizar el flash de la cámara fotográfica, ya que puede “quemar” las imágenes realizadas.
- En exteriores, evitar realizar la toma de fotografías en amaneceres y atardeceres, debido a las sombras, la mejor hora para la captura de imágenes será sobre el medio día, cuando el sol se encuentre en su cenit.
- Hay que tener especial cuidado en días de viento si la fotografía se realiza en el exterior, ya que, si el objeto a capturar es un árbol, las hojas se moverán con el viento y la imagen saldrá distorsionada, a parte que la posición de dichas hojas no será la misma que en la anterior debido al movimiento, aunque sea mínimo.
- Se deben colocar marcadores, con mediciones conocidas como jalones, para poder realizar ajustes de escala y posteriores mediciones de volúmenes.

Tabla 1: Requisitos de solape de las imágenes dependiendo del tipo de terreno y de la forma de captura.

Fuente: (Apuntes de Ingeniería de la Cartografía, 2016)

Tipo de terreno	Recubrimiento %	
	Longitudinal	Transversal
Llano	60	25
Ondulado	65-70	25-30
Montañoso	70-80	30-35

Aparte, dependiendo del objeto a capturar se deben seguir los siguientes consejos en distintos escenarios:

- **En escenarios de fachadas:** como muestra la figura 16, no se deben de tomar las imágenes desde el mismo punto, sino que es necesario moverse poco a poco, en paralelo al objeto estudiado e ir realizando las capturas de las imágenes, siempre con un % mínimo de solape (Tabla 1), el caso de ser una fachada y en llano con un 60 % es suficiente.

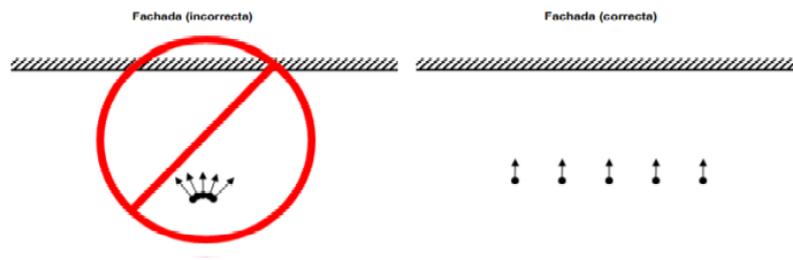


Figura 16: Toma de fotografías correcta y errónea en una Fachada para el método de Fotogrametría.

Fuente: (Manual de Agisoft photoscan).

- **En interiores:** como se muestra en la figura 17, las capturas de las imágenes deben realizarse en círculo, pero no dando vueltas sobre uno mismo, sino que siempre tomando imágenes de la zona que se tiene enfrente de uno mismo, es decir como si se realizase las capturas con la espalda pegada a la pared de la habitación o habitáculo que se desea plasmar.

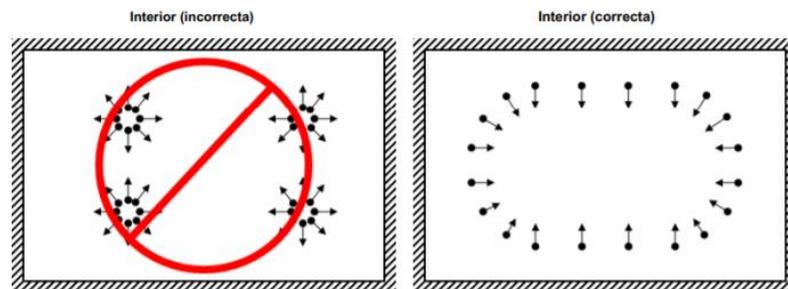


Figura 17: Toma de fotografías correcta y errónea del interior de un lugar para el método de Fotogrametría.

Fuente: (Manual de Agisoft Photoscan).

- **Objetos aislados:** en la figura 18 se muestra cómo se debe tomar las fotografías de un objeto aislado, en este caso la manera más correcta es ir realizando capturas de dicho objeto rodeándolo, aunque se debe realizar un mínimo número de capturas para que se logre un adecuado % de solape entre una imagen y otra. Si se realizan pocas capturas habrá zonas que no salgan en ninguna imagen.

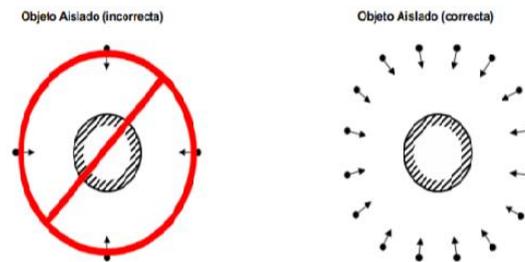


Figura 18: Toma de fotografías correcta y errónea en un objeto aislado para el método de Fotogrametría.

Fuente: (Manual de Agisoft photoscan).

AutoCAD Civil 3D (Figura 19): Es una herramienta de cálculo y diseño muy útil en el desarrollo de diseño urbanístico, carreteras, movimiento de tierras, cálculo topográfico, replanteo de información, solución BIM (Modelado de Información de Edificaciones) para ingeniería civil, etc.



Figura 19: Fotografía del programa AutoCAD Civil 3D.

Fuente: (Imágenes Google 2017).

El nombre AutoCAD surge como creación de la compañía Autodesk, donde Auto hace referencia a la empresa Autodesk y CAD a diseño asistido por ordenador (por sus siglas en inglés *Computer Assisted Design*), teniendo su primera aparición en 1982. Es un software reconocido a nivel internacional por sus amplias capacidades de edición, que hacen posible el dibujo digital de planos de edificios o la recreación de imágenes en 3D; es uno de los programas más usados por arquitectos, ingenieros, diseñadores industriales y otros profesionales que necesitan representar objetos con la máxima precisión.

Además de acceder a las órdenes desde la línea de comandos y las interfaces de menús, AutoCAD proporciona interfaces de programación de aplicaciones (API).

Las interfaces de programación que admite AutoCAD son ActiveX Automation, VBA (Visual Basic® for Applications), AutoLISP, Visual LISP, ObjectARX y .NET. El tipo de interfaz que se utilice dependerá de las necesidades de la aplicación y de la experiencia en programación de cada usuario

Adobe Acrobat (Figura 20): es un software gratuito para ver, editar, modificar e imprimir archivos en formato PDF. Cuenta con una opción de visualización de modelos 3D, lo cual lo hace muy útil, ya que es accesible a cualquier público, pues los ordenadores de hoy en día traen casi ya por defecto el Adobe Acrobat.



Figura 20: Fotografía del programa Adobe Acrobat.
Fuente: (Imágenes Google 2017).

3.4. Hardware

Dado que los programas elegidos requieren de unos requisitos mínimos sobre todo de la memoria RAM, para el correcto funcionamiento de estos y para que el tiempo de procesado sea el mínimo, se han empleado dos tipos de ordenadores, uno de mesa para la utilización del Agisoft Photoscan y otro portátil para el resto de los programas.

Para el Agisoft Photoscan se utilizó un ordenador de sobre mesa, ya que se requería una determinada memoria RAM para dicho programa como se puede observar en la tabla 2, donde se han fijado los cálculos para el programa Agisoft Photoscan, con fotografías tomadas con una resolución de 12 Mpx y tipo de superficie arbitraria.

Tabla 2: Exigencias de memoria RAM en función del número de fotografías y la calidad del modelo.

Fuente: (Apuntes de Geomática “Fotogrametría y SFM”, 2017)

Calidad del modelo	Número de fotografías			
	20-50	100	200	500
Mínima	100 MB a 300 MB	150 MB a 450 MB	300 MB a 1 GB	1 GB a 3 GB
Baja	500 MB a 1.5 GB	750 MB a 2.2 GB	1.5 GB a 4.5 GB	4 GB a 12 GB
Media	2 GB a 6 GB	3 GB a 9 GB	6 GB a 18 GB	15 GB a 45 GB
Alta	8 GB a 24 GB	12 GB a 36 GB	24 GB a 72 GB	60 GB a 180 GB
Máxima	32 GB a 96 GB	48 GB a 144 GB	96 GB a 288 GB	240 GB a 720 GB

El ordenador de sobremesa utilizado presenta las siguientes características:

- Procesador: i7, 3.0 GHz Quad Core w/ Hyper-threading.
- RAM: 32 Gb (hace poco se ha ampliado a 64 GB).
- SO de 64 bit.
- Disco duro para sistema operativo y programas: 500 GB SSD Drive.
- Disco duro para almacenamiento: 3 TB HDD
- Tarjeta gráfica: Nvidia GeForce GTX 680.
- ATI Radeon 7850 con 2 GB de memoria.

Para AutoCAD Civil 3D y el resto de los programas se ha utilizado un ordenador portátil de la marca Lenovo modelo ideapad 510 con las siguientes características:

- Sistema operativo Windows 10.
- Procesador Intel(R) Core™ i7-6500U.
- Memoria RAM instalada 16.0 GB.
- Disco duro para almacenamiento: 2TB
- Tarjeta gráfica NVIDIA GeForce GT 940MX con 4 GB de memoria dedicada.

3.5. Elementos auxiliares.

Puesto que se toman un número determinado de árboles en una parte de la finca para saber cuáles son, se ha utilizado como elemento auxiliar cinta de balizar de color rojo y blanco (Figura 21), para marcar los arboles de la finca que se han asignado para las mediciones de los distintos métodos utilizados para este proyecto. La cinta debe ser de un color visible y de un material que permita escribir en ella para numerar los árboles de las mediciones, lo que también será de utilidad para facilitar la orientación, directa o con el apoyo de croquis y planos, dentro de la propia finca.



Figura 21: Fotografía de distintas cintas de balizar.
Fuente: (Imágenes Google, 2017).

3.6. Objeto de estudio

Como ya se ha comentado en la introducción los objetos de estudio son naranjos. A título informativo, se hará una descripción del cultivo del Naranja.

El Naranja (Figura 22) pertenece a la Familia de la *Rutaceae*, del Género *Citrus* y Especie *Citrus sinensis* (L.) Osb. Este tipo de árboles tienen un porte reducido (6-10 metros), con ramas poco vigorosas, es decir casi tocan el suelo, y tronco corto.



Figura 22: Fotografía tomada en la finca “Los Naranjales”.

El Naranja es un frutal leñoso, que se cultiva por sus frutos de agradable sabor, con o sin semillas, dependiendo de la variedad, que se consume preferentemente en fresco, aunque también se comercializan en forma de zumo concentrado, en fresco, en mermeladas o jaleas.

Los Naranjos de estudio están plantados en seto con un marco de 6x4 metros, de ahí la dificultad de la toma de las fotografías que se desarrollará más adelante en el proyecto.

4. METODOLOGÍA

4.1. Toma de datos y trabajo de campo

Puesto que la toma de datos se realizó con cuatro métodos diferentes, los datos se tomaron en dos días distintos, con margen de una semana entre la toma de datos de un día y otro, para evitar diferencias significativas causadas por el crecimiento vegetativo de los árboles. El primer día, el 26 junio de 2017, se realizó el marcado de árboles elegidos y sus mediciones en campo con jalones. El segundo día, el día 3 de junio de 2017, se realizaron las segundas mediciones con la cámara fotográfica.

4.1.1. Toma de datos para el método del elipsoide.

La toma de datos para el cálculo del volumen mediante el método del elipsoide se realizó mediante el uso de jalones, donde en un primer lugar en gabinete se sacó un mapa de situación de la finca (Anejo 5), en donde se marcaron al azar cuarenta y seis árboles mediante el uso del programa AutoCAD.

Las mediciones se realizaron el día 26 de junio del 2017, como se comenta en el principio, donde en un primer lugar se marcaron los árboles con cinta de balizar, diferenciando los que iban a ser medidos de forma manual y los medidos mediante SFM. Una vez localizados y marcado todos los árboles del estudio se procedió a su medición.

$$V_E = \frac{4\pi}{3} \times E_a \times E_b \times E_c \quad (3)$$

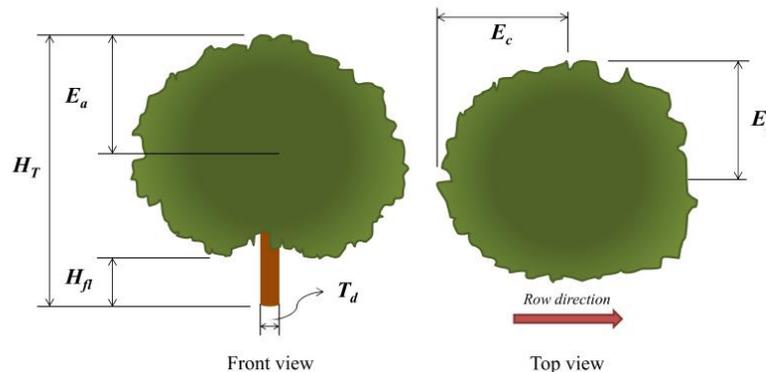


Figura 23: Dibujo la medición del método manual del elipsoide.

Fuente: (Artículo “Towards an Optimized Method of Olive Tree Crown Volume Measurement”).

Como se muestra en la figura 23, se fueron tomando las mediciones de la proyección del eje mayor de la copa, de su eje perpendicular y de las alturas del árbol, sus ramas altas y sus ramas bajas, para poder calcular la altura efectiva del árbol, con la ayuda del jalón. Los ejes de mayor copa se midieron colocando el jalón a ras del tronco hasta el punto más alejado de este. Una vez tomadas todas las medidas, se coloca el jalón en vertical y se mide la altura máxima del árbol, así como la altura media de las bajas del árbol (Figura 24).



Figura 24: Fotografía tomada en la finca “Los Naranjales”.

Las mediciones se realizaron entre dos personas, como se muestra en la figura 24, empleando, de media, cinco minutos por árbol, aunque ese tiempo es el empleado para medir los dos métodos juntos (el del elipsoide y el del volumen medio). También se realizaron pruebas con una persona sólo y se tardó diez minutos por cada árbol. Las mediciones manuales se realizaron en un total de cinco horas aproximadamente, incluyendo paradas debido al calor y el marcaje previo de árboles.

Los datos de las mediciones se incorporaron en una tabla realizada previamente en Excel (Anejos 2), para posteriormente realizar el cálculo

de los volúmenes de los árboles medidos con la ayuda de la fórmula del elipsoide descrita en anteriormente.

4.1.2. Toma de datos para el método Volumen Medio.

La toma de datos para el cálculo del volumen mediante el método del volumen medio se realizó también mediante el uso de jalones, ya que se midió a la vez que el método del elipsoide comentado antes. Como se comentó en el apartado anterior, las mediciones se realizaron el día 26 de junio del 2017, de aquellos árboles marcados con la cinta de balizar.

Como se muestra en la figura 25 el árbol se dividió en ocho vértices, separados unos de otros por 45° , con la ayuda de un jalón se iban midiendo la distancia del radio del árbol en ese punto, colocando el jalón desde el centro del tronco, hasta el punto más extremo del perfil para cada dirección considerada.

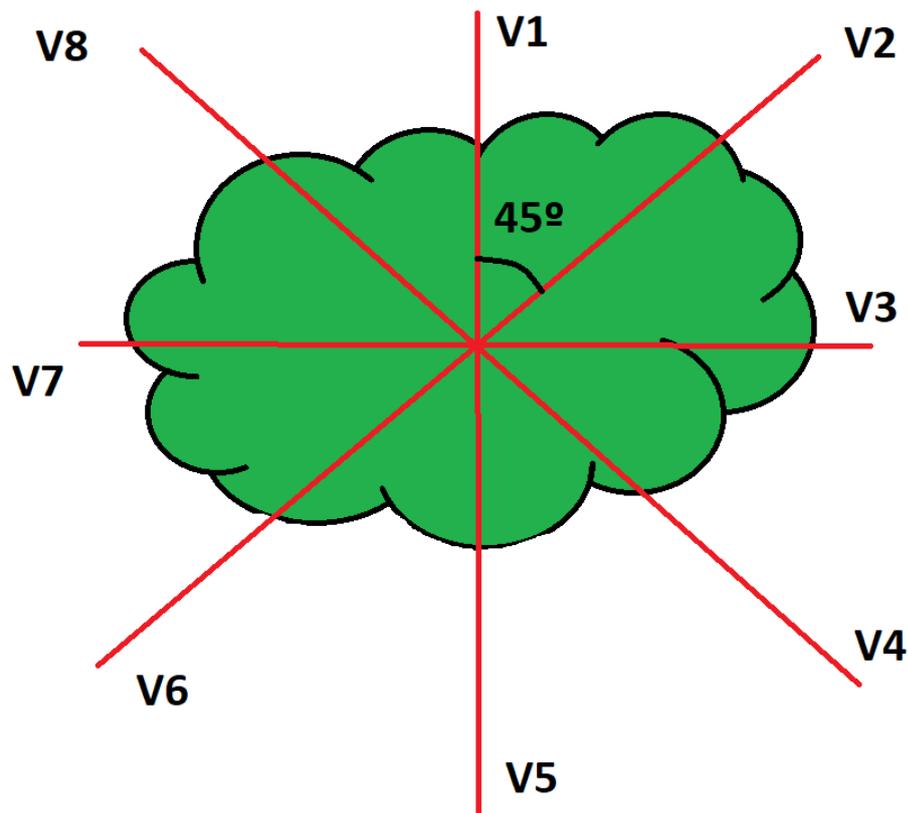


Figura 25: Dibujo de la disposición de los jalones para el método de medición manual del Volumen Medio.

Las mediciones manuales se realizaron en un total de cinco horas aproximadamente, incluyendo paradas debido al calor y el marcaje previo de árboles (Figura 26).

Los datos de las mediciones se incorporaron al final de la tabla realizada previamente en Excel del anejo 2.



Figura 26: Fotografía tomada en la finca “Los Naranjales”.

4.1.3. Toma de Fotografías

La toma de datos para el cálculo del volumen con el método de fotogrametría se realizó una semana después a la toma de las mediciones manuales (3 de Junio del 2017), para evitar variaciones de volumen por crecimiento vegetativo de los árboles.

Previamente en gabinete, al igual que en las mediciones de forma manual, se realizó un mapa de situación con el programa AutoCAD, en donde se marcaron los árboles que iban a ser medidos con dicho método (Anejo 5).

Esta toma de datos se realizó con la cámara Canon EOS 1100D, descrita en el apartado anterior.

La captura de imágenes se desarrolló a diferentes horas a lo largo del día, debido a falta de memoria, gasto de batería, demasiada luz y calor, unas fueron tomadas entre 11:30 hasta las 14:00, en donde se capturaron un total de dieciséis árboles; una segunda toma de capturas entre 18:30 y las 20:00, en donde se pudieron capturar sólo ocho árboles, debido a problemas con la batería; y por último los árboles restantes entre las 20:45 y las 22:00, con la captura de los trece árboles restante. En total se capturaron cuarenta árboles con este método, con un total de 1865 fotografías a lo largo de todo el día.

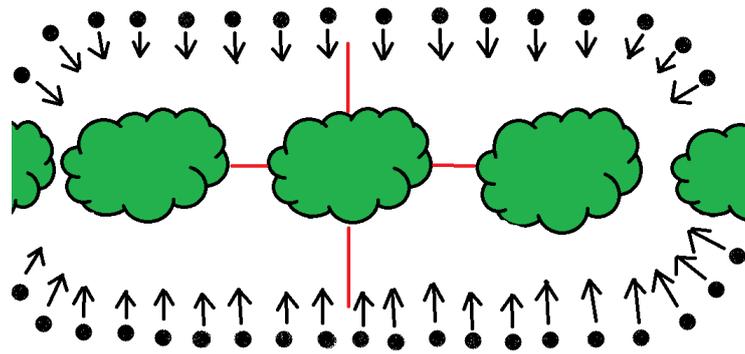


Figura 27: Dibujo de la disposición de la cámara fotográfica para el método de medición SFM.

La disposición de las capturas no se pudo realizar como objetos aislados, ya que el marco de la plantación no permitía rodear los árboles, lo que impidió realizar bien el solape. Para ello se combinaron dos técnicas, la captura de imágenes sobre fachadas y la captura de imágenes sobre objetos aislados, donde se tomaron tres árboles (Figura 27), de modo que el árbol de estudio se encontraba en el centro de estos, y se iban realizando capturas de fotografías combinando dichas técnicas para poder realizar el solape de una zona con otra, como se muestra en la figura 27.

Estas capturas se iban realizando o bien a dos alturas o a tres (Figura 28), dependiendo de la altura de los árboles, en donde se obtuvieron una media de 40 a 50 fotos por cada uno de ellos.



Figura 28: Fotografía tomada en la finca “Los Naranjales”

En el suelo se colocaron objetos con dimensiones conocidas, en concreto cuatro jalones dispuestos horizontalmente en el suelo, separados unos de otros por 90° y otro vertical pinchado en el suelo, para que posteriormente, cuando se llevarán los datos a gabinete, sirvieran para el ajuste de la escala y el cálculo de volúmenes (Figura 29).



Figura 29: Fotografía tomada en la finca “Los Naranjales”.

Por último, como se ha comentado anteriormente, para la captura de las imágenes para el otro método del cálculo de volumen (método de la silueta del árbol), en el cual también se utilizaron algunas de las fotografías tomadas para fotogrametría, no se pudieron tomar ocho vértices debido al marco de plantación de los naranjos, lo que obligó a emplear solo fotografías tomadas desde cuatro vértices (Figura 30) y aquellos árboles que coincidieran con el método de la elipse, más concretamente veinticuatro árboles, con una total de 96 fotografías tomadas. En estas también se colocaron los jalones como objetos con medidas conocidas, para que posteriormente en gabinete en el volcado de datos se pueda proceder al escalado de dichas fotografías para el cálculo de los volúmenes revolucionados.

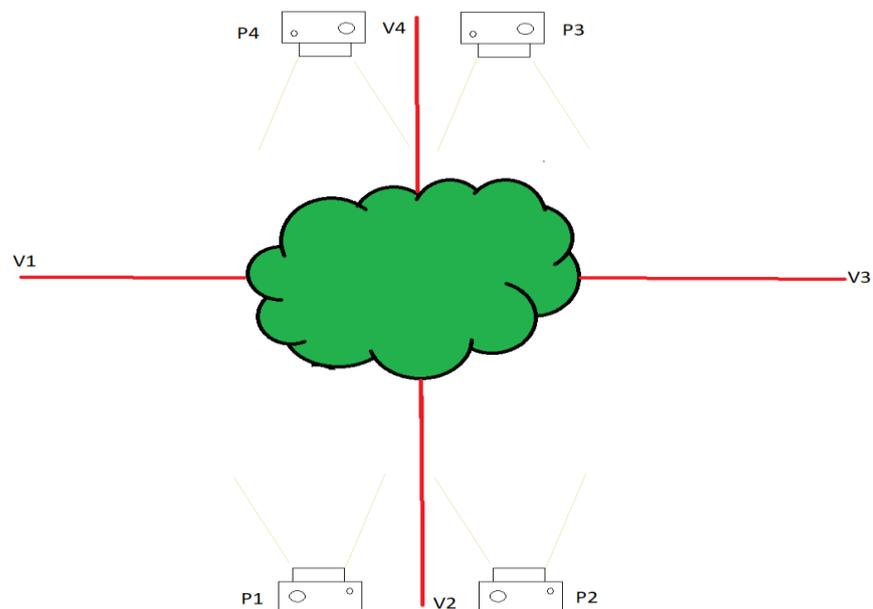


Figura 30: Dibujo de la disposición de los jalones y de la cámara fotográfica para el método de medición de la silueta.

Hay que comentar que el tiempo transcurrido en la captura de las imágenes fue de cinco a diez minutos en el caso de la toma de imágenes para el método de Fotogrametría, dependiendo del tamaño del árbol, más el tiempo de localización en la finca, colocación de los jalones y preparación de la máquina fotográfica y de dos a cinco minutos para la toma de imágenes para el método de la silueta, debido a la colocación de los jalones en el suelo.

Para finalizar, hay que comentar que los datos utilizados en gabinete, como se explicará más adelante, serán imágenes capturadas en el campo de prácticas de la Escuela de un ciruelo, puesto que el método de SFM con los naranjos no se pudieron hacer los modelos digitales en el programa. Por dicho motivo se decidió utilizar el material tomado para las pruebas iniciales, para poder explicar cómo hubieran salido los modelos de haber sido satisfactorias las mediciones realizadas a los naranjos. La toma de datos de los ciruelos se realizó como capturas de objetos aislados y a dos alturas.

4.2. Trabajo de Gabinete

Una vez completada la toma de datos o trabajo de campo (Tabla 3), el siguiente paso es el trabajo en gabinete. Este se dividió en dos partes, una la realizada con el programa Agisoft Photoscan y otra con el programa AutoCAD Civil 3D.

Tabla 3: Número de fotografías y tiempo empleado respecto al método utilizado.

MÉTODOS	TIPO MEDICIÓN	N.º ÁRBOLES	N.º FOTOGRAFÍAS	TIEMPO/ÁRBOL(MINUTOS)
ELIPSOIDE	Manual	46	-	10-15
SILUETA	Digital	24	96	2-5
SFM	Digital	40	1865	5-10

4.2.1. Trabajo con el Agisoft Photoscan

En primer lugar, explicar que el trabajo mostrado a continuación en Agisoft Photoscan corresponde a trabajos previos realizados, es decir más concretamente a un ciruelo del campo de prácticas de la Escuela, ya que como se comentará en el apartado de resultados y discusión, los valores obtenidos con las técnicas de fotogrametría (SFM) no resultaron satisfactorios.

El trabajo con Agisoft Photoscan es bastante intuitivo, ya que cuenta con un menú llamado “Flujo de trabajo” (Figura 31), que va guiando al usuario paso a paso en el proceso de modelado.

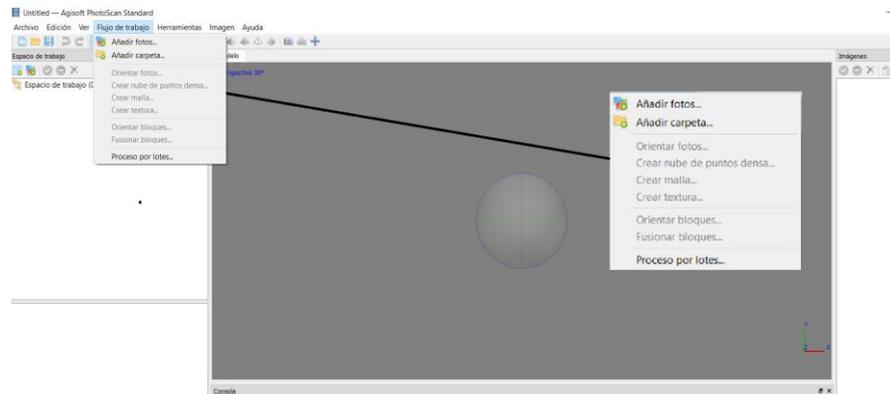


Figura 31: Captura de pantalla del menú "Flujo de trabajo".

Para la obtención del modelo 3D con Photoscan se lleva a cabo un proceso compuesto por cuatro pasos: orientación de las fotografías, creación de nube de puntos densa, creación de la malla y creación de la textura.

4.2.1.1. Carga y orientación de fotografías

En esta fase es importante haber eliminado previamente, de manera visual, aquellas fotografías que se consideren inservibles (baja calidad, borrosas, sobreexpuestas, excesivamente oscuras...), aunque el programa tiene una herramienta para evaluar la calidad de las fotos, de forma numérica y totalmente objetiva. Además, no es recomendable realizar ninguna modificación de las fotografías, sobre todo de su geometría, ya que al ejecutar el programa pueden producirse resultados no deseados.

Se mostrará, cómo se ha comentado anteriormente, un ejemplo con un árbol frutal de hoja caduca, concretamente un ciruelo.

Las fotografías se pueden cargar tanto desde la pestaña “Flujo de Trabajo”, pulsando “Añadir fotos” o desde el espacio de trabajo pulsando el icono “Añadir fotos...” (Figura 30). Es importante recordar que los formatos de fotografías que acepta el programa son: *.jpg, *.tiff, *.png, *.bmp, *.exr (OpenEXR), *.ppm y *.pgm (Portable Bit Map), *.mpo (Multi-Picture Object) y *.seq (Norpix Sequence File).

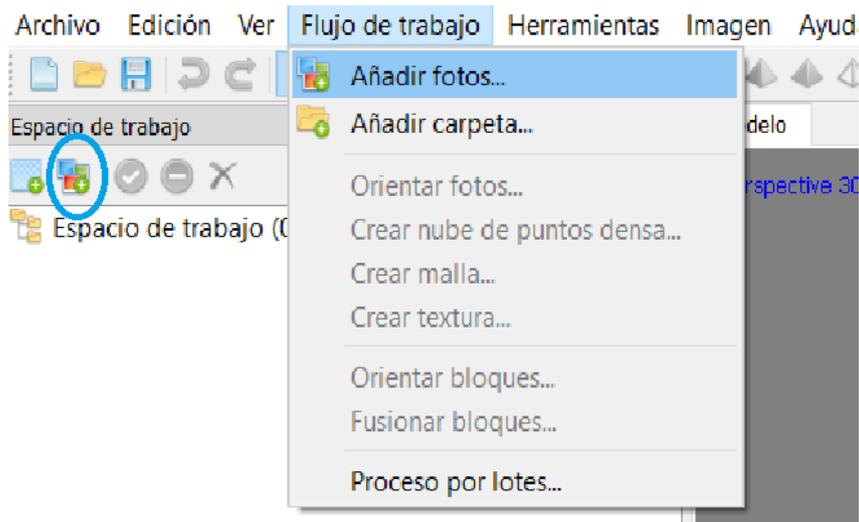


Figura 32: Captura de pantalla de la carga de imágenes en Photoscan.

Una vez que las fotografías han sido cargadas (Figura 33), se puede observar en el panel espacio de trabajo, el número de fotos que han sido cargadas y un indicador NA, esto indica que las fotos no han sido alineadas aún, pues los parámetros de orientación de la cámara externa no se han estimado para el conjunto de fotografías.

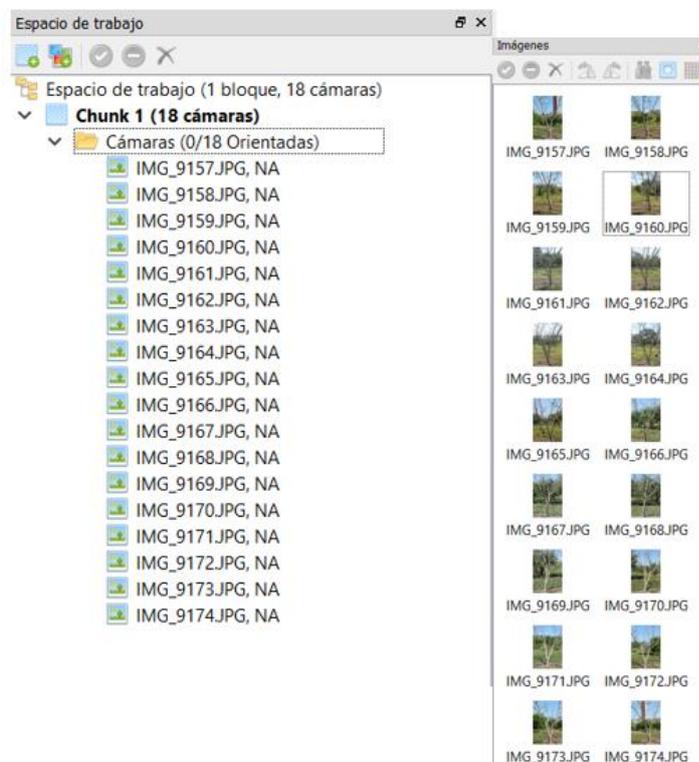


Figura 33: Captura del espacio de trabajo (izquierda) y captura de pantalla de las imágenes en miniaturas de las imágenes cargadas (derecha).

A continuación, ya se puede realizar el proceso de orientación de fotografías (Figura 34), para ello se pulsa sobre “Orientar fotos...”

de la pestaña flujo de trabajo. Al pulsarla se despliega una ventana, donde se puede elegir la precisión (alta, media, baja), con la que se pretende realizar el proceso. Cuanto más alta sea la precisión, mayor cantidad de puntos se obtendrán, pero en consecuencia, mayor será el tiempo de procesado. En el ejemplo se optó por fijar la máxima precisión. En esta etapa el programa busca los puntos comunes entre fotografías, calcula la posición de la cámara para cada imagen y los parámetros internos de calibración de la misma, y como resultado muestra una nube de puntos dispersa.

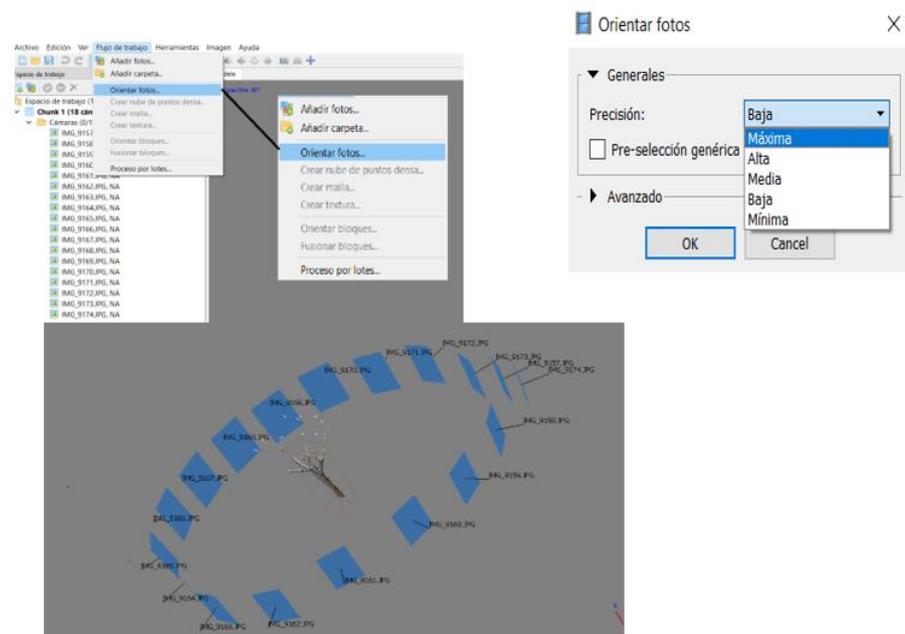


Figura 34: Capturas de pantalla del Proceso de "Orientación de fotos" (Arriba a la derecha), características para generar la orientación (Arriba a la izquierda) y posición de la cámara y nube de punto dispersa (Abajo en el centro).

4.2.1.2. Creación de nube de puntos densa

Después de alinear las imágenes, se procede a crear la nube de puntos densa. Este tipo de nube, a diferencia de la anterior, permite obtener un control mucho mayor sobre el proceso de obtención del modelo, ya que antes de crear la geometría, es decir la malla, se pueden limpiar o eliminar aquellos grupos de puntos que no sean necesarios.

Antes de empezar con la creación de la nube, es conveniente hacer uso de la opción “Redimensionar región”, de la barra de herramientas (Figura 35) para optimizar el trabajo y reducir el

proceso exclusivamente a la zona de interés. Al marcar esta opción se activa una especie de cubo, con unos vértices de color azul, los cuales se pueden desplazar hasta la posición que requerida con el puntero del ratón. Además, para ayudar en esta tarea, se cuenta con dos herramientas más, “Rotar región” y “Girar objeto”, las cuales permiten ajustar mejor la zona delimitada por el cubo.

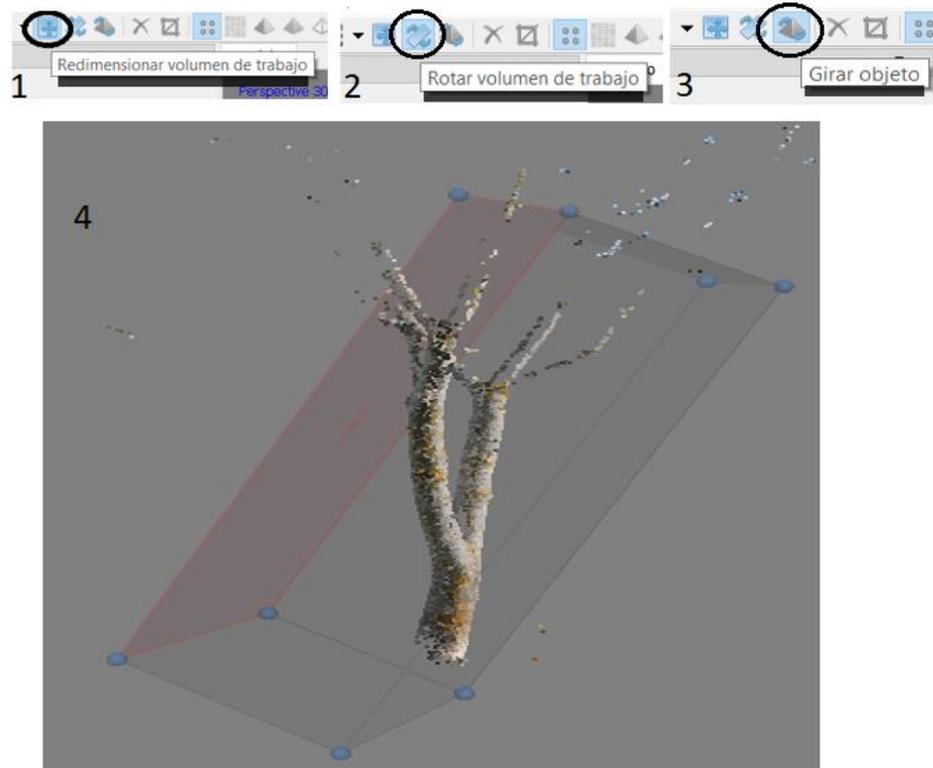


Figura 35: Captura de pantalla de la edición de la nube de puntos densa, donde captura 1 es "Opción de redimensionar la región", captura 2 "Opción de rotar la región", captura 3 "Opción de girar objetos" y captura 4 "Modelo en edición".

Una vez delimitada la zona, se procede a crear la nube de puntos densa desde la pestaña, “Flujo de trabajo, Crear nube de puntos densa...”. A continuación, se abre un cuadro de diálogo, donde se puede decidir la calidad de la nube de puntos (mínima, baja, media, alta y extra alta), la elección de una u otra, al igual que en el caso de la nube de puntos dispersa, dependerá del resultado final que queramos obtener y del número de fotografías que tengamos (Figura 36).

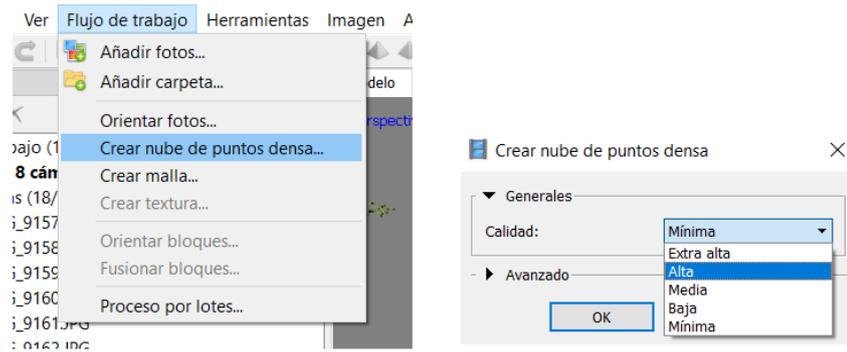


Figura 36: Captura de pantalla de pasos a seguir para crear la nube de puntos densa, a la izquierda "selección del proceso" y a la derecha "elección de la calidad del proceso".

Una vez creada la nube de puntos densa, aparece el modelo en edición con dicha nube de puntos creada, en este punto es posible visualizar el modelo de dos maneras (Figura 37), una con la opción de nube de puntos dispersa y otra con la opción de nube de puntos densa. En esta última el modelo se apreciará con más detalles y más real que en la nube de puntos dispersa.

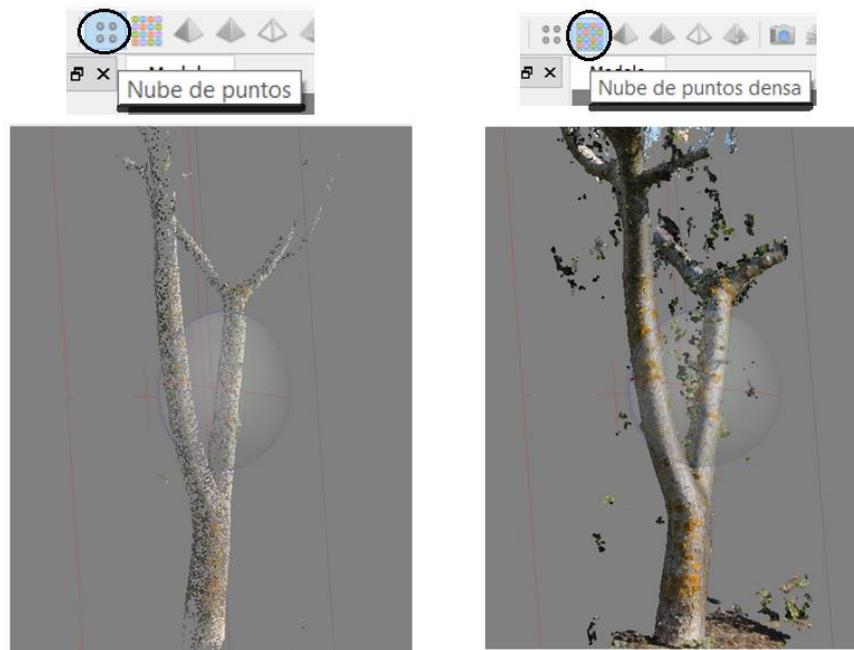


Figura 37: Captura de pantalla del modelo en edición, donde en la izquierda se encuentra el cuadro de opción y el modelo en edición con "la nube de puntos dispersa" y a la derecha se encuentra la opción y modelo en edición de "la nube de puntos densa".

Además de la herramienta para editar la nube de puntos, comentada anteriormente, el programa cuenta con otra serie de comandos que

permiten seleccionar, cortar, eliminar partes, etc., tanto de la nube de puntos dispersa como de la nube de puntos densa. La primera de ellas es la herramienta selección (Figura 38) que cuenta con tres opciones, (Selección rectangular, Selección circular y Selección libre), esta opción ofrece la posibilidad de seleccionar las zonas de la nube de puntos que se quieran editar.

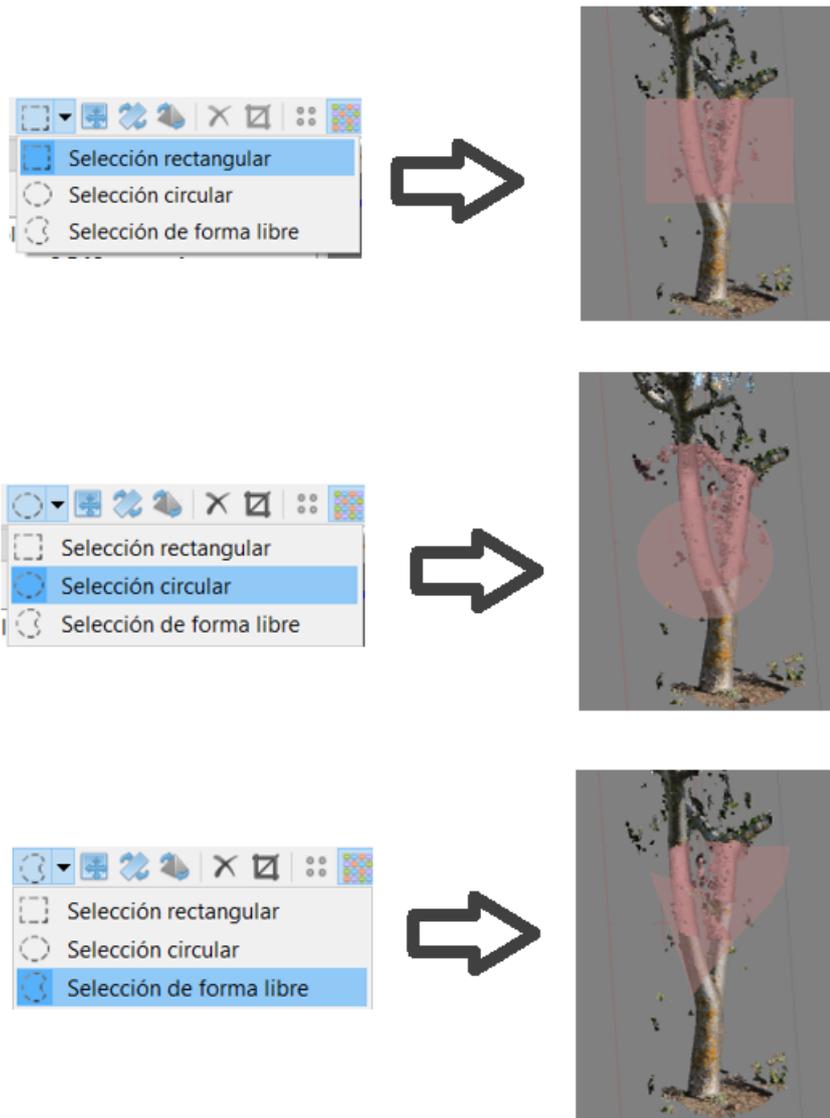


Figura 38: Capturas de pantalla de la Herramienta de selección, de arriba hacia abajo; "selección rectangular y modelo en edición", "selección circular y modelo en edición" y "selección libre y el modelo en edición".

Finalmente, las herramientas “Cortar selección” y “Borrar selección”, permiten eliminar el contenido seleccionado, pero cada una de una manera particular. “Borrar selección” elimina lo que se ha marcado directamente, mientras que “Cortar selección”, conserva lo marcado y elimina el resto (Figura 39).



Figura 39: Captura de imagen de borrado y cortado de la nube de puntos densa; modelo en edición (Izquierda) y opciones de borrado (derecha).

4.2.1.3. Creación de la malla

Antes de ejecutar la opción “Crear malla...”, resulta aconsejable realizar una limpieza, si cabe más meticulosa que la anterior, de la nube de puntos densa, con el objetivo de eliminar el ruido y los puntos que se consideren indeseados, de esta forma aceleramos el proceso de creación de la malla y se evitan efectos no deseados en la misma. Para ello, se puede hacer uso de las herramientas anteriormente explicadas. La malla se genera mediante triangulación, ya sea a partir de la nube de puntos arbitraria, que se formó en el proceso de orientación, o tomando como base la nube de puntos densa. Como es de esperar, el número de triangulaciones dependerá del número de puntos que tengan las correspondientes nubes, cuantos más puntos, mejor será la calidad de la malla obtenida.

Al igual que en los casos anteriores, para construir la malla se despliega la pestaña “Flujo de trabajo” y se selecciona “Crear malla...” (Figura 40). En la ventana que se abre se puede seleccionar el tipo de superficie, ya sea el modo arbitrario, cuando se trabaja sobre objetos cerrados como esculturas y edificios, o bajo relieve/terreno, a la hora de generar Modelos Digitales del Terreno. En el estudio de la forma de árboles se debe seleccionar la primera opción, es decir, “Arbitrario”.

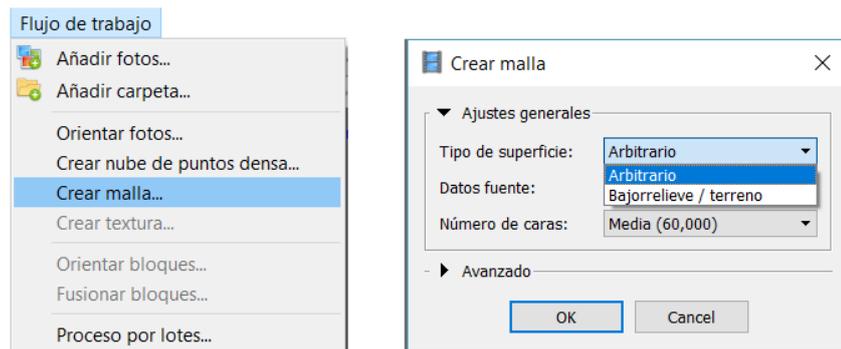


Figura 40: Captura de pantalla del proceso de creación de la malla, "Selección de opciones, creación malla"(izquierda) y "Selección del tipo de superficie"(derecha).

También se debe elegir la “Fuente de datos”, es decir, decirle al programa si se quiere que se utilice, para la generación de la malla, la nube de puntos densa o la dispersa. Evidentemente, aunque requiere de un mayor tiempo de proceso, siempre se elegirá la nube de puntos densa, ya que el resultado será de mayor calidad. Finalmente se elegirá el “Número de caras” que se considere más adecuado según el modelo (Figura 41), lo cual dependerá del resultado que se quiera y de la capacidad del ordenador disponible para el proceso de datos.

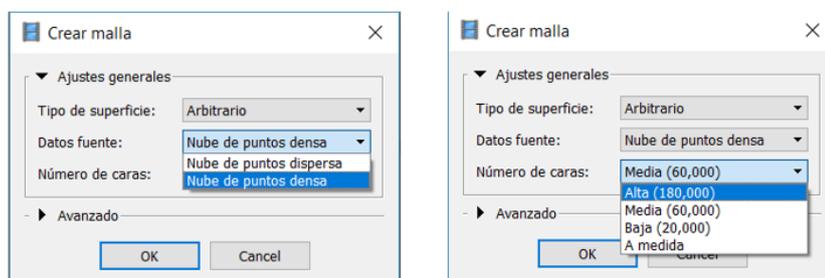


Figura 41: Captura de pantalla del proceso de creación de la malla, "Selección de los datos de la fuente"(izquierda) y "selección del número de caras del modelo" (derecha).

Una vez generada la malla, puede ser que haga falta editarla, ya sea eliminando algún componente separado o simplemente cerrando algún agujero de la misma, lo cual se puede hacer con PhotoScan. Sin embargo, si es necesaria una edición más compleja, es posible recurrir a programas especializados en la gestión de modelos digitales y nubes de puntos, ya que PhotoScan permite exportar la malla en distintos formatos.

4.2.1.4. Creación de la textura

Una vez creada la malla, se puede aplicar la textura. Para ello se sigue el procedimiento de siempre, desplegando la pestaña “Flujo de trabajo” y seleccionando “Crear textura...”, abriéndose un cuadro de diálogo donde se pueden elegir las características de la malla (Figura 42).

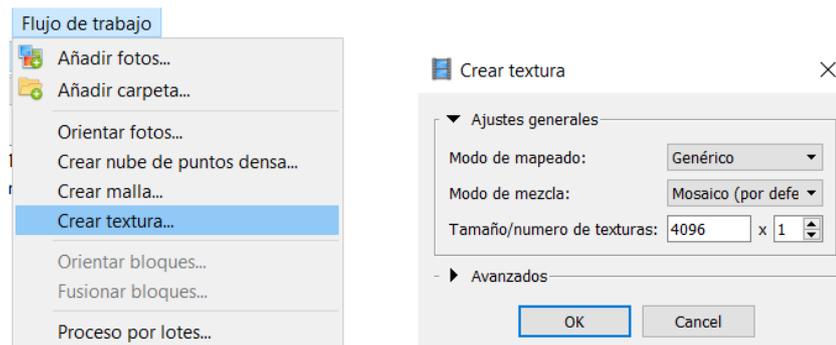


Figura 42: Captura de pantalla del proceso de creación de la textura; "Selección de la opción crear textura"(Izquierda) y "Opciones para crear la textura" (Derecha).

En el cuadro de diálogo que se despliega, se puede elegir el modo de mapeado, que puede ser: “Genérico” (es el modo por defecto, donde el programa intenta crear una textura lo más uniforme posible), “Ortofoto y Ortofoto adaptativa” (tiende a representar una textura más compacta ideal para superficies planas) y “Cámara única” (permite generar la textura a partir de una única fotografía), se seleccionará, por defecto, la opción “Genérico” (Figura 43).

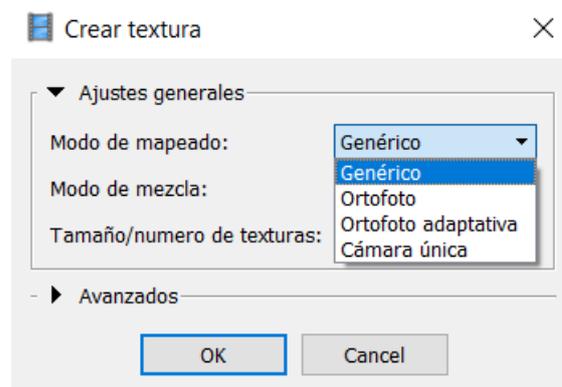


Figura 43: Captura de imagen de la elección del "Modo de mapeado" para la creación de la textura.

Por otra parte, se puede elegir el “Modo de mezcla”, donde es posible seleccionar el modo “Mosaico” (es la opción por defecto donde se utilizan las mejores imágenes para la creación de la

textura), “Promedio” (se usa el valor promedio de los píxeles de todas las fotografías), “Máxima intensidad” (en este caso el programa utiliza, para texturizar, la imagen con mayor intensidad de píxel) y “Mínima intensidad” (es el caso contrario al anterior). En el presente caso se seleccionará la opción de “Mosaico” que viene por defecto el programa (Figura 44).

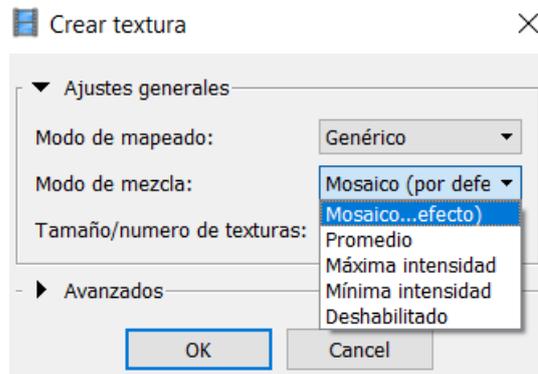


Figura 44: Captura de pantalla de elección del "Modo de mezcla" en la creación de la textura.

Finalmente, se puede elegir el “Tamaño/número de texturas”, cuyo valor por defecto es 5000, pero se puede elegir un valor superior si es necesario obtener mayor calidad en el texturizado- No obstante, esto aumenta el tiempo de procesado. Por último, si se abre la opción “Avanzado”, se puede activar la casilla “Permitir la corrección de color”, cuya misión es corregir el color del objeto, en los casos que se tengan fotos con demasiada variación en el brillo (Figura 45).

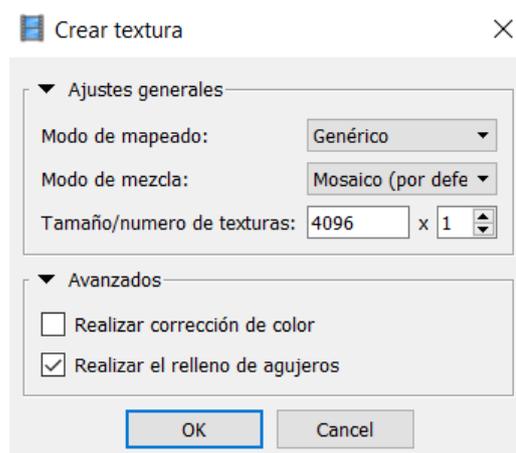


Figura 45: Captura de pantalla de "Opciones Avanzadas" para la creación de la textura.

4.2.2. Trabajo con AutoCAD

Para empezar, es conveniente conocer la interfaz¹⁶ del programa, sus prestaciones y limitaciones lo que servirá luego para trabajar con estilos, etiquetas y plantillas preestablecidas que ayuden a tener mayor productividad en referencia a trabajos similares.

En el presente trabajo se ha utilizado la versión 2016 de AutoCAD Civil 3D, en español. A este programa se ha añadido el paquete TAO, que aporta una serie de herramientas que facilitan la gestión de la información generada y la obtención de nuevos resultados, de Antonio Miguel Pérez Romero profesor de la Universidad de Sevilla en la ETSIA, del departamento de Ingeniería Gráfica y que ha sido uno de los tutores del presente proyecto

En principio, AutoCAD Civil 3D se iba a utilizar para generar los volúmenes por el método de la silueta, descrito anteriormente, pero, además, se empleó en la realización de una mejora del planteamiento del método de la silueta, que en resultados y discusión se comentarán.

4.2.2.1. Cálculo del volumen con AutoCAD Civil 3D por el método de la silueta.

Como se ha explicado en apartados anteriores, el cálculo del volumen de copa de un árbol mediante el método de la silueta se va a realizar mediante el revolucionado de la silueta de esta mediante el programa AutoCAD Civil 3D.

Para utilizar la extensión TAO para AutoCAD es imprescindible activarla, pulsando un icono que representa una llave.

Una vez activada la llave de TAO, se procede a insertar las fotografías de cada árbol, con objeto de trazar su silueta. Para ello es necesario acceder al panel de las herramientas y desplegar la opción insertar, donde se selecciona “Referencia de imagen ráster...” (Figura 46), que permite precisar el punto de inserción en la pantalla fijar la escala y su rotación, aunque a priori no se conocen ni sus coordenadas de inserción ni su escala.

¹⁶ **Interfaz**, se puede definir en términos informáticos como lo que se utiliza para nombrar a la conexión funcional entre dos sistemas, programas, dispositivos o componentes de cualquier tipo, que proporciona una comunicación de distintos niveles permitiendo el intercambio de información.

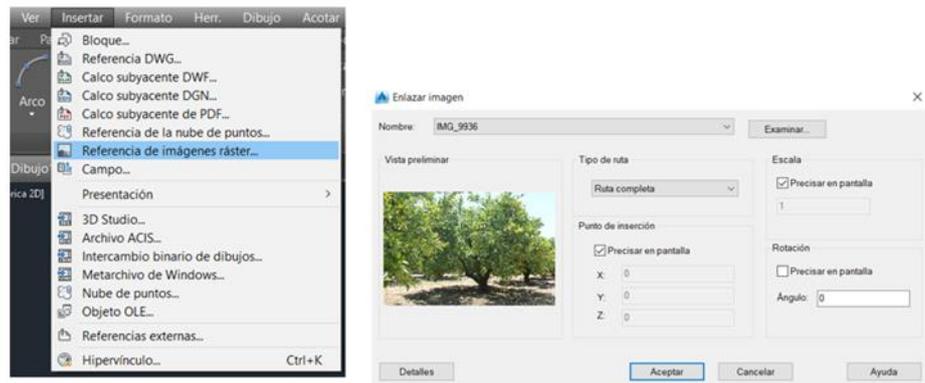


Figura 46: Captura de pantalla de la Opción para insertar la imagen en el programa, cuadro del proceso de "inserción de la imagen" (Izquierda) y cuadro de "enlazar la imagen" (Derecha).

Una vez insertada la imagen en el programa, antes de comenzar a trabajar en la creación de la silueta, se debe escalar la imagen. Para escalarla es necesario tomar dos puntos en la imagen, en donde la distancia entre ambos sea conocida. Para esa función se han empleado jalones topográficos.

Como se muestra en la figura 47 se han tomado dos puntos, en los cuales se trazan dos polilíneas una en cada punto tomado con una distancia "x" conocida. La distancia entre ambos puntos se conoce puesto que la longitud de cada tramo de jalón es de 1 metros y estos, a su vez, tienen franjas de 0.1 metros alternas, en colores rojo y blanco.



Figura 47: Captura de pantalla de uno de los árboles medidos con una toma de puntos en un jalón para realizar la escala de la imagen.

Una vez fijados los puntos de control, solo queda escalar la imagen adaptando sus dimensiones a las longitudes conocidas. Para escalar

la imagen no se necesita más que escribir en la barra de comandos la palabra “*ESCALA*” y seguir los pasos siguientes que nos indica el programa (Figura 48). Una vez escrito el comando “*ESCALA*” se le da al “*ENTER*” del ordenador y aparece en la barra de comandos “*ESCALA* Designe objetos”, en donde se irán seleccionando los objetos que se quiera escalar, en este caso la imagen del árbol y las dos polilíneas trazadas anteriormente.



Figura 48: Captura de pantalla de los procesos a seguir para escalar una imagen: 1 Opción del comando “*ESCALA*”; 2 Opción del comando “*Designar objetos*”; 3 Opción del comando “*Precise punto base*” y 4 Opción para designar el “*Punto base*”.

Una vez designados todos los objetos que se pretenden escalar, aparecerá otro mensaje en la barra de comandos que dice “*ESCALA* precise punto base”, para precisar el punto base se necesita previamente darle al botón *Ctrl* + Botón derecho del ratón, en este punto aparecerá un cuadro de diálogo en el cual se pincha en “*Punto Final*”, esta opción permitirá precisar el punto base que se quiere (el cuatro verde pequeño que aparece en la figura 48), a continuación no es más que precisar el punto base requerido.

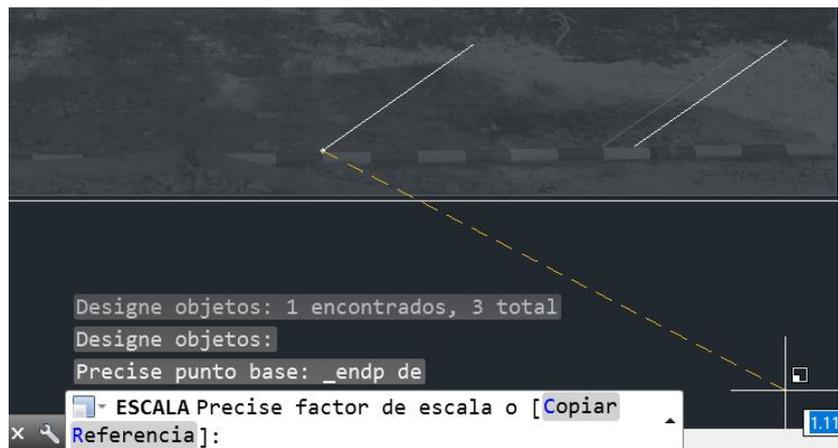


Figura 49: Captura de pantalla de los pasos a seguir para realizar la escala de la imagen.

Una vez designado el punto base en nuestra imagen, aparecerá en la barra de comando un nuevo mensaje “Precise factor de escala o [Copia Referencia]” (Figura 49), en este caso se debe escribir la “R” de referencia, puesto que se está usando dos puntos de referencia conocido para realizar la escala de la imagen y a continuación se pulsa de nuevo el “ENTER”.

Por último, se volverá a mostrar otro mensaje en la barra de comandos “Precise longitud de referencia”. Llegados a este punto se repetirá la opción anterior de asignar punto final y se pinchará de nuevo en el punto base y punto final, escribiendo a continuación la medida conocida que existe entre los dos puntos tomados como referencia (Figura 50). Para finalizar se le da al “ENTER” y la imagen estará escalada.

En un principio, la imagen pareció estar escalada correctamente, aunque a la hora de realizar el cálculo del volumen de la figura revolucionada, aparecieron resultados que no eran adecuados, ni reales, puesto que los árboles no eran tan grandes como para tener tanto volumen de copa, por tanto se decidió volver a escalar todo el trabajo sobre la polilínea cerrada ya creada, puesto que se tenía la longitud del vértice utilizado en todos los árboles, escalando estos de la misma forma descrita anteriormente, y ya dando unos resultados más correctos.



Figura 50: Captura de pantalla de la precisión de la medida conocida en el proceso de escalar la imagen.

Acto seguido de tener escalada la imagen se comienza a construir la silueta de esta, para más tarde calcular su volumen.

Para crear la silueta de la copa del árbol, previamente hay que dibujar un eje, que será el que sirva más adelante, como su propio nombre lo indica, como el eje de revolución para generar la figura. Este eje se debe dibujar, puesto como se explicará más adelante separará la zona que se desea revolucionar, puesto que no se podrá realizar la silueta del árbol completo con una foto por motivos de espacio, debido al marco de plantación, que impedía capturar el árbol completo en una sola imagen.

Para la creación del eje sólo se debe pinchar en el icono polilínea y dibujar con el ratón una línea perpendicular a lo que sería el suelo de la imagen (Figura 51). Este eje creado, se debe cambiar de capa o crear una nueva capa para esta línea y llamarlo “eje árbol”.



Figura 51: Captura de pantalla del proceso de realización del eje del árbol.

Realizando un inciso o paréntesis con lo que se está explicando, en este tipo de proyectos es aconsejable organizar cada polilínea creada u objeto en distintas capas, ya que será más fácil a la hora de trabajar y visualmente se entenderá todo mucho mejor. Con las capas se puede obtener este nivel de control organizando los objetos del dibujo en capas asociadas a una función o un objeto específico. Puede resultar útil imaginar que las capas son como hojas de plástico transparente (Figura 52).

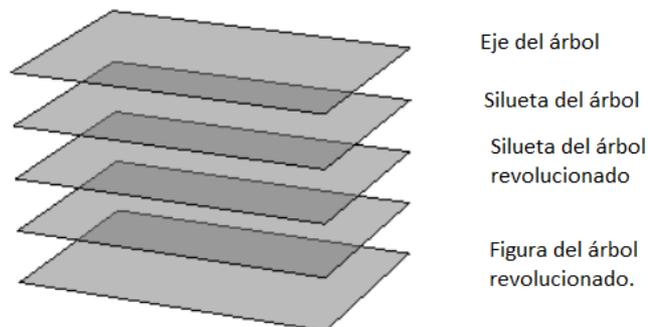


Figura 52: Captura de pantalla de ejemplo de organización de distintas capas.
Fuente: (knowledge.autodesk.com).

Para crear u organizar las CAPAS sólo hay que abrir el Administrador de propiedades de capas, o también se puede escribir CAPA en la ventana de comandos o bien hacer clic en la herramienta “Propiedades de capa” en la cinta de opciones (Figura 53).

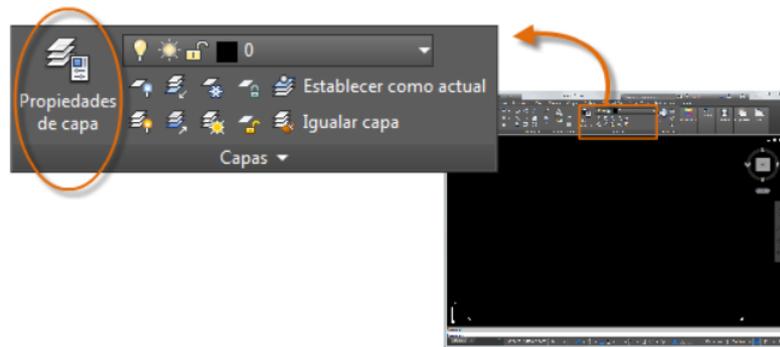


Figura 53: Captura de pantalla de la herramienta "Propiedades de capa".
Fuente: (knowledge.autodesk.com).

A continuación, se señala lo que el Administrador de propiedades de capas muestra en este dibujo (Figura 54). Como se indica, “eje del árbol” es la *capa actual*. Todos los nuevos objetos se colocan automáticamente en esa capa. En la lista de capa, la marca de verificación verde junto a la capa “eje del árbol” confirma que es la capa actual.

En la columna etiquetada “Activado”, se debe comprobar que los iconos de bombillas de dos capas están apagados. Estas capas se han desactivado para ocultar sus polilíneas, ya que no interesa que se vean.

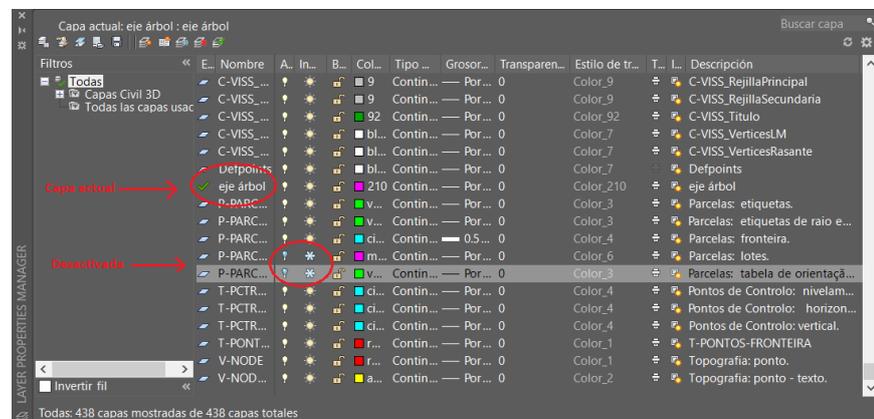


Figura 54: Captura de pantalla del "Administrador de propiedades de las capas".

Para crear una nueva capa, haga clic en el botón que se muestra, dentro de administrador de propiedades y escriba el nombre de la nueva capa. Para convertir una capa diferente en la actual, haga clic en la capa y, a continuación, haga clic en el botón indicado (Figura 55).

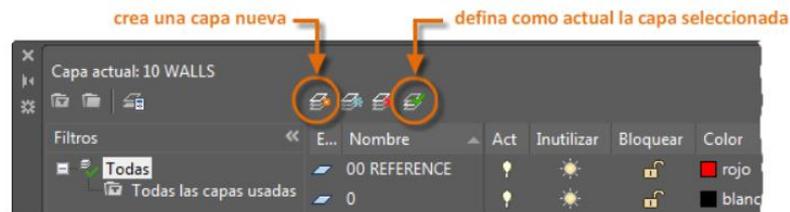


Figura 55: Captura de pantalla de cómo se crea una nueva capa y como se modifica una existente.

Fuente: (knowledge.autodesk.com).

Una vez que se ha realizado este inciso sobre las características y como se crea una capa nueva, que es interesante saber para realizar un proyecto ordenado, se va a continuar con la explicación del trabajo en gabinete para la obtención del volumen de la copa del árbol mediante la silueta de este.

Una vez dibujado el eje del árbol, se procede a la creación de otra polilínea cerrada, con el nombre “silueta del árbol” de color azul alrededor del árbol, es decir irá dibujada en el borde de la copa del árbol, para convertirse en la silueta de la copa de este (Figura 56).



Figura 56: Captura de pantalla de la creación de la silueta del árbol.

Esto se realizará pinchando en el comando polilínea y se ira dibujando sobre la imagen, simplemente haciendo clic con el ratón en los puntos que se desea, para formar dicha silueta de la copa, y una vez llegado al comienzo de la polilínea solo se teclea la letra “c” y la polilínea se cerrará (Figura 57).



Figura 57: Captura de pantalla de la polilínea cerrada de nuestra silueta del árbol.

Esta polilínea cerrada (Figura 57), se ve claramente que no se ha seguido todo el contorno completo del árbol, ya que no interesa y es una pérdida de tiempo, es decir, como se muestra en la imagen, el árbol no sale completo, y esto fue debido al marco que presentaban estos en la finca, que impidió que se realizara por completo la imagen, por ese motivo se decidió tomar cuatro vértices, ya que fue imposible sacar los ocho como hubiese sido lo más correcto. Por tanto, se irá revolucionando la mitad correspondiente al vértice que interese del árbol, en este caso en nuestra Figura 57 es la zona derecha, y a continuación se debe realizar otra polilínea de la zona deseada y descartar la que no interesa, en este caso la zona izquierda de la imagen.

El siguiente paso es crear una capa nueva, con el nombre “silueta del revolucionado” con el color rojo. Esta capa servirá para diferenciar la anterior “silueta del árbol”, con la nueva que a continuación se creará, que será la que interesa revolucionar más adelante.

Para ello, se introduce en la barra de comando “POLCONT”, y se le da al “ENTER”, este comando permite crear una región o polilínea cerrada a partir de un área cerrada. Cuando se le da al “ENTER” aparecerá un cuadro de diálogo (Figura 58) el cual pide que se designen los puntos para crear la región o polilínea cerrada, en el cual se puede elegir el tipo de objeto donde que el programa vaya a crear la nueva polilínea o región. En este caso se elige el

tipo de objeto “polilínea”, puesto que la silueta está realizada mediante una polilínea cerrada.

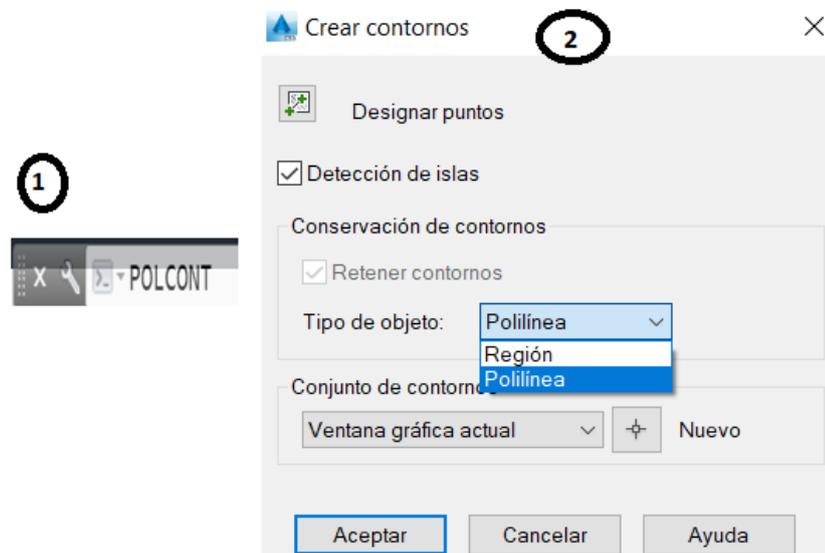


Figura 58: Captura de pantalla de los pasos a seguir para crear un contorno, 1 es el comando "POLCONT" y el 2 el cuadro de dialogo para crear el contorno.

A continuación, se pincha con el ratón el cuadro “designar objeto”, con el que se determinará un contorno a partir de objetos existentes que forman un área cerrada alrededor de un punto específico, como es la silueta del árbol creada antes y el eje del árbol (Figura 59).



Figura 59: Captura de pantalla de la imagen de la creación de la nueva silueta.

Una vez que se ha dado a “ENTER” se observa la nueva polilínea creada de color rojo y la anterior de color azul en la zona que no se desea revolucionar (Figura 60).

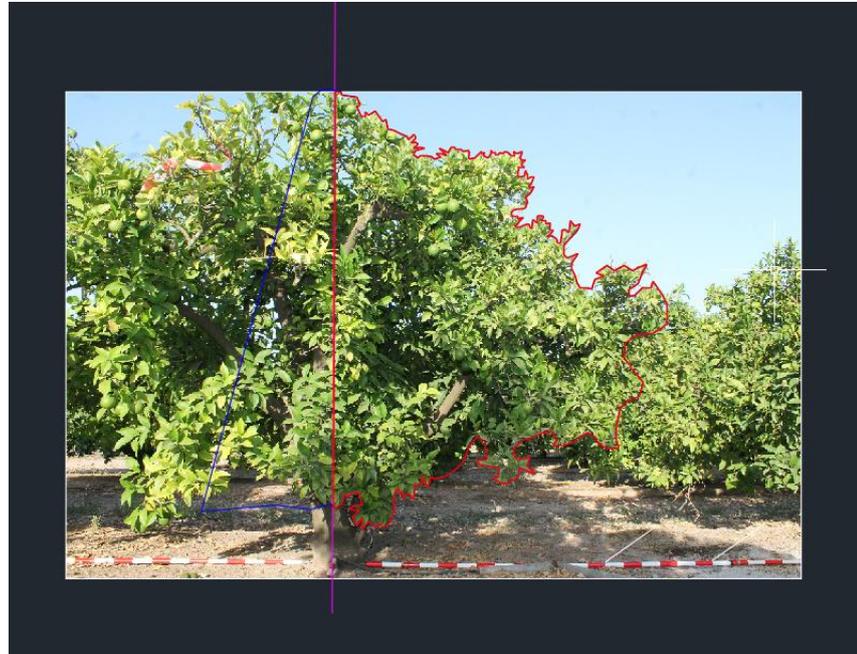


Figura 60: Captura de pantalla de la imagen de la nueva silueta creada y todos los elementos de nuestro diseño.

Como se ha explicado anteriormente, no se pudo sacar el árbol completo en la imagen debido al marco de plantación, la polilínea cerrada deseada o la silueta, descrita en la figura 60 de color rojo, será la zona que se va a revolucionar, en donde el eje creado con anterioridad será el que sirva como separador de ambas zonas y como eje principal de la figura que se creará más adelante en el revolucionado. Como se muestra en la figura 60 el nivel de detalle de la polilínea que representa la silueta es el máximo que el ojo nos permite, ya que la silueta en algunas zonas de la imagen es creada por donde se intuye que va el límite de la copa del árbol, puesto que en algunas fotos el nivel de solape que tienen las copas unas con es tan alto, debido al marco y su morfología, que es complicado realizar la silueta exacta.

Una vez que se ha creado la nueva polilínea, lo siguiente será crear una copia de ella y desactivar todas aquellas capas (polilínea de la escala, imagen, silueta del árbol, etc.), que no se quieran ver para trabajar sólo sobre la polilínea copiada.

Para crear la copia de la polilínea sólo hay que pinchar en la barra de herramientas en el icono copiar y designar los objetos que se desean copiar, en este caso el eje del árbol y la silueta de revolución. Estas se moverán con el ratón y se colocarán al lado de lo anterior (Figura 61).

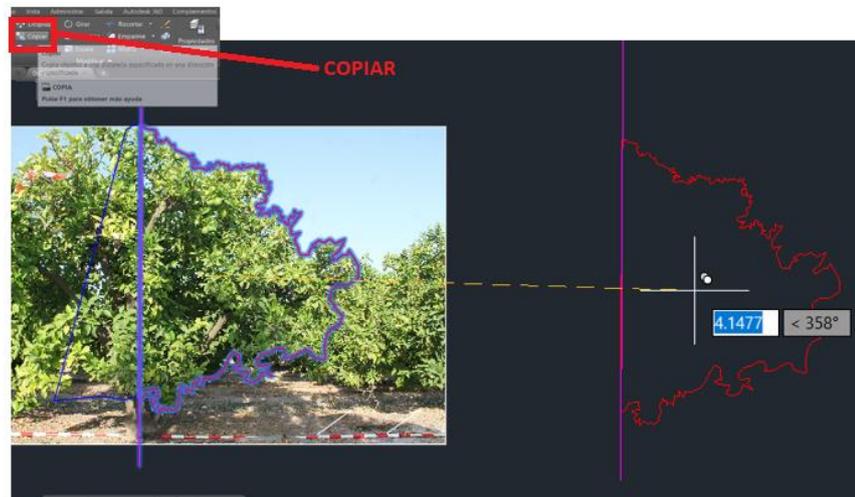


Figura 61: Captura de pantalla de la copia de elementos.

Seguidamente, se abre “propiedades de capas” y se desactivan todas aquellas que no se quieran ver en el área de trabajo, realizándolo como se explicó en el inciso “Capas”.

A continuación, se procede a realizar el revolucionado de la polilínea cerrada “silueta de revolución”. Para ello se pincha en la barra de herramientas “Dibujo → Modelado → Revolución” (Figura 62).

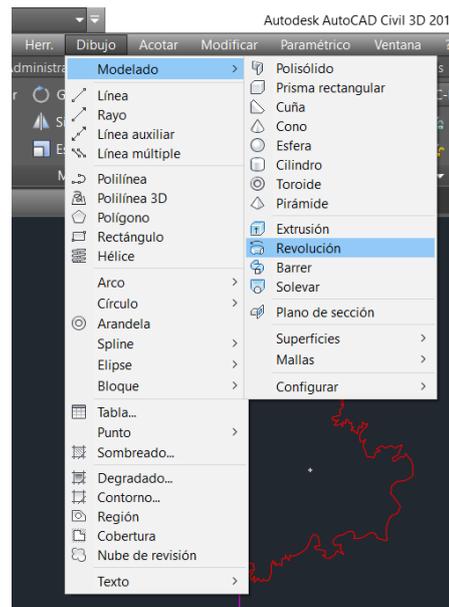


Figura 62: Captura de pantalla de la barra de herramienta para realizar un revolucionado.

La barra de comando mostrará el mensaje “Diseñe objetos para revolución”, por lo que se pincha la polilínea cerrada “Silueta de revolución” y se le da al “ENTER”.

Una vez que se haya designado el objeto de revolución, la barra de comando volverá a mostrar otro mensaje pidiendo “Precisar el punto inicial del eje o defina el eje”, en este punto se pincha primero en la base del eje, creado como “eje del árbol” inicialmente, y otra vez en el final (Figuro 63).

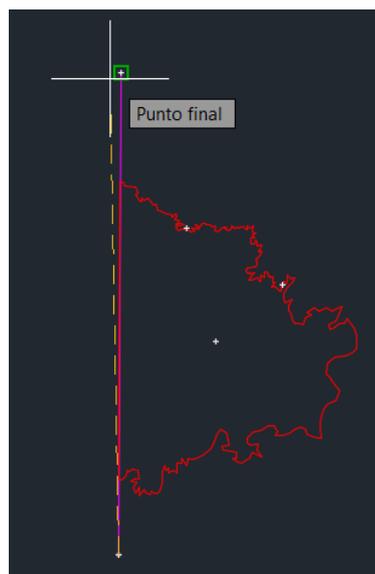


Figura 63: Captura de pantalla del proceso de creación de una figura de revolución.

Llegado a este punto el programa pide que se precise el ángulo de revolución del objeto designado, que en este caso el ángulo es 360° y se dará a “ENTER”, obteniendo una superficie cerrada que sería la correspondiente a la copa del árbol en uno de sus vértices (Figura 64).

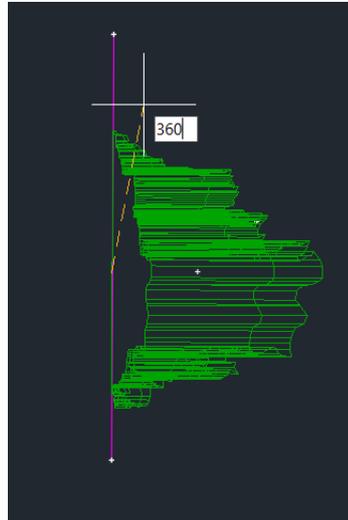


Figura 64: Captura de pantalla del proceso de creación de una figura de revolución.

Una vez obtenido el modelo revolucionado, este se puede cambiar la vista, pudiéndose ver el modelo en 3D (Figura 65) o cambiar para que se vea cualquiera de sus caras, simplemente pinchando en vistas y cambiar la órbita a órbita 3D.

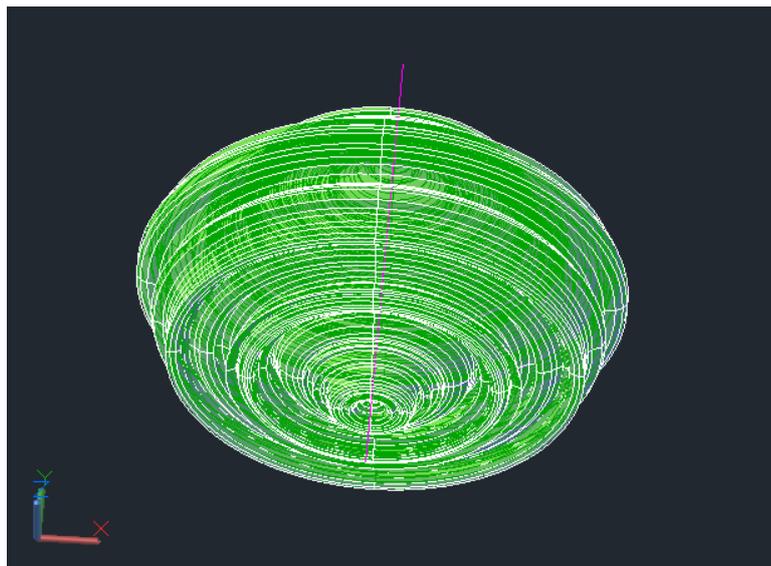


Figura 65. Captura de pantalla de la figura revolucionada en vista 3D

Por último, se procede al cálculo del volumen de dicha figura, simplemente pinchando en el icono “Volumen” o escribiendo volumen en la barra de comando, en donde se designa la figura y se da al “ENTER”, y directamente aparecerá el volumen de esta. También se puede calcular el volumen de la figura con el icono y rotular el valor de dicho volumen para que aparezca junto a la figura y no tener que estar mirando el volumen de nuevo o apuntarlo en otro lado (Figura 66 y Figura 67).

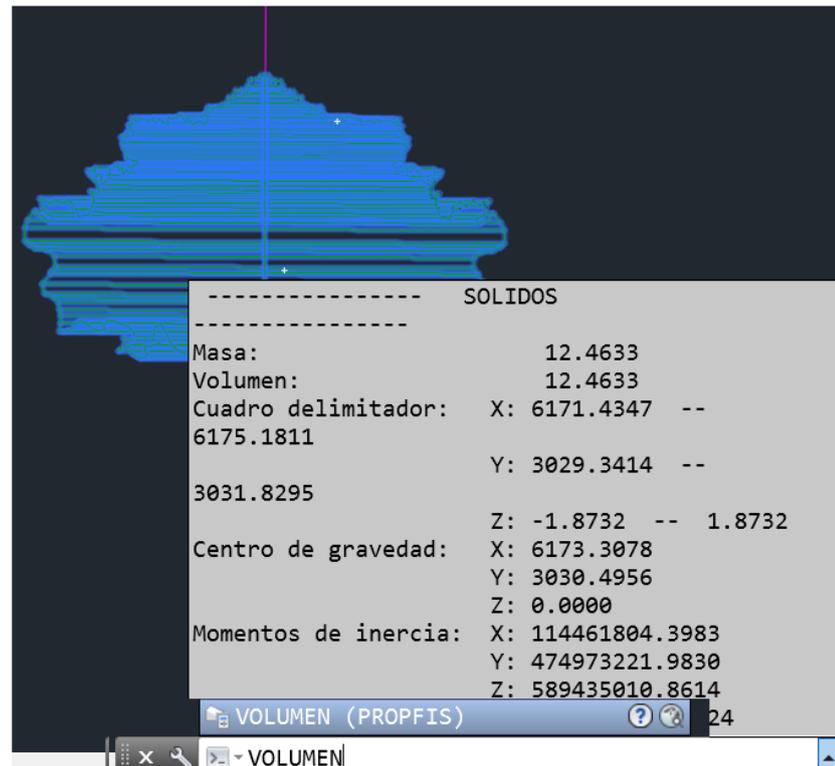


Figura 66: Captura de pantalla del cálculo de volumen escribiendo el comando.

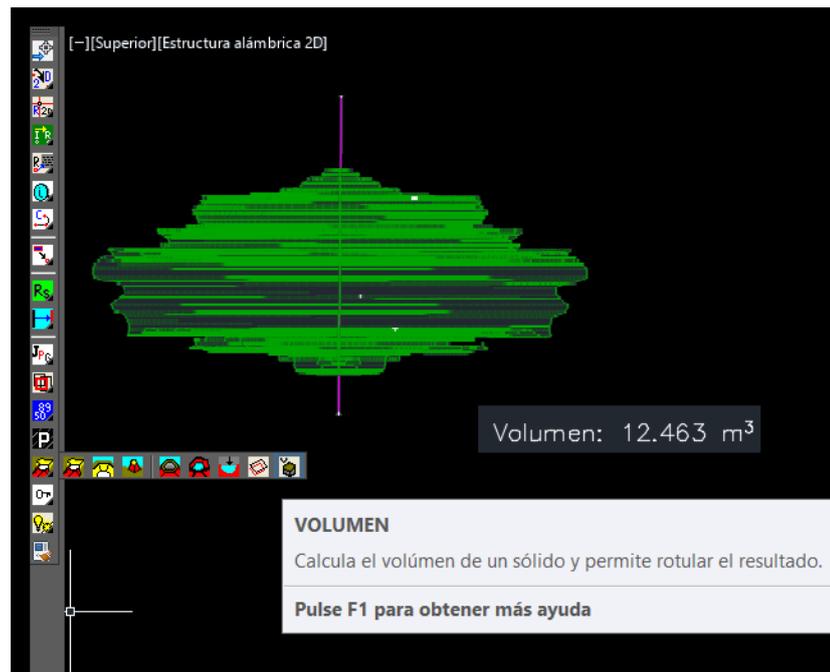


Figura 67: Captura de pantalla del cálculo del volumen mediante el icono.

Como se comentó antes, se tuvo que realizar de nuevo el proceso de escalar la imagen, debido a que los volúmenes calculados no eran cantidades que se semejaran a la realidad de dichos árboles elegidos. Estos se escalaron de nuevo midiendo la anchura de la silueta creada de la zona interesada a calcular, y al no corresponder con los datos manuales que se tenían se volvió a cambiar la escala, puesto que había mediciones que sobrepasaban los cuatro metros y los árboles elegidos no superaban ni los tres. Se procedió a cambiar la escala, teniendo de referencia en este caso los datos tomados manualmente para el otro método, puesto que se conocía la anchura de la copa en cada vértice utilizado.

Estos datos que daban inicialmente antes de cambiar la escala se pudieron deber a una deformación de la imagen de la cámara, puesto que los jalones estaban colocados en el suelo, y no eran el objeto principal del enfoque, por tanto, genera una deformación en la imagen. Esto es debido a que la imagen proyectada no es plana, sino que tiende a curvarse mientras más se aleja el objeto del enfoque. Esto es un problema común que tienen las cámaras, que provocan distorsiones cóncavas o convexas producidas generalmente por la lente (Figura 68). Estos problemas pueden arreglarse mediante programas informáticos, pero es algo que no es necesario en este proyecto, puesto que con un ajuste de la escala

en el programa AutoCAD, que es el utilizado, es suficiente para obtener resultados correctos.



Figura 68: Imagen de la distorsión creada con una cámara fotográfica.

Como se ve claramente en la figura 68, la imagen se va deformando por los lados a medida que se aleja del enfoque que estaría en el centro de esta. Esto es lo que le ha ocurrido, no tan claro, a las fotos tomadas para dicho método.

Por último, cuando se ha calculado el volumen de uno de los vértices del árbol, se procederá a realizar las mismas operaciones para las tres fotografías restantes, obteniendo un volumen de cada una de ellas, realizándose una media aritmética de los cuatro volúmenes para obtener el volumen final de la copa del árbol y así sucesivamente con todos los veinticuatro árboles que se tomaron para este método.

Los datos del cálculo de los volúmenes se incorporaron en una tabla realizada previamente en Excel (Anejos 3), para posteriormente realizar las gráficas para la comparación de resultados y discusión.

4.2.2.2. Mejora del planteamiento del método de la silueta.

Para mejorar el planteamiento del método de la silueta en el cultivo estudiado, se ha pensado realizar, un nuevo cálculo del volumen de la copa de los naranjos, utilizando el método de la silueta, y tomando, a modo de ejemplo, una única imagen de cinco árboles seleccionados al azar, a los que se ha calculado el volumen. En base al uso de un número creciente de punto para definir la silueta, y comenzando por cinco puntos (Figura 69).

En cada paso se realiza el revolucionado de la silueta creada mediante polilínea cerrada, mantenido los puntos anteriores y añadiendo cinco más, utilizándose así un número creciente de puntos.



Figura 69: Captura de pantalla de la figura creada con cinco puntos en la silueta inicial.

En la figura 70 se muestra todas las figuras creadas, y donde se observa que a medida que se añaden puntos, la figura se parece más a la creada con anterioridad. En la cuestión al volumen, este va disminuyendo a medida que mayor cantidad de puntos se toma, acercándose al valor obtenido en el anterior. Dada una cierta cantidad de puntos el volumen no se modifica significativamente, lo cual indica que se ha llegado al óptimo del proceso para el cultivo. Un incremento de puntos sólo supondría un mayor e innecesario tiempo de computación y de trabajo de gabinete que no se reflejaría en un incremento de la precisión del cálculo del volumen.



Figura 70: Captura de pantalla de todas las siluetas creadas.

Los datos del cálculo de los volúmenes se incorporaron en una tabla realizada previamente en Excel (Anejos 4), para posteriormente realizar las gráficas para la comparación de resultados y discusión.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en cada uno de los métodos utilizados para la realización de este proyecto.

Con respecto al método SFM, el software Agisoft Photoscan, no fue capaz de diferenciar ni realizar el solape de las imágenes de los árboles, es decir fue imposible la orientación de las fotografías y con ello la comparación con los otros métodos estudiados. El programa sólo fue capaz de orientar cinco imágenes con respecto a un total de cuarenta y ocho, en uno de los ejemplos (Figura 71).

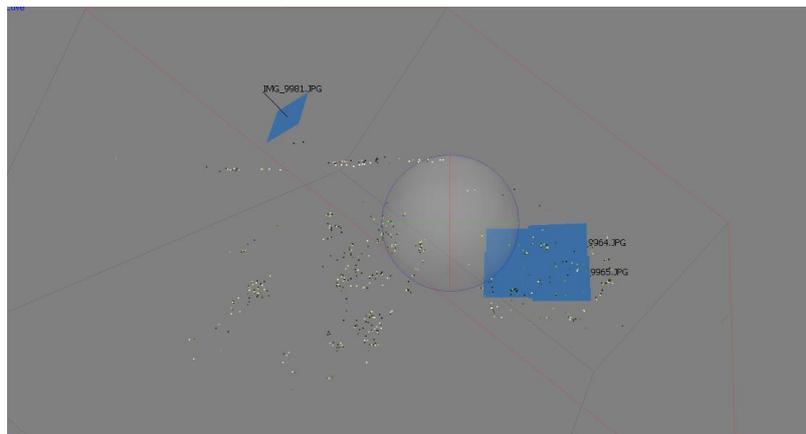


Figura 71: Captura de pantalla del resultado de la orientación de las imágenes de los naranjos.

Esto pudo ser debido a que el programa se colapsaba con la gran cantidad de elementos del mismo color y formas iguales, siendo incapaz de diferenciar un árbol de otro.

También, otro problema pudo ser el marco tan reducido en el que se encontraban situados, que puede ser causante de que las imágenes no se pudieran orientar con el programa correctamente, puesto que no se pudieron realizar las capturas de imágenes como objetos aislados, creando fallos a la hora del solape de las primeras fotografías con las últimas tomadas. Puesto que esto se puede comprobar con una prueba previa realizada a un naranjo en solitario, de copa poco densa, fondo oscuro y altura reducida, aproximadamente un metro y medio, en donde se pudo realizar la orientación de las imágenes y su posterior realización del modelo digital (Figura 72).

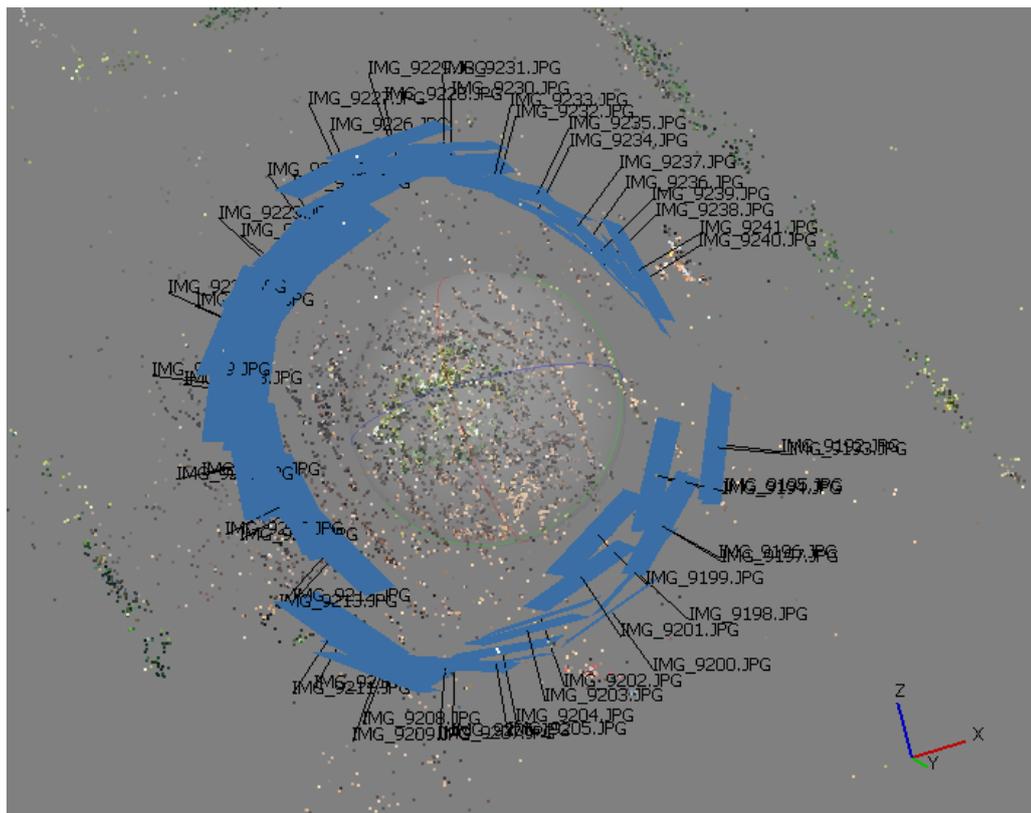


Figura 72: Captura de pantalla de la orientación del ejemplo del naranjo.

La densa copa, también se cree que puede ser la causante de los resultados obtenidos en este método, puesto que, pruebas realizadas con anterioridad en otros árboles de hoja caduca y algunos perennes de poca copa, los modelos salieron perfectamente, como el ejemplo comentado anteriormente del naranjo aislado.

Para el resto de métodos, que a continuación se desarrollan, si se pudo comparar unos con otros.

La tabla 4 resume los parámetros medidos y calculados en los ensayos. Los árboles de la parcela resultan ser de pequeño tamaño, con una altura total media de 2.3 m. Esta variable resulta ser la más constante de todas las determinadas, con un coeficiente de variación del 7%. Los ejes mayores y su perpendicular (entendido conceptualmente como eje menor) resultan de dimensiones promedio equivalentes (3.5 y 3.6 m), y presentan una correlación lineal de Pearson, utilizada para medir la fuerza de la asociación lineal entre pares de variables, igual a 0.6 (p-valor<0.0001). Esto indica que los árboles presentan una cierta similitud en el crecimiento en ambos ejes.

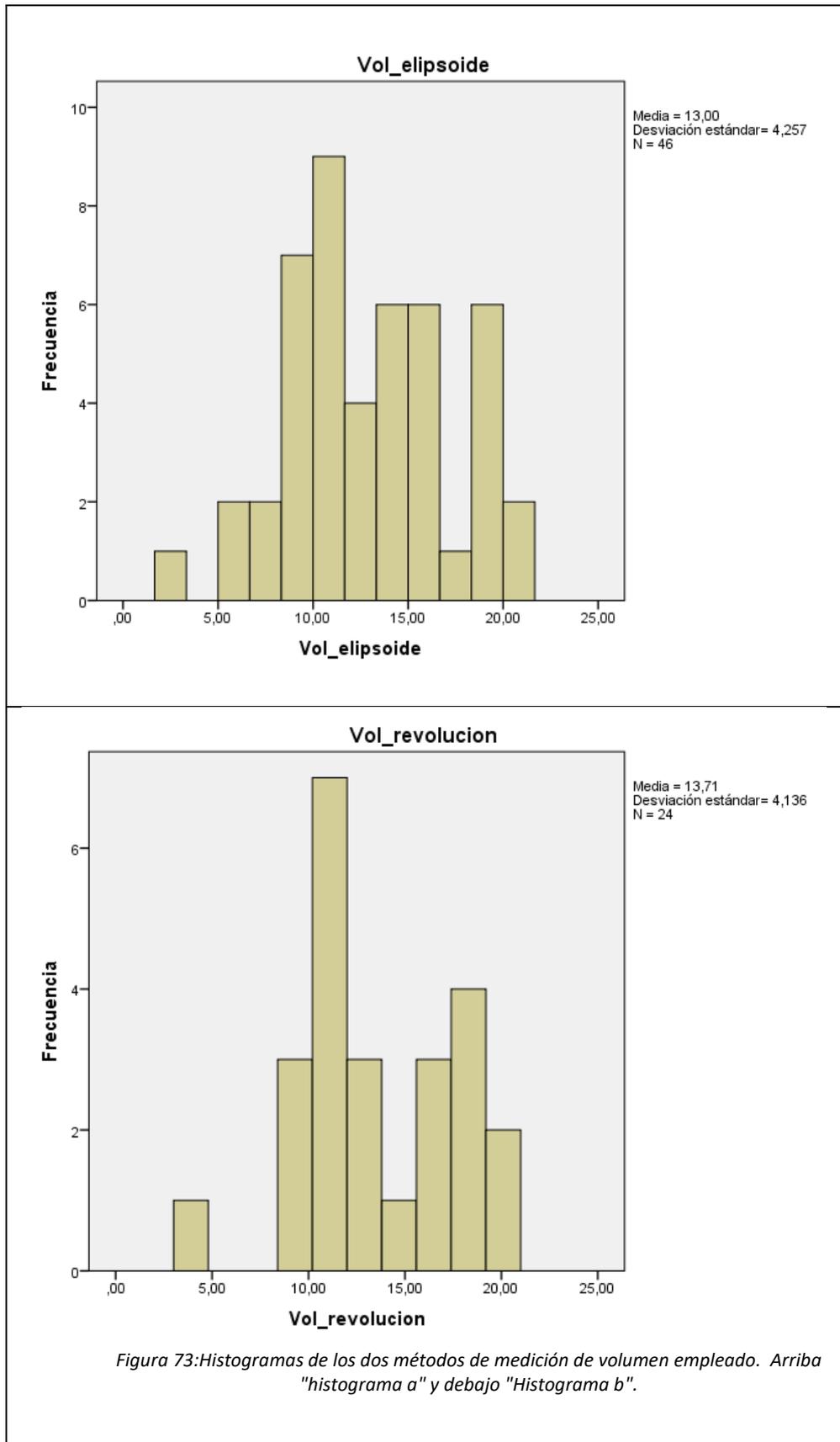
Tabla 4: Parámetros medidos y calculados en los ensayos.

		Estadísticos					
		Vol_elipsoide	Vector_Medio	Vol_revolucion	Altura_total	Eje_menor	Eje_mayor
N	Válido	46	46	24	46	46	46
	Perdidos	12	12	34	12	12	12
Media		12,9957	1,7961	13,7101	2,2989	3,5059	3,6089
Mediana		12,4900	1,8200	13,3593	2,3000	3,5000	3,7000
Desviación estándar		4,25680	,22559	4,13618	,16313	,57180	,55545
Mínimo		3,15	1,13	3,87	2,00	2,15	2,00
Máximo		20,92	2,23	20,71	2,65	4,70	4,65

Una regresión lineal entre los valores de eje menor y mayor y menor [eq. 1] presenta un coeficiente que contiene al 1 con una confianza del 95% [0.92,1.01], por lo que pueden considerarse estadísticamente iguales. De esta forma, en planta (según ambos ejes) el crecimiento de los árboles puede considerarse circular. Ello se refleja, igualmente, en la escasa variabilidad del vector medio (CV=12%), de forma que no parece presentarse un patrón direccional determinado de crecimiento.

$$\begin{aligned} \text{Eje menor}_i &= 0.96 \times \text{Eje mayor}_i + \varepsilon_i \\ \varepsilon_i &\in \text{Normal}(0, \sigma) \end{aligned} \quad (1)$$

Ambos ejes oscilan entre 2 y cerca de 5 m, lo cual da lugar a la variabilidad de volúmenes observada, con coeficientes de variación del orden del 30-35%. En la figura 73 se muestran los histogramas de los dos métodos de medición de volumen empleado.



En lo referente a la comparación de métodos de medición del volumen, los resultados indican que éstos se encuentran altamente correlacionados. La tabla 5 y la figura 74 muestran los valores de los coeficientes de correlación lineal de Pearson entre los distintos métodos. Destaca el hecho de que siempre resultan superiores a 0.9, con un p-valor inferior a 10^{-8} en todos los casos bajo contraste bilateral. Por ese motivo, los dos histogramas antes presentados (figura 73) resultan muy similares en su forma, debido a la alta correlación que presentan.

Tabla 5: Valores de los coeficientes de correlación lineal de Pearson.

		Vol_elipsoide	Vector_Medio	Vol_revolucion
Vol_elipsoide	Correlación de Pearson	1	,918**	,921**
	Sig. (bilateral)		,000	,000
	N	46	46	24
Vector_Medio	Correlación de Pearson	,918**	1	,918**
	Sig. (bilateral)	,000		,000
	N	46	46	24
Vol_revolucion	Correlación de Pearson	,921**	,918**	1
	Sig. (bilateral)	,000	,000	
	N	24	24	24

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Elevadas correlaciones entre métodos ya fueron observadas por Miranda-Fuentes et al. (2015) en un estudio en cultivo de olivar tradicional e intensivo, oscilando entre 0.78 y 0.82, siendo por tanto inferiores a los del presente estudio. Posiblemente la causa hay que buscarla en la mayor heterogeneidad que presentan los olivos, en especial aquéllos formados por varios pies, que se traduce en una mayor variabilidad y menor coeficiente de correlación. Por el contrario, los naranjos son formados a un solo pie, lo que probablemente incrementa la asociación entre métodos, tal y como se expone anteriormente.

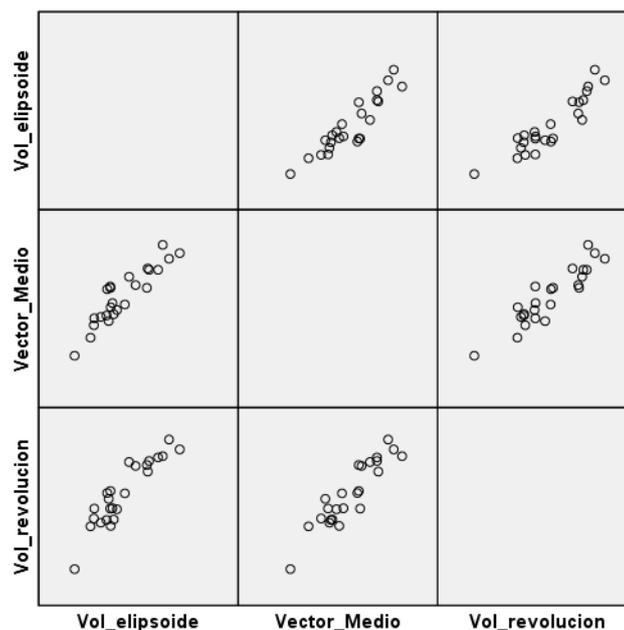


Figura 74: Valores de los coeficientes de correlación lineal de Pearson.

Un propósito inicial de este estudio era el de comparar las medidas manuales con el método SFM para determinar la variación entre ellos. Sin embargo, y como se ha expuesto, la metodología SFM no ha funcionado de forma adecuada. Ello imposibilita la comparación inicialmente planteada.

Sin embargo, a fin de determinar la igualdad de volúmenes entre métodos se ha realizado un contraste de pendiente unitaria al modelo de regresión lineal de grado 1 entre volúmenes para los métodos del elipsoide y de revolución (no se ha realizado para el método Vm, por la razón de que determina longitudes).

$$\text{Volumen elipsoide}_i = 0.93 \times \text{Volumen revolución}_i + \varepsilon_i$$

$$\varepsilon_i \in \text{Normal}(0, \sigma)$$

El coeficiente de confianza del parámetro estimado (0.93) oscila entre 0.88 y 0.98, por lo que parece que un sistema infraestima de forma consistente los volúmenes respecto al otro. Desafortunadamente, la no disposición del método SFM (bajo la hipótesis inicial de que sería el mejor método) no permite conocer cuál puede ser más preciso. Con todo, las diferencias promedio resultan pequeñas, del 7%.

En cualquier caso, dada la buena correlación lineal entre sistemas observada en este cultivo, a la luz de la correlación existente entre los volúmenes LIDAR y métodos clásicos observados por Miranda et al. (2015), y de acuerdo con los tiempos de ejecución de las mediciones en campo, se estima que el método del volumen del elipsoide puede resultar el más adecuado a nivel de agricultor.

Tabla 6: El decrecimiento del volumen de copa medidos según el método de la silueta en función del incremento del número de puntos.

Árbol	Cambio en el número de puntos empleados para definir la silueta										
	5 a 10	10 a 15	15 a 20	20 a 25	25 a 30	30 a 35	35 a 40	40 a 45	45 a 50	50 a 55	55 a 60
3	-7,60%	-1,06%	-1,71%	-0,57%	-3,43%	-2,84%	0,11%	0,01%	0,02%	0,00%	0,10%
9	-17,34%	-7,31%	-4,88%	-0,59%	-1,50%	-0,81%	-2,72%	-0,82%	-2,42%	-2,28%	-0,67%
50	-15,87%	-8,53%	-1,10%	-1,98%	-3,61%	-4,48%	-1,37%	-3,32%	0,00%	0,00%	0,00%
43	-24,84%	-0,80%	-4,10%	-1,35%	-2,30%	-1,69%	-2,25%	-1,38%	-0,70%	-1,19%	-0,73%
16	-15,01%	-18,81%	-5,39%	-3,03%	-1,12%	-1,24%	-1,24%	-0,26%	-1,24%	-0,71%	-0,16%
Decrecimiento promedio	-16,13%	-7,30%	-3,44%	-1,50%	-2,39%	-2,21%	-1,49%	-1,16%	-0,87%	-0,84%	-0,29%

La tabla 6 muestra el decrecimiento del volumen de copa medido según el método de la silueta del árbol en función del incremento del número de puntos empleado en su definición. Así, por ejemplo, en el árbol 50, el paso de 5 puntos a 10 puntos supone un decremento en el volumen registrado del 15.87%. A la hora de definir la silueta de los árboles es importante establecer cuál es el número de puntos necesario para ello por un doble motivo. El primero es el incremento de precisión que se logra con una silueta más acorde con la realidad de la planta. El segundo es el aumento del tiempo de gabinete utilizado para la definición de los contornos como se muestra en la tabla 7. En esta se muestran los tiempos generados en la realización de cada figura con respecto a los puntos tomados, en donde se produce un aumento progresivo de los tiempos a medida que los puntos van en aumento. Esto es debido a que, con respecto los puntos aumentan, es más complicado ir tomando puntos en la figura que sirvió de guía, pues son puntos más precisos y están unos de otros más próximos.

Tabla 7: Tiempos empleados en gabinete utilizados para la definición de los contornos.

Nº PUNTOS	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
TIEMPO (SEGUNDOS)	40	47	54	55	69	76	82	91	102	116	129	145

En este trabajo se propone el uso de un número de puntos igual a 40 por silueta, pues el volumen apenas decrece con posterioridad (Tabla 6), por lo que el método no logra un mayor incremento de precisión a efectos prácticos. Sin embargo, si se tomaran 60 puntos por árbol, el incremento de tiempo de gabinete, que como se ve, no compensa, sería de 145 segundos. Se ha aceptado el valor de 40 por el hecho de que mejores definiciones reducen el volumen en porcentajes inferiores al 5% a nivel global (pe., un 2.11% en el árbol 43), lo que parece satisfactorio. En cualquier caso, la definición del número óptimo de puntos será en función de la aplicación que en cada caso se persiga.

6. CONCLUSIONES

El método SFM no resultó fructífero para la evaluación de los volúmenes de copa. Los motivos principales, a nuestro entender, han sido: En primer lugar, el programa Agisoft Photoscan no fue capaz de realizar la orientación de las fotografías, y esto pudo ser debido a la densa copa que presentaban los naranjos, puesto pruebas realizadas con árboles de hoja caduca y árboles de menor densidad de copa, la orientación de las fotografías y realización de los modelos digitales se pudieron llevar a cabo. En segundo lugar, la toma de datos no se pudo realizar de la manera más correcta, debido al marco de plantación que los árboles presentaban (6x4), no pudiéndose realizar la toma de imágenes como objetos aislados en sí, sino que se tuvo que combinar la técnica de toma de imágenes de objetos aislados con la toma en fachadas, como se explica en el apartado toma de datos, y por ello se cree que no se realizó un adecuado solape con los extremos y como consecuencia pudo ser otro motivo por lo que el programa tampoco pudiera realizar la orientación de las imágenes.

Los métodos manuales se proporcionan valores altamente correlacionados. El coeficiente de Pearson entre los distintos métodos siempre resultó superior al 0,9. El coeficiente de confianza del parámetro estimado (0.93) oscila entre 0.88 y 0.98, por lo que parece que el sistema del elipsoide infraestima ligeramente el volumen respecto al método de la silueta. La no disposición del método SFM (bajo la hipótesis inicial de que sería el mejor método) no nos permite conocer cuál puede ser más preciso.

Respecto al método de la silueta, se puede decir que los volúmenes convergen de forma aceptable con 40 puntos por perfil. Mayores valores no incrementan la precisión y suben más de un 50% el tiempo de computación.

Los volúmenes medios obtenidos de los naranjos calculados con el método del elipsoide fueron de 12.996 m³, aproximadamente de 13 m³, y con el volumen medio se obtuvo un valor de 1.79 m, datos correctos, pues los naranjos no eran de un gran tamaño y sus copas eran muy homogéneas.

En general y para finalizar, se cree que el método del elipsoide, puesto que no se pudo comprobar el método SFM, de acuerdo con los tiempos de ejecución de las mediciones en campo, al no tener tiempo de ejecución en gabinete, puede resultar el más adecuado a nivel de agricultor.

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Uno de los trabajos pendientes es sin duda realizar un estudio similar a los efectuados, añadiendo la utilización del dispositivo LIDAR y de un DRON o vehículo aéreo no tripulado, para poder realizar una comparativa de los métodos ya estudiados, con los nuevos que se proponen para el futuro.

Esta línea ya se está llevando a cabo por otro alumno, que está realizando los ensayos con una selección de árboles situados en el campo de prácticas de la ETSIA. En la Figura 75, se muestra el trabajo realizado en esta nueva línea de investigación por el DRON, en donde se representa los naranjos del campo de prácticas una vez ya procesados por un programa informático, que se puede visualizar mediante el enlace:

<https://www.altizure.com/project/5a27c9f5c802a139a1950ec7/model>



Figura 75: Captura de pantalla del modelo digital de naranjos realizado mediante un “DRON”.

Fuente: (site.altizure.com)

8. BIBLIOGRAFÍA

ADRIAN RIQUELME, M.C., ABELLÁN, A., TOMÁS, R. Y JORDÁ, L. (2016). *Structure from motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos*. p. 209-210. Disponible en file:///C:/Users/victo/Desktop/Toms-SfM.pdf. [Visitado el 10-01-2018].

Agisoft LLC, P., 2016. *Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition*, Version 1.2. Disponible en http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf [Visitado el 07-12-2017].

AGISOFT PHOTOSCAN (2017). *Agisoft en España*. Disponible en <https://www.agisoft.es/products/agisoft-photoscan/> [Visitado el 07-12-2017].

APOLO, O.E. (2016). *Recuperación, modelado y recreación utilizando Fotogrametría, del patrimonio oleícola industrial de la Hacienda de Quinto*. Trabajo Fin de Grado. Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica.

BONNEVAL, H. (1972). *Photogrammétrie générale*. Francia. Eyrolles.

BUILL POZUELO, F., NUÑEZ ANDRÉS, M^a. A. Y RODRIGUEZ, J.J. (2003). *Fotogrametría analítica*. Barcelona. Edicions UPC.

CARTESIA (2017). *Introducción a la fotogrametría*. Disponible en http://www.cartesia.org/data/apuntes/fotogrametria/Introduccion_a_la_Fotogrametria.pdf [Visitado el 04-11-2017].

CIVILGEEKS.COM (2016). *Manual actualizado AutoCAD Civil 3D*. Disponible en <https://civilgeeks.com/2015/05/01/manual-actualizado-autocad-civil-3d-2016-nivel-basico/> .[Visitado el 08-12-2016].

CONDE LUNA, E., CASTILLO MIRANDA, P.G., YAÑES APAZA, B.G., HUARTE ILLA, J., MONTOYA PORRAS, L.M., NINA CHAVEZ, Y., CRUZ VILLACORTA, A. y YARIN SAHUAREAURA, O.A. (2017). *Fotogrametría*. Trabajo Universitario. Universidad de Andina del Cusco.

E. CHELI, A. (2011). *Introducción a la fotogrametría y su evolución*. La Plata, Argentina. Ediciones Hespérides.

GOMEZ LAHOZ, J. (2015). *Introducción a la fotogrametría digital: El método general de la fotogrametría digital*. Proyecto. Ávila. Escuela Politécnica Superior de Ávila.

GOOGLE MAPS (2016). *Google Mapas*. Disponible en <https://www.google.ca/maps>. [Visitado el 25-10-2016].

INFOAGRO (2017). *El cultivo de las naranjas Parte 1ª*. Disponible en <http://www.infoagro.com/citricos/naranja.htm> [Visitada el 12-12-2017].

INSTOP (2017). *Agisoft Photoscan, el software automatizado inteligente*. Disponible en <https://www.instop.es/Agisoft/agisoft-photoscan.php> [Visitado el 07-12-2017].

JAUREGUI, L. WEB DEL PROFESOR, ULA.UE. (2006). *Introducción a la fotogrametría. Capítulo 1*. Disponible en <http://webdelprofesor.ula.ve>. [Visitado el 08-11-2016].

KONECNY, G., (2014). *Geoinformation: Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems*. Estados Unidos. Taylor & Francis Group, LLC.

MIRANDA FUENTES, A., LLORENS, J., GAMARRA DIEZMA, J.L. Y GIL RIBES, J.A. (2015). “Towards an Optimized Method of Olive Tree Crown Volume Measurement” en *Sensors*, 15(2),3671-3687. Disponible en <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/2/3671> [Visitado el 05-12-2017].

PEREZ ROMERO, A.M. (2016). *Tema 13: Introducción a la Fotogrametría y SFM*. Disponible en <http://topoetsia.blogspot.com.es/> .[Visitado el 05-11-2016].

PÉREZ SALAZAR, P.R., PATRICIO, E., POWNEY, K., LA, C.D.E., ESCUELA, T., DEL, P., ESPE, E., (2013). *Diseño de un ambiente virtual mediante el empleo de procesos fotogramétricos terrestres de corto alcance del conjunto arquitectónico de la ciudad de Conocoto*. Rev. Geoespacial, Editor. Sangolquí, ESPE 1-15.

PIÑOL, J. Y MARTÍNEZ VILALTA, J. (2006). *Ecología con número*. Ed. Lynx. Bellaterra. Barcelona.

QUIROS ROSADO, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicada a la Ingeniería Civil*. Cáceres. Universidad de Extremadura, servicio de publicaciones.

RAIGO (2017). *Jalón topográfico*. Disponible en <https://www.raig.com/tienda/medicion-y-precision/jalon-topografico> [Visitado el 08-12-2017].

REAL ACADEMIA DE INGENIERIA (2016). *Diccionario Español de Ingeniería*. Disponible en <http://diccionario.raing.es/>. [Visitado durante toda la duración del proyecto].

RUIZ MORALES, M. (2003). *Nociones de Topografía y Fotogrametría Aérea*. Granada. Universidad de Granada.

SANCHEZ SOBRINO, J.A. (2006-2007). *Introducción a la fotogrametría*. Proyecto. Madrid. ETSI. Caminos, Canales y Puertos.

SCRIBD (2013). *Etapas de la fotogrametría*. Disponible en <https://es.scribd.com/document/149249017/ETAPAS-DE-LA-FOTOGAMETRIA> [Visitado el 02-11-2017].

SCRIBD (2014). *¿Qué es y para qué sirve AutoCAD Civil 3D?* Disponible en <https://es.scribd.com/doc/244817242/Que-Es-y-Para-Que-Sirve-Autocad-Civil-3d> [Visitado el 10-12-2017].

SCRIBD (2015). *Introducción y antecedentes de la fotogrametría*. Disponible en <https://es.scribd.com/document/356964425/Introduccion-y-antecedentes-de-la-fotogrametría>. [Visitado 3-11-2017].

SCRIBD (2017). *Principios de la Fotogrametría*. Disponible en <https://es.scribd.com/document/344041964/PRINCIPIOS-DE-LA-FOTOGAMETRIA>. [Visitado el 3-11-2017].

SLIDE SHARE (2012). *Fotogrametría*. Disponible en <https://es.slideshare.net>. [Visitado el 04-11-2016].

SOFT PCFULL (2017). *Agisoft PhotoScan Professional 1.2.4 ML(x64/x86)*. Disponible en <https://softpcfull.com/agisoft-photoscan-professional-1-2-4-ml/> [Visitado el 07-12-2017].

TOPOEQUIPOS S.A. (2016). *¿Qué es fotogrametría?* Disponible en <http://www.topoequipos.com/dem/que-es/terminologia/que-es-fotogrametría>. [Visitado el 5-11-2016].

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NOROESTE (2011). *Principios de la Fotogrametría*. Disponible en <http://www.ing.unne.edu.ar/>. [Visitado el 15-11-2017].

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID (2017). *Tema 11: Fotogrametría y Teledetección. Capítulo 2*. Disponible en http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametría/topografía-cartografía-y-geodesia/contenidos/TEMA_11_FOTOGAMETRIA_Y_TELEDETECCION/Fotogrametría/fotogrametría_cap_libro.pdf. [Visitado el 10-01-2018].

9. ANEJOS

Anejo 1: Características de la cámara Canon EOS 1100D.

Datos generales	
Tipo de cámara	reflex
Precio oficial	499.00 €
Precio en tiendas	799.99 €
Modelo	Canon EOS 1100D
Captura de imagen	
Procesador	Digic 4
Tipo de sensor	CMOS Filtro RGB Limpieza automática por vibración del filtro pasa-bajo
Tamaño del sensor	APS-C (recorte 1.6x) 22.3 x 14.9 mm
Relación de aspecto	3:2
Resolución sensor	12.2 MP
Píxeles efectivos	4272x2848
Otras resoluciones	3088x2056, 2256x1504
Formato JPEG	JPEG 2.3, 2 niveles: fine, normal
Otros Formatos	RAW (CR2 14bits), RAW+JPEG
Captura de video	HD, con audio mono
Formato de video	Quicktime MOV, H.264 + audio PCM
Resolución de video	1280x720 a 30/25fps
Sistema óptico	
Tipo de montura	Canon EF / EF-S
Estabilizador	no
Enfoque manual	si
Enfoque automático	si
Luz de ayuda	sí, por flash

Tipo de enfoque	Sensor de 9 puntos, central en cruz
Modos de enfoque	Disparo único, AI Focus, AI Servo, AF predictivo hasta 8m.
Control de exposición	
Rango de ISO	100-6400 pasos de 1 EV auto hasta 6400 con máximo ajustable
Tipo de obturador	obturador de plano focal
Velocidad de obturación	1/4000 a 30seg. en pasos de 1/3 o 1/2 EV + bulb X-Sync 1/200 seg.
Comp. de exposición	-5 a +5 EV pasos de 1/3 o 1/2 EV
Medición de exposición	TTL 63 zonas Matricial evaluativa Central ponderado Parcial (10%) Puntual
Balance de blanco	Auto, 6 presets, manual Ajuste fino 9 pasos + bracketing
Control de disparo	
Modos de exposición	AE Programado Prioridad a la abertura Prioridad al obturador Manual
Modos de escena	5 modos creativos + auto
Bracketing	3 tomas, pasos de 1/3 o 1/2 EV hasta 2 EV
Disparo continuo	2 ips hasta 5 RAW, 3 ips hasta 830 JPEG
Temporizador	2 o 10 seg.
Control remoto	por cable: RS-60E3
Visualización	
Tipo de visor	pentaespejo
Campo del visor	95%
Amplificación	0.80x (efectiva: 0.5x)
Ajuste dióptrico	si
Pantalla trasera	2.7", 230000 pixels TFT LCD, 170° vision, fija

Vista en vivo	sí, 2 modos: enfoque por contraste y enfoque con bajada del espejo (det.fase)
Flash	
Flash incorporado	si
Flash externo	sí, E-TTL II
Modos de Flash	Auto, Relleno, ojos rojos, cortinilla trasera, sincro lenta
Alcance del Flash	nº guía 9.2- hasta 17mm. angular
Memoria y Conexiones	
Tipos de tarjeta	SD / SDHC / SDXC incluida: no
Conexión al ordenador	USB 2.0
Salida de vídeo	HDMI
Otras conexiones	Conexión control remoto
Características físicas	
Resiste al agua	no
Alimentación	batería de Litio incluida: LP-E10 <="" td="">
Duración batería	foto: 700 disparos
Datos del cuerpo	Acero inoxidable y resina de policarbonato con fibra de vidrio
Otras características	sensor de orientación
Dimensiones	129.9 x 99.7 x 77.9 mm. (volumen: 1009 cc.)
Peso	495 gr. (con tarjeta y batería)

Anejo 2: Tabla de datos tomados en campo para el método manual del elipsoide y volumen medio.

ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	H_max	H_menor	elipsoide(m)	Vm(metros)
1	1,9	1,6	1,95	1,75	2,2	2,2	2,2	2	2,4	0,4	17,818	1,98
2	1	1,9	1,6	1,7	1,3	2,1	2,1	1,35	2,4	0,45	8,689	1,63
3	1,4	1,1	1,3	2,4	2	1,2	2,05	2,1	2,4	0,4	11,928	1,69
4	1,4	1,7	1,3	2,05	0,9	0,72	1,48	1,3	2	0,25	5,859	1,36
5	2	2,5	2,5	2,3	1,95	2,1	2,15	2,3	2,65	0,5	20,677	2,23
6	1,6	1,68	1,4	1,65	1,6	1,3	1,3	1,4	2,2	0,4	8,143	1,49
7	2,2	2,1	1,7	2	0,7	1,4	1,5	1,8	2,4	0,4	9,718	1,68
8	2,1	2,3	2,3	2,3	2,1	1,7	2	2,2	2,3	0,35	18,440	2,13
9	2,2	2,15	1,9	1,4	1,5	1,7	1,25	1,8	2,3	0,45	11,290	1,74
10	1,3	2,15	2	2	2,05	1,1	0,9	0,9	2,1	0,5	8,139	1,55
11	2	2	1,85	2	2,1	1,9	2	2	2,6	0,6	16,530	1,98
12	1,5	2,1	1,8	2	1,6	1,25	1,6	1,8	2,4	0,4	11,037	1,71
13												
14	2,2	1,2	0,8	2,2	1,7	1,8	1,7	1,5	2,2	0,3	9,700	1,64
15												
16	2,1	2,1	2	2,2	2,1	1,8	2,2	2	2,45	0,35	19,396	2,06
17	1,65	1,8	2	1,4	1,2	1,35	1,6	1,9	2,4	0,4	10,744	1,61
18	2,4	1,15	2	1,35	0,95	1,2	1,9	1,75	2,15	0,3	12,656	1,59
19												
20	1,7	1,75	2	2	2,2	1,9	2,1	1,8	2,5	0,3	18,419	1,93
21	1,2	1,5	1,7	2,1	1	1,1	1,3	1,7	2,15	0,35	6,220	1,45
22												
23	2,1	2,8	2,2	1,9	1,7	1,85	1,65	1,75	2,1	0,35	13,405	1,99
24	2,4	2,3	2,05	2,5	1,9	2,2	1,8	2,1	2,65	0,35	19,937	2,16
25	1,7	1,3	2,25	1,8	1,8	1,7	2,15	2	2,2	0,35	14,917	1,84
26	1,4	1,6	1,65	2,2	2,1	1,9	2	1,8	2,5	0,25	15,050	1,83
27												
28	1,7	2	2	1,8	1,85	1,9	1,4	1,8	2,45	0,5	12,324	1,81
29												

ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	H_max	H_menor	elipsoide(m)	Vm(metros)
30	2	2	2,25	2,3	1,45	1,15	2,2	2,1	2,15	0,45	13,666	1,93
31	1,9	1,8	1,8	1,72	1,22	1,15	1,4	1,68	2,15	0,5	8,626	1,58
32												
33	2	2,4	2	2,15	0,9	1,8	1,8	1,8	2,3	0,4	10,963	1,86
34	2,2	2,1	1,9	2	1,6	1,3	1,65	1,6	2,3	0,4	13,420	1,79
35	1,8	2,1	1,9	2	1,7	2,1	2,1	2,2	2,35	0,25	15,394	1,99
36	1,8	2	1,9	1,1	1,9	1,7	2	2,5	2,25	0,35	14,356	1,86
37	1,4	1,55	1,9	1,4	1,75	1,75	1,5	1,8	2,1	0,5	8,972	1,63
38	1,7	2,2	1,8	1,7	1,5	1,3	1,45	1,6	2,3	0,4	10,346	1,66
39	2,2	1,9	1,7	1,75	1,7	0,7	1,4	1,85	2,2	0,55	10,445	1,65
40												
41												
42	2,1	2,1	1,85	2,2	2,6	2,45	2,4	1,08	2,5	0,5	20,918	2,10
43	1,3	1,5	2,05	2,05	2,62	1,7	1,9	1,7	2,4	0,4	16,215	1,85
44	1,9	1,9	1,7	1,8	1,5	1,82	2	2,1	2,2	0,6	10,539	1,84
(PODADO) 45	0,9	1,2	0,7	1	1,25	1,3	1,3	1,35	2	0,6	3,152	1,13
46	1,8	1,6	2,2	2,4	1,6	1,6	1,8	1,95	2,35	0,3	14,598	1,87
47												
48	2,2	2,45	1,55	1,45	1,2	1,8	1,98	2,15	2,3	0,55	10,997	1,85
49	2,2	2	2,3	2,4	1,9	2,2	1,8	2,45	2,5	0,4	18,484	2,16
50	1,7	1,8	1,7	1,5	1,6	1,7	1,7	1,6	2,2	0,25	11,456	1,66
51	1,65	1,8	1,25	1,75	1,6	2,3	1,8	2	2,15	0,35	9,342	1,77
52	2,2	2	2,15	2	1,75	1,6	1,8	2,4	2,2	0,2	16,339	1,99
53												
54	2,15	1,95	2,2	1,6	2,1	1,7	2	1,9	2,45	0,35	19,627	1,95
55	1,8	2,1	1,6	2	1,6	1	1,4	1,6	2,05	0,25	9,613	1,64
56	2,28	2,3	1,8	2,2	1,8	2	2	2	2,25	0,25	16,236	2,05
57												
58	2	0,5	2	2,15	1,6	1,5	1,85	2,2	2,2	0,4	13,063	1,73

Anejo 3: Tabla de datos de los volúmenes calculados con el método de la silueta.

ID	V1	V2	V3	V4	VOLUMEN(m3)
1	9,667	26,859	12,56	24,425	18,378
2	9,740	15,130	15,74	6,350	11,740
3	10,363	11,531	11,04	13,664	11,649
4	3,600	2,281	6,28	3,318	3,870
6	9,142	10,095	9,56	8,890	9,423
9	10,281	12,463	12,85	11,493	11,773
11	18,611	12,969	21,05	19,050	17,921
12	11,473	7,324	9,81	9,309	9,479
16	30,408	20,513	23,74	8,172	20,708
17	9,688	15,751	16,44	10,123	13,000
30	14,102	19,353	16,94	20,735	17,781
31	7,303	12,424	12,51	9,563	10,450
33	9,854	10,481	14,53	12,082	11,736
39	8,266	11,713	11,48	9,537	10,248
42	18,378	12,942	17,58	28,793	19,423
43	14,571	17,964	15,36	21,673	17,393
44	13,505	13,649	12,24	15,634	13,758
46	13,487	20,203	17,89	17,538	17,279
48	12,220	16,256	12,59	15,007	14,017
49	21,355	14,505	15,37	22,932	18,541
50	8,372	10,909	9,08	12,910	10,318
52	18,546	20,451	8,84	18,331	16,543
55	14,815	3,385	11,33	10,063	9,897
58	19,222	10,969	21,07	3,610	13,718

Anejo 4: Tabla de datos de los volúmenes en la mejora del método de la silueta.

	ARBOL	5 PUNTOS	10 PUNTOS	15 PUNTOS	20 PUNTOS	25 PUNTOS	30 PUNTOS	35 PUNTOS	40 PUNTOS	45 PUNTOS	50 PUNTOS	55 PUNTOS	60 PUNTOS	>60 PUNTOS
	Nº3	11,93	11,023	10,906	10,719	10,658	10,292	10	10,011	10,012	10,014	10,014	10,024	10,024
VOLUMEN m	Nº9	20,928	17,299	16,034	15,251	15,161	14,933	14,812	14,409	14,291	13,945	13,627	13,536	12,463
	Nº50	13,86	11,661	10,666	10,549	10,34	9,967	9,52	9,39	9,078	9,078	9,078	9,078	9,078
	Nº 43	34,502	25,933	25,725	24,671	24,339	23,78	23,378	22,853	22,537	22,379	22,113	21,952	21,673
	Nº16	14,25	12,111	9,833	9,303	9,021	8,92	8,809	8,7	8,677	8,569	8,508	8,494	8,172

Anejo 5: Mapas de situación de la finca para la toma de datos en campo.

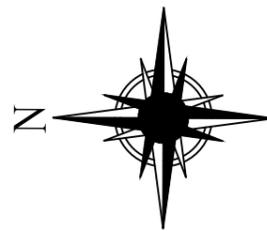
A continuación, se muestran tres mapas de situación de la finca: el primero de ellos sería el croquis de situación de todos los árboles elegidos para este trabajo, el segundo sería el croquis de situación de los árboles elegidos para la toma de datos del método del elipsoide, y por último el croquis de situación de los árboles tomados para la toma de datos para el método SFM.



PUNTOS



CLÁSICO



SFM