



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén

COMPARATIVA DE SOFTWARE FOTOGRAMÉTRICO PARA LA OBTENCIÓN DE ORTOFOTOS OBTENIDAS CON DIFERENTES SENSORES

Autora: M^a Francisca Muñoz Lomas

Grado en Ingeniería Geomática y Topográfica

Director: Dr. D Antonio Romero Manchado y Dña Andressa de Sousa Cardoso
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría.

Fecha: 1/07/2024

Licencia CC





Universidad de Jaén.
Escuela Politécnica Superior de Jaén.
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría.

Dr. D. Antonio Romero Manchado y Doña Andressa de Sousa, tutores del Trabajo Fin de Grado titulado: “*Comparativa de software fotogramétrico para la obtención de ortofotos obtenidas con diferentes sensores*”, que presenta Doña María Francisca Muñoz Lomas, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Julio de 2024.

El alumno:

MUÑOZ
LOMAS
MARIA
FRANCISCA -
26008615P

Firmado digitalmente por MUÑOZ LOMAS MARIA FRANCISCA - 26008615P
Fecha: 2024.07.03 21:53:51 +02'00'

María Francisca Muñoz Lomas

Los tutores:

ROMERO
MANCHADO
O ANTONIO
-
33985266Y

Firmado digitalmente por ROMERO MANCHADO ANTONIO - 33985266Y
Fecha: 2024.07.03 09:56:23 +02'00'

Antonio Romero Manchado
Andressa de Sousa

DE SOUSA
CARDOSO
ANDRESSA -
Y6475239V

Assinado de forma digital por DE SOUSA CARDOSO ANDRESSA - Y6475239V
Dados: 2024.07.03 05:51:01 -03'00'

Índice

1. Introducción.....	1
2. Estado del arte.....	5
3. Metodología.....	7
3.1. Zona de estudio.....	7
3.2. Material.....	11
3.2.1. Los UAS empleados.....	11
3.2.2. Equipos GNSS.....	14
3.2.3. Sensores utilizados.....	15
3.3. Software utilizado.....	19
3.3.1. Agisoft Metashape.....	19
3.3.2. Pix4Dmapper.....	20
4. Desarrollo del trabajo.....	21
4.1. Plan de vuelo.....	21
4.2. Realización de los vuelos.....	24
4.3. Procesado de las imágenes.....	27
4.3.1. Fundamentos teóricos.....	27
4.3.2. Procesado de datos con Metashape.....	31
4.3.3. Procesado de datos con Pix4Dmapper.....	38
4.3.4. Parámetros utilizados durante el procesamiento.....	44
4.4. Productos obtenidos.....	45
4.4.1. Presentación de resultados.....	49
5. Resultados y discusión.....	68
6. Conclusiones.....	72
Bibliografía.....	75
ANEXO.....	77

Índice de Tablas

Tabla 1 Principales características de las parcelas objetos de estudio. El sistema de referencia utilizado es el EPSG:25830. (UTM 30N / ETRS89). La altura está referida al nivel medio del mar en Alicante. Las coordenadas están dadas en metros.....	7
Tabla 2 Principales especificaciones de los equipos dadas por el fabricante (DJI 2020), (DJI 2022) y (DJI 2023).....	13
Tabla 3 Especificaciones de la base móvil D-RTK 2 (Fuente https://bit.ly/3VnyKx8) .	14
Tabla 4 Especificaciones del módulo RTK (Fuente: https://bit.ly/3z74oHQ).....	14
Tabla 5 Resumen de los sensores utilizados.....	15
Tabla 6 Principales características de la cámara Zenmuse P1 (Fuente: https://bit.ly/4coxuRo).....	16
Tabla 7 Principales características de la cámara H20T (Fuente: https://bit.ly/3XnXmZi).	17
Tabla 8 Principales características de la cámara Micasense RedEdge (Fuente: bit.ly/3xiZ43B) .	18
Tabla 9 Principales características de la cámara a bordo del DJI Mavic-3M (Fuente: https://bit.ly/3z74oHQ).....	18
Tabla 10 Principales características de la cámara a bordo del DJI Mavic-3T (Fuente: https://bit.ly/3Vwa0D7)	19
Tabla 11 Resumen de las características de los sensores.	19
Tabla 12 Configuración recomendada para ejecutar el Agisoft Metashape 2.1.....	20
Tabla 13 Configuración recomendada para ejecutar el Pix4Dmapper 2.1.....	21
Tabla 14 Configuración de los vuelos.	22
Tabla 15 Estimación dada por DJI Pilot del resultado de los vuelos para Casablanca.	22
Tabla 16 Estimación dada por DJI Pilot del resultado del vuelo para Castillo.	23
Tabla 17 Estimación dada por DJI Pilot del resultado del vuelo para Cerro Collado.....	24
Tabla 18 Coordenadas geodésicas de las diferentes bases. Están dadas en el sistema ETRS89 y las alturas (m) son elipsoidales.....	27
Tabla 19 Ordenador utilizado para el procesamiento.	44
Tabla 20 Parámetros utilizados durante el procesamiento.	44
Tabla 21 Número de productos que se pueden generar en función de la cámara y del sensor. En el caso de las cámaras multispectrales se ha considerado un producto por banda más el índice NDVI.....	45
Tabla 22 Productos finales a representar	45
Tabla 23 Consumo de almacenamiento.....	68
Tabla 24 Tabla de tiempos de procesamiento con la cámara P1 (hh:mm:ss).	68
Tabla 25 Tabla de tiempos de procesamiento con la cámara H20T RGB (hh:mm:ss).	69
Tabla 26 Tabla de tiempos de procesamiento con la cámara H20T IR (hh:mm:ss).	69
Tabla 27 Tabla de tiempos de procesamiento con la cámara Micasense (hh:mm:ss).	70
Tabla 28 Tabla de tiempos de procesamiento con la cámara DJI 3M RGB (hh:mm:ss).	70
Tabla 29 Tabla de tiempos de procesamiento con la cámara DJI 3M Multispectral (hh:mm:ss).	71
Tabla 30 Tabla de tiempos de procesamiento con la cámara DJI 3T RGB (hh:mm:ss).	71
Tabla 31 Tabla de tiempos de procesamiento con la cámara DJI 3T IR (hh:mm:ss)	72
Tabla 32 Tabla resumen con la evaluación de cada producto.....	73
Tabla 33. Ventajas e inconvenientes de Metashape y Agisoft.....	73

Índice de Figuras

Figura 1 Esquema de la situación actual en el mundo de la fotogrametría.	2
Figura 2 Vista general de la ubicación de las parcelas. El sistema de referencia utilizado es el ETRS89.	7
Figura 3 Ubicación de la parcela Casablanca. El sistema de referencia utilizado es el EPSG:25830. (UTM 30N / ETRS89). Las coordenadas están dadas en metros.	8
Figura 4 Ubicación de la parcela Castillo. El sistema de referencia utilizado es el EPSG:25830. (UTM 30N / ETRS89). Las coordenadas están dadas en metros.	9
Figura 5 Ubicación de la parcela Cerro Collado. El sistema de referencia utilizado es el EPSG:25830. (UTM 30N / ETRS89). Las coordenadas están dadas en metros. En negro está la ruta seguida por el UAS para la toma de datos.	10
Figura 6 Matrice 300 RTK equipada con la cámara Zenmuse P1.	11
Figura 7 Drones DJI Mavic ·M (a la izquierda) y DJI Mavic 3T (a la derecha). Su única diferencia apreciable es la cámara de fotos que equipan.	12
Figura 8 Cámara Zenmuse P1 equipada con un objetivo de 35 mm.	15
Figura 9 Cámara H20T.	16
Figura 10 Cámara Micasense RedEdge y su correspondiente placa de calibración.	17
Figura 11 Plan de vuelo en Casablanca. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Matrice 300 RTK con P1 + Micasense, Matrice 300 RTK con H20T, DJI Mavic 3M y DJI Mavic 3T.	22
Figura 12 Plan de vuelo en Castillo. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Matrice 300 RTK con P1 + Micasense, Matrice 300 RTK con H20T, DJI Mavic 3M y DJI Mavic 3T.	23
Figura 13 Plan de vuelo en Cerro Collado. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Matrice 300 RTK con P1 + Micasense, Matrice 300 RTK con H20T, DJI Mavic 3M y DJI Mavic 3T.	23
Figura 14 Obtención de las coordenadas para la estación de referencia D-RTK2 de DJI.	25
Figura 15 Estación de referencia D-RTK2 de DJI.	26
Figura 16 A la izquierda las coordenadas originales de la estación. A la derecha, las coordenadas de la estación dadas por el GPS. Obsérvese como han variado las coordenadas del UAS. En la foto que aparece abajo a la izquierda se puede comprobar que el UAS no se ha movido del sitio.	26
Figura 17 Calibración de la cámara multispectral Micasense RedEdge.	27
Figura 18 Esquema general del procesado fotogramétrico (Elaboración propia) Los relojes en rojo indican que son procesos que consumen muchos recursos y tiempo.	28
Figura 19 Diferencia entre MDS y el MDE.	30
Figura 20 Interfaz gráfica del programa.	31
Figura 21. Vistas.	32
Figura 22. Selección de panel.	32
Figura 23 Trabajo con bloques.	33
Figura 24 Evolución del menú <i>Flujo de trabajo</i> , desde el inicio hasta el final.	33
Figura 25. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Etapas a seguir en el procesado con Metashape: <i>Orientación</i> , <i>Crear Modelo</i> , <i>Crear nubes de puntos</i> , <i>Crear Ortomosaico</i>	35
Figura 26 Procesado por lotes.	36
Figura 27 Flujo de trabajo para el Pix4Dmapper. Las etapas van de arriba a abajo.	39
Figura 28 Plantilla de opciones de procesamiento. De arriba abajo: Mapas 3D, Cámara térmica y Cámara Multispectral.	41
Figura 29 Pantalla previa al inicio del procesamiento.	42
Figura 30 Opciones de Procesamiento. De arriba abajo y de izquierda a de derecha: Procesamiento inicial, Nubes de puntos y Mallas, y MDS, Ortomosaicos e Índices.	43
Figura 31 Cálculo del índice NDVI en Cerro Collado con Metashape.	47
Figura 32 Cálculo del índice NDVI en Casablanca, con Pix4Dmapper.	47
Figura 33 Ortomosaico RGB de Casablanca obtenido con la cámara Zenmuse P1. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	49
Figura 34 Modelo Digital de Elevaciones de Casablanca obtenido con la cámara Zenmuse P1. En blanco, la zona de estudio. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	50

Figura 35 Histograma del MDE de Casablanca obtenido con la cámara Zenmuse P1. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	51
Figura 36 Mapa térmico de Casablanca obtenido con la cámara H20T en IR. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	52
Figura 37 Ortomosaico NDVI de Casablanca obtenido con la cámara Micasense RedEdge. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	53
Figura 38 Ortomosaico NDVI de Casablanca obtenido con la cámara DJI3M. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	54
Figura 39 Mapa térmico de Casablanca obtenido con la cámara DJI3T. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	55
Figura 40 Ortomosaico RGB de Castillo obtenido con la cámara Zenmuse P1. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	56
Figura 41 Modelo digital de superficies de Castillo obtenido con la cámara P1. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	57
Figura 42 Mapa térmico de Castillo obtenido con la cámara H20T en IR. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	58
Figura 43 Ortomosaico NDVI de Castillo obtenido con la cámara Micasense. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	59
Figura 44 Ortomosaico NDVI de Castillo obtenido con la cámara DJI Mavic 3M. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	60
Figura 45 Mapa térmico de Castillo obtenido con la cámara DJI3T en IR. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	61
Figura 46 Ortomosaico RGB de Cerro Collado obtenido con la cámara Zenmuse P1. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	62
Figura 47 Modelo digital de superficies de Cerro Collado obtenido con la cámara Zenmuse P1. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	63
Figura 48 Mapa térmico de Cerro Collado obtenido con la cámara DJI3T en IR. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	64
Figura 49 Ortomosaico NDVI de Cerro Collado obtenido con la cámara Micasense Red Edge. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	65
Figura 50 Ortomosaico NDVI de Cerro Collado obtenido con la cámara DJI 3M. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	66
Figura 51 Mapa térmico de Cerro Collado obtenido con la cámara DJI3T en IR. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).	67

Agradecimientos.

Al Dr. D. Francisco R. Feito y a todo su grupo TIC144 Informática Gráfica y Geomática por la cesión de todo el equipo, tanto de cámara como de drones. Sin su inestimable ayuda, este trabajo no habría sido posible.

A mis directores del proyecto Dr. D. Antonio Romero y Dña. Andressa de Sousa por su paciencia y ayuda a lo largo de este trabajo.

1. INTRODUCCIÓN.

En los últimos años el mundo de la topografía ha conocido una auténtica revolución fruto de los avances de la electrónica y de la informática. Desde las primeras estaciones totales, allá por los años 70 del siglo pasado, hasta el lidar, todas estas tecnologías han tenido como factor común la simplificación del trabajo junto con un considerable aumento de la productividad y de la disminución de costes.

Los últimos en llegar a esta revolución han sido los conocidos popularmente como drones, si bien, su nombre técnico es UAS, acrónimo en inglés de *Unmanned Aerial System*, o en español *Sistema de Aeronave No Tripulada*. De acuerdo con la definición que nos da la ICAO¹ (Organización de Aviación Civil Internacional), un UAS, es (ICAO 2011):

“Aeronave y sus elementos conexos que operan sin piloto a bordo”.

Este nombre refleja mucho mejor la realidad de estos equipos, frente a los antiguos términos UAV/VANT (Unmanned Aerial Vehicle/ Vehículo Aéreo No Tripulado) o RPA (en inglés, Remotely Piloted Aircraft, que se traduce como aeronaves tripuladas por control remoto), ya que incluye tanto la aeronave como el conjunto de dispositivos que pueda llevar a bordo, como puede ser, por ejemplo, un sensor térmico, una cámara RGB o un fumigador.

Incluso, el mismo nombre de Topografía ha evolucionado al de Geomática, que recoge una realidad más compleja. Ha pasado de ser:

“la ciencia y el arte de realizar todas las mediciones esenciales para determinar la posición relativa de puntos o detalles físicos y culturales sobre, en o bajo la superficie de la Tierra, y para representarlos de forma utilizable, o para establecer la posición de puntos o detalles”.

de acuerdo a la definición clásica que daba la American Congress on Surveying and Mapping (ACSM), a algo más complejo a la geomática, que de acuerdo a la ISO/TC 211 que la definía (ISO/TR 19122:2004(en) s.f.) como:

“disciplina relacionada con la recogida, distribución, almacenamiento, análisis, tratamiento y presentación de datos geográficos o información geográfica”.

¹ International Civil Aviation Organization

O dicho de una manera muy simple, se ha pasado de recoger la posición de puntos en el espacio para llevarlos a un plano, o de tomar puntos del plano para materializarlos en el terreno a recoger, validar, clasificar cualquier tipo de dato o información que haya sobre el terreno, así como ver la relación que hay entre esta información y cómo podemos acceder e interactuar con ella.

En el ámbito de la Ingeniería en Geomática y la Topografía, la aportación que realizan las técnicas basadas en el uso de UAS, han convertido la toma de datos en un proceso mucho más cómodo al simplificar el trabajo de campo e, incluso, en algunos casos, hacerlo posible. En el campo de la fotogrametría ha conseguido que en solo unos años, se pase de un trabajo de alto coste económico solo compensable para grandes extensiones, muy manual, con restituidores en los que se obtenían imágenes sin demasiada versatilidad y tan solo asequible a grandes corporaciones, con personal muy especializado, a una captura de datos muy eficiente y a poder informatizar todo el cálculo y procesado para obtención de todo tipo de datos de superficies con gran precisión y de los que se pueden obtener gran variedad de productos adaptables a diferentes necesidades.

A esto hay que sumarle la evolución de los GNSS con la aparición de nuevas constelaciones (Galileo y Beidou) que han venido a sumarse a las ya existentes (GPS y GLONASS) mejorando la precisión y abaratando los costes.

Las cámaras para fotogrametría aérea han evolucionado igualmente desde la cámara métrica a bordo de avión, a una gama de cámaras para adquisición de datos que han abierto un mundo de posibilidades con la incorporación de distintos sensores como RGB, multiespectral, termográficos, lidar, etc.

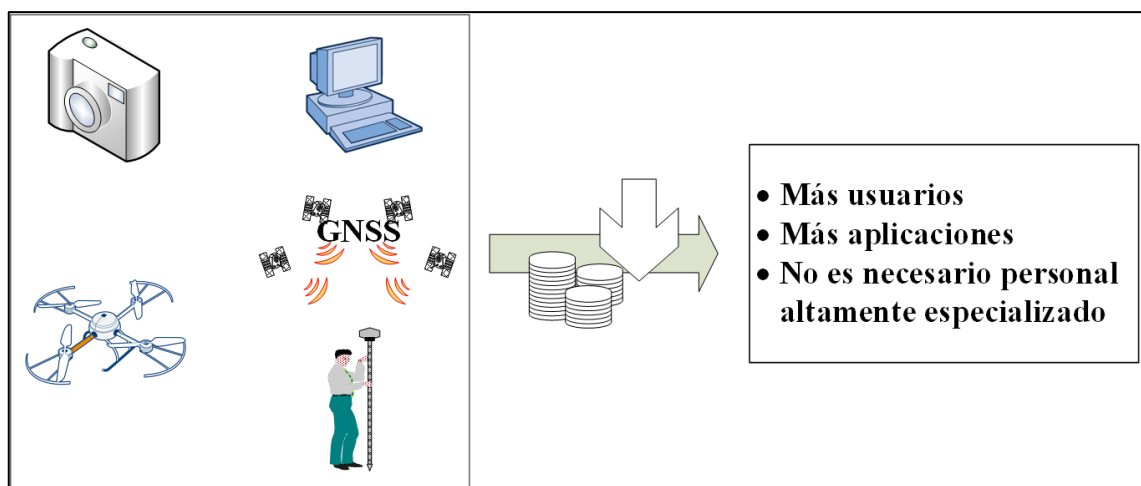


Figura 1 Esquema de la situación actual en el mundo de la fotogrametría.

Esto ha llevado a que en los últimos años se está viviendo una auténtica revolución con la llegada de los UAS, o más comúnmente conocidos como drones, que son cada vez más utilizados en infinidad de aplicaciones que van mucho más allá de la ingeniería, como puede ser, la agricultura, la arqueología, la biología, las operaciones de búsqueda y rescate, el reparto de mercancías, etc. El motivo son las variadas ventajas que aportan a los trabajos como son la seguridad, la eficacia y la optimización del tiempo que conduce a una gran optimización de recursos.

Del mismo modo, las técnicas de procesamiento de datos recogidos por el dron han avanzado a gran velocidad y en distintas direcciones siguiendo las demandas de la investigación y del mercado. La fotogrametría aérea, georreferenciada mediante la generación de la nube de puntos, permite obtener como principales productos ortomosaicos, modelos 3D y modelos digitales de elevaciones. Estos productos son en realidad proyecciones ortogonales con las propiedades geométricas de un plano, lo que permite realizar mediciones exactas sobre los mismos y pudiendo ser exportada a otros programas de diseño, de modelación y de análisis.

Los programas para procesamiento de datos registrados vía dron, deben ser capaces de generar los resultados con la precisión y fiabilidad acorde al objetivo que se persiga. En el mercado, podemos encontrar tanto softwares libres, tales como Opendronemap o Visual SFM, o que requieran licencia como Pix4d, Agisoft Metashape o DroneDeploy. También estos programas han ido evolucionando, y se diseñan para usuarios que no sean especialistas en la materia, de manera que su uso sea cada vez más accesible, pero también son lo suficientemente potentes para que los usuarios más expertos puedan sacar partido a todas sus prestaciones.

En resumen, a partir del año 2000 se producen varios hechos. Por una parte, se empiezan a comercializar cámaras digitales de bajo coste y de calidad creciente. Una cámara digital compacta en los años 2000 podría costar alrededor de 1200 € y hoy, puede no superar los 100 €. Una cámara métrica rondaba el 1.000.000 €, frente a los 20.000 € de hoy. Aumenta el rendimiento de los ordenadores personales, bajando también su precio, y comienzan a aparecer softwares que permiten realizar trabajos fotogramétricos de una manera “friendly user”. También se desarrollan y se popularizan los sistemas de posicionamiento por GNSS, más precisos y rápidos que los tradicionales. Por último, se desarrollan plataformas aéreas, los célebres *drones* (UASs), que permiten realizar fotos aéreas de alta calidad y a los que además se les puede adaptar otro tipo de sensores.

La consecuencia es que en estos últimos años estamos viviendo un aumento de forma exponencial tanto del número de usuarios como de aplicaciones. Pero hay algo más que está oculto en esta revolución, y es que antes, para trabajar en fotogrametría, se requería personal técnico altamente especializado y ahora, solo es necesario tener una formación técnica básica.

Esta es una revolución que está en sus inicios porque los UAS son cada vez más pequeños y cada vez pueden llevar más tipos de sensores, que a su vez son de más calidad y más baratos.

Se abre por lo tanto un amplio campo de trabajo en dos sectores: por una parte, estará el personal dedicado a la adquisición y procesado de imágenes; y por otro el personal dedicado a la interpretación de la mismas (fotointerpretación).

Como se ha comentado, a día de hoy es posible obtener todo tipo de información de una manera rápida, sencilla y a bajo coste para ser utilizada en múltiples campos gracias a los UAS. Dado que el perfil del usuario que utiliza estas técnicas es muy variado, se ha querido realizar una comparativa entre dos de los softwares más populares tratando de ver cuál es el que mejor se adapta a cada usuario.

En este Trabajo Fin de Grado se va a centrar en dos de los productos de software más populares que se utilizan para el procesado de los datos: Agisoft Metashape y Pix4Dmapper analizando su rendimiento. Para ello se compararán sus principales características, tales como:

1. Facilidad de manejo.
2. Tiempo de procesamiento.
3. Calidad visual del producto.
4. Precio del software.

El objetivo principal es estudiar que resultados se obtienen usando distintos sensores, procesando los datos con diferentes softwares, aplicados a parcelas de humedad e inclinación diferentes y en diferentes épocas del año. Se pretende por tanto comprobar si con los distintos métodos aplicados se obtienen resultados que permitan inferir algún tipo de conclusión para algún tipo de parcela o para todas.

Si bien este es un análisis que ya se ha efectuado con anterioridad y puede verse en trabajos como (Visockiene, Brucas y Ragauskas 2014), (Núñez Calleja, 2016), (Costales Acurio, 2018), (Kaimaris, Patias y Sifnaiou 2018), (Ramirez & Diaz Soria, 2020), (Kloc, Mazur y Szumilo 2021), o más recientemente en (Jarahizadeh y Salehi 2024), se ha ampliado al análisis de los resultados cuando las imágenes están

tomadas con una cámara infrarroja y con una cámara multispectral y en parcelas con diferente topografía. La idea es ver si el rendimiento de los programas varía en función del sensor utilizado.

La realización de este estudio trata de poner en práctica y unificar los conocimientos adquiridos en el Grado de Ingeniería en Geomática y Topografía, especialmente, en lo que concierne a la Fotogrametría con UAS, procesamiento de los mismos con diferentes sensores y comparación de resultados bajo diferentes situaciones.

En el esquema adjunto a este apartado se pueden ver claramente las fases de este trabajo que se resume a continuación.

Capítulo 1: Se presentan la justificación y objetivos, es decir, el por qué y el para qué.

Capítulo 2: Estado del arte, donde se recoge algunas de las investigaciones, artículos y publicaciones que relacionadas a este tema de investigación.

Capítulo 3: Metodología empleada. Comprende la descripción de la zona de estudio, las características de los equipos empleados, así como el software utilizado.

Capítulo 4: Este capítulo comprende tanto el trabajo de campo como el de gabinete. Se describe la planificación de los planes de vuelo, como se realizaron, así como el procesado de datos.

Capítulo 5: Resultados y discusión, donde se presentan los resultados.

Capítulo 6. Conclusiones. En este capítulo se exponen conclusiones y las líneas de trabajo futuras.

2. ESTADO DEL ARTE.

A día de hoy, probablemente, Pix4Dmapper y Metashape son las soluciones de softwares de procesado fotogramétrico más empleadas. Si bien, ambas nos permiten tanto la creación de modelos 3D fotogramétricos, como la obtención de otros productos cartográficos, como por ejemplo modelos digitales de terreno, ortomosaicos o creación de mapas de índices a partir de técnicas Structure from Motion (SfM), la filosofía que subyace a la utilización de ambos programas es evidente diferente.

Un primer vistazo nos muestra que, aparentemente, la forma de obtener estos resultados en Pix4Dmapper es mucho más visual e intuitiva a base de procesos preconfigurados, que se muestran como pantallas guiadas, que mientras que todo el

proceso en Metashape se hace a base de menús cuyo manejo no es nada inmediato. Por decirlo de una manera sencilla, la primera impresión que uno se lleva al utilizar estos softwares es que, mientras Metashape es un software para profesionales, con amplios conocimientos de fotogrametría, el entorno sencillo de Pix4Dmapper lo hace más adecuado para ser utilizado por personas que quieran obtener productos fotogramétricos sin tener conocimientos de fotogrametría, como arqueólogos, geógrafos o biólogos. Quizás por eso la realización de comparativa entre estos productos es atractiva y ha sido realizada en diferentes ocasiones como en (Visockiene, Brucas y Ragauskas 2014), (Kaimaris, Patias y Sifnaiou 2018), (Kloc , Mazur y Szumilo 2021), o más recientemente en (Jarahizadeh y Salehi 2024).

Ciñéndose a la literatura en español, se encuentran tres artículos que serán la base para la realización de este trabajo. En (Núñez Calleja 2016) la zona elegida para el vuelo fue una pequeña superficie, de unas 65 ha, situada en el puerto de Avilés, perteneciente al municipio de Avilés, en el Principado de Asturias y el dron utilizado fue un Phantom 2. En este vuelo también se utilizaron puntos de control para conseguir una correcta georreferenciación de las imágenes y además, en la comparativa se incluyó el programa Photomodeler. Las conclusiones que obtiene son: Pix4Dmapper es de más fácil manejo, más rápido y la calidad de los resultados es pareja. Si bien al introducir el factor precio en la ecuación, la elección entre uno y otro software no es tan evidente.

En (Costales Acurio 2018) se realizaron dos levantamientos con un Phantom 4 Pro, tomando los correspondientes puntos de apoyo y de control. El primero era una cantera ubicada en la ciudad de Ambato y el segundo, un conjunto de terrenos ubicados en la ciudad de Riobamba. El procesamiento se efectuó con las versiones de prueba y los resultados indicaron que los tiempos de procesamiento de Metashape fueron superiores a los de Pix4D, si bien la calidad visual de ortomosaicos presentaban la misma nitidez.

Por último, en (Ramirez y Diaz Soria 2020) se realizó el levantamiento de 115 ha de superficie con un Phantom 4 y los correspondientes puntos de apoyo. De nuevo, los resultados de la comparativa benefician a Pix4Dmapper en cuanto al tiempo y la calidad de los resultados sigue siendo similar.

Frente a estos estudios, este trabajo se diferencia no solo en utilizar las últimas versiones Pix4Dmapper y Metashape sino también en la utilización de UAS equipados con RTK, por lo que la toma de puntos de apoyos ya no se hace necesaria y, además,

porque se va a realizar el procesado considerando tanto imágenes térmicas como multiespectrales.

3. METODOLOGÍA.

3.1. Zona de estudio.

Las zonas de estudio están situadas en el término municipal de Campillo de Arenas (Jaén) (Figura 2). Todas ellas están dedicadas al cultivo del olivar pero unas son de secano y otras de regadío con diferente topografía y tipología para ver si aparece algún tipo de indicio que infiera alguna variación del rendimiento del programa, en función de estas características. Por el mismo motivo, se eligen parcelas con tres tipos de pendiente (baja, moderada y elevada). Naturalmente, al ser la muestra tan pequeña, no va a ser posible extraer ningún tipo de conclusión estadísticamente válida, pero si apareciese alguna discrepancia notable en el rendimiento, podría servir como punto de partida para futuros estudios. Las principales características de cada una de las parcelas se encuentran recogidas en la Tabla 1.

Nombre Parcela	Centroide			Pendiente	Extensión	Tipología
	X _{UTM}	Y _{UTM}	H			
Casablanca	441046	4158306	1093,0	19,6%	0,71 ha	Secano
Castillo	445395	4159573	1010,8	3,9%	1,55 ha	Regadío
Cerro Collado	442930	4158005	981,5	31,9%	0,65 ha	Regadío

Tabla 1 Principales características de las parcelas objetos de estudio. El sistema de referencia utilizado es el EPSG:25830. (UTM 30N / ETRS89). La altura está referida al nivel medio del mar en Alicante. Las coordenadas están dadas en metros.

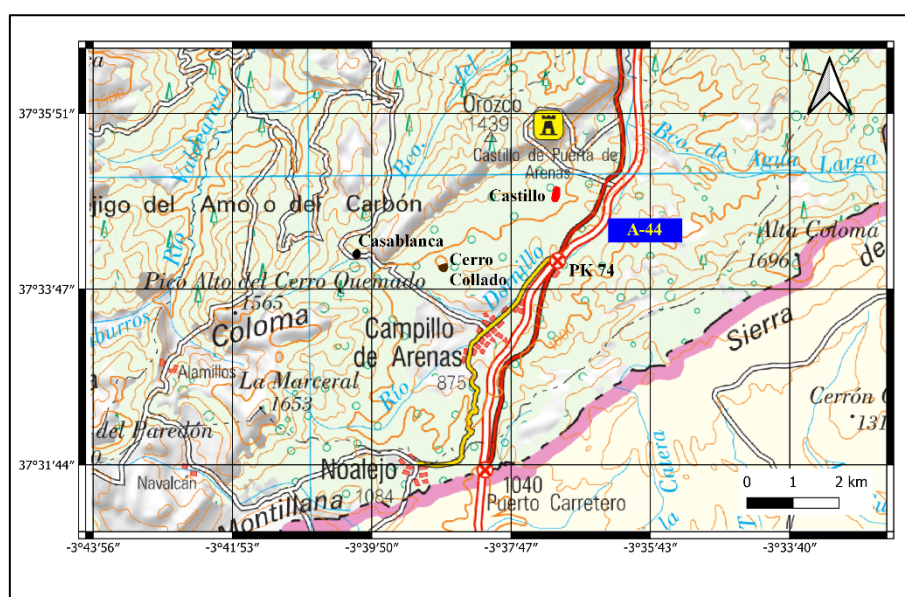


Figura 2 Vista general de la ubicación de las parcelas. El sistema de referencia utilizado es el ETRS89.

A continuación, se describirá con más detalle cada una de las parcelas.

La parcela Casablanca, (Figura 3) se encuentra situada junto al cortijo del mismo nombre junto a la carretera JV-2228. Se trata de una parcela que se puede clasificar como olivar de montaña por la altitud y la orografía y en zona de solana, lo que significa que recibe sol durante todo el día. No tiene ningún tipo de riego artificial, pero se considera una zona húmeda donde solía aflorar el agua de forma natural en varios puntos, sin embargo, con el cambio climático, ya no se producen este tipo de fuentes. El terreno es pedregoso abundando la roca caliza y sedimentaria con presencia de fósiles. Los olivos tienen 25 años y tienen dos o tres pies por planta. La recogida de la aceituna se realiza a base de vareadoras tradicionales y alguna mecanizada. El árbol se trata con los productos fitosanitarios mínimos recomendables, mientras que el suelo no se trata con fitosanitarios, salvo el ruedo del olivo.

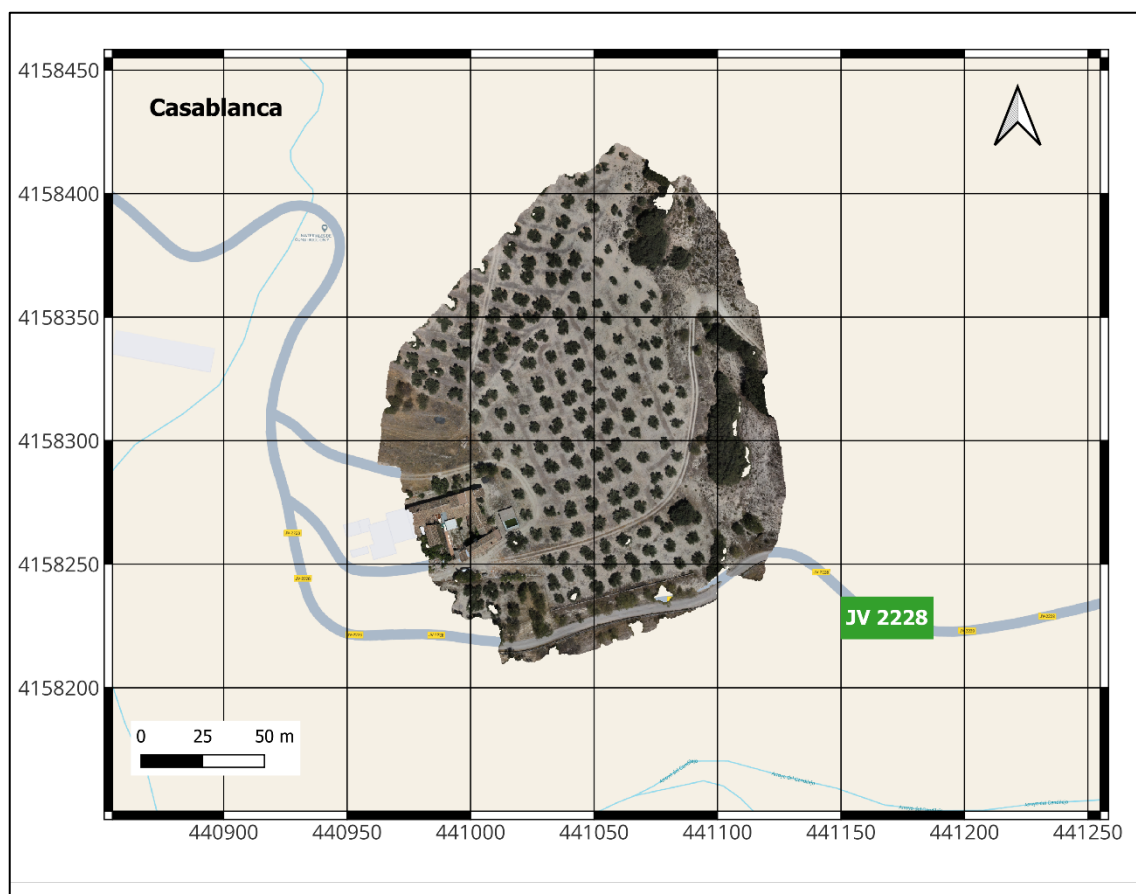


Figura 3 Ubicación de la parcela Casablanca. El sistema de referencia utilizado es el EPSG:25830. (UTM 30N / ETRS89). Las coordenadas están dadas en metros.

La parcela Castillo (Figura 4), se encuentra situada junto en la carretera que lleva al Castillo de Arenas. Se trata de una parcela que, a pesar de su altitud, presenta unas características más propias de campiña debido a la llanura del terreno y recibe rayos solares durante todo el día. Dispone de riego por goteo desde hace unos 15 años y

en la parte central, en época de lluvias se suele formar un humedal por el que antes del cambio climático, brotaba el agua de forma natural, siendo entonces dicho humedal de dimensiones mucho mayores a las actuales. La zona norte está limitada por un riachuelo que suele llevar agua de torrente. Es un terreno suelto con algunas rocas de pequeñas dimensiones. Los olivos tienen en torno a 50 años la mayoría, y las de la parte más alta son olivos de menor tamaño, con uno o dos pies, mientras que el resto, hacia el norte, tienen entre tres y cuatro pies por planta y constituyen el 70 % de la finca aproximadamente. La recogida se realiza por medios tradicionales con alguna mecanización. Tanto el suelo como el árbol se tratan con los productos fitosanitarios mínimos recomendables.

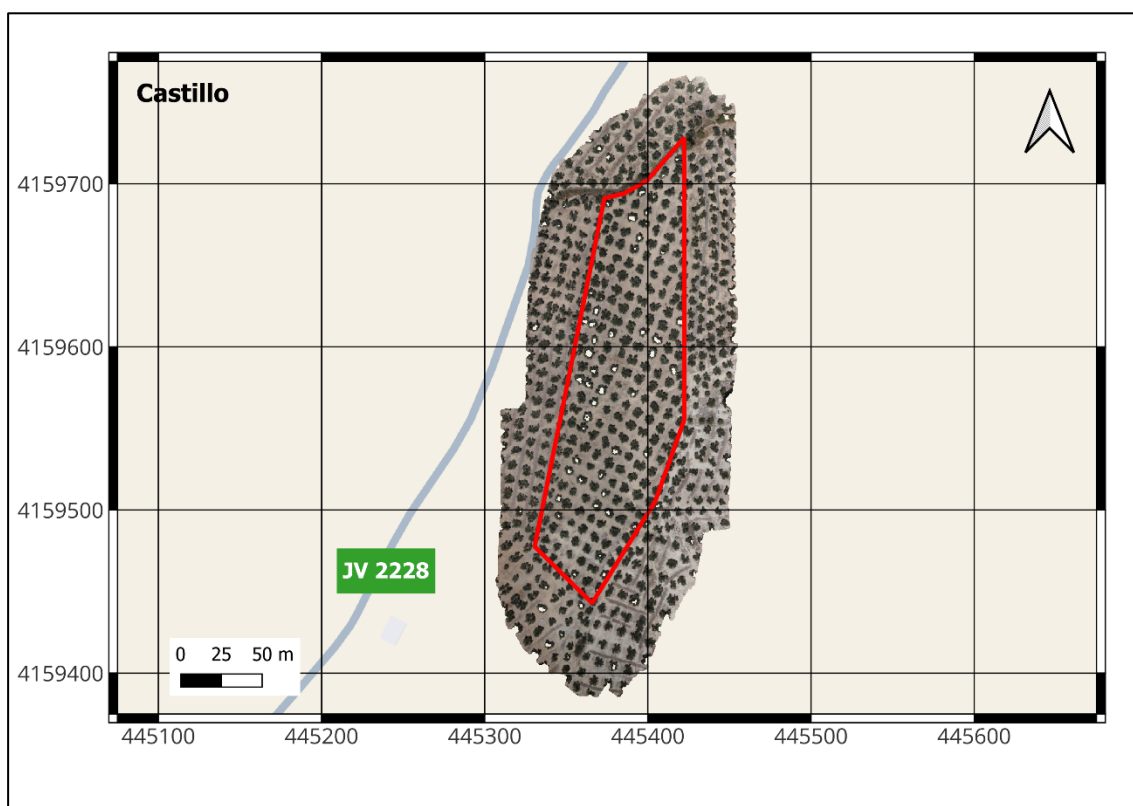


Figura 4 Ubicación de la parcela Castillo. El sistema de referencia utilizado es el EPSG:25830. (UTM 30N / ETRS89). Las coordenadas están dadas en metros.

La parcela Cerro Collado (Figura 4), se encuentra situada en el cerro homónimo, y se accede a ella desde la carretera JV-2228. Se trata de una parcela que por su orografía y altitud se puede considerar olivar de montaña en zona de semi-umbría, es decir, el sol solo le da de plano en la primera parte del día. Dispone de riego por goteo desde hace unos 15 años y, la parte baja de la finca situada por debajo del camino, es muy húmeda y suele brotar agua en época de lluvias a pesar del cambio climático, antes de este fenómeno, solía haber fuente casi todo el año. El terreno es arcilloso sin

apenas rocas. Los olivos tienen 50 años y suelen tener entre dos y cuatro pies cada planta. La recogida de aceituna se realiza por medios tradicionales y alguna vareadora mecánica. El árbol se trata con los mínimos productos fitosanitarios, mientras que el suelo, se trata abundantemente con los productos fitosanitarios necesarios y permitidos por ley debido a que es una zona que, por las características mencionadas, se cubre enseguida de vegetación que dificulta las tareas agrícolas.

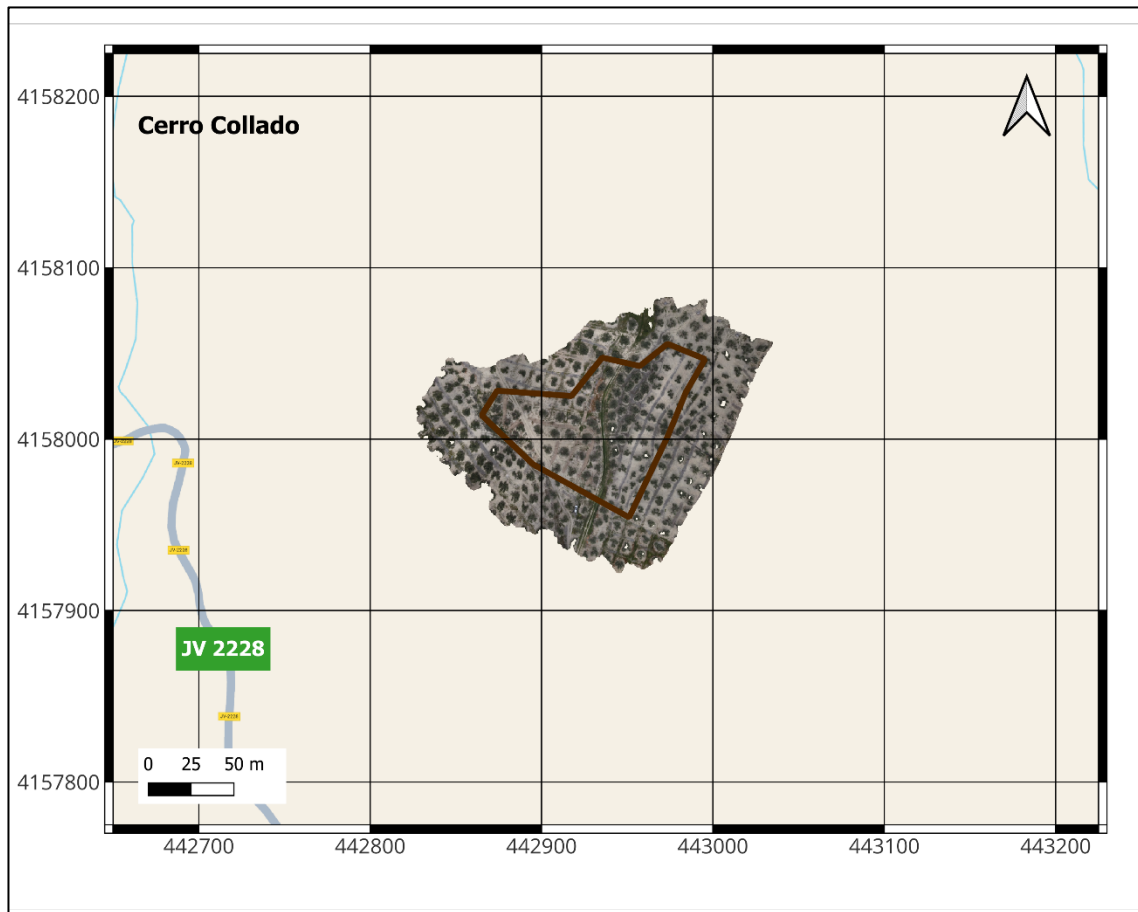


Figura 5 Ubicación de la parcela Cerro Collado. El sistema de referencia utilizado es el EPSG:25830. (UTM 30N / ETRS89). Las coordenadas están dadas en metros. En negro está la ruta seguida por el UAS para la toma de datos.

3.2. Material.

3.2.1. Los UAS empleados.

Para la realización de este trabajo se han empleado tres UAS diferentes: Matrice 300 RTK, DJI Mavic 3M y DJI Mavic 3T.

El Matrice 300 RTK (Figura 6) es un dron de tipo industrial de la casa DJI. Está alimentado por dos baterías TB60, lo que permite su cambio en caliente, esto es, se pueden cambiar las baterías sin necesidad de apagar el equipo. Con este sistema evitamos los típicos problemas que se pueden presentar cada vez que se reinicie un equipo. Está equipado con sensores anticolidión en todas las direcciones, lo que aumenta la seguridad durante su uso.



Figura 6 Matrice 300 RTK equipada con la cámara Zenmuse P1.

El equipo está pensado para poder utilizar simultáneamente múltiples sensores, siendo su carga útil de 2,7 kg, con un peso máximo al despegue de 9 kg. Las combinaciones de sensores que pueden hacerse son múltiples, habiendo utilizado dos configuraciones diferentes, en la primera únicamente se llevaba una cámara Zenmuse P1 y en la segunda se combinan una cámara H20T, que permite utilizar una cámara infrarroja y una Micasense RX a la vez.

Los equipos DJI Mavic 3M y DJI Mavic 3T (Figura 7) pertenecen a la nueva familia de drones DJI Mavic 3 Enterprise. Las diferencias entre los drones son mínimas y se centran fundamentalmente en el sensor utilizado. Así, el DJI Mavic 3M, además de una cámara RGB de alta resolución, lleva un sensor multiespectral, mientras que el DJI ·3T lleva un sensor infrarrojo. En cuanto a dimensiones, pesos y prestaciones los equipos son virtualmente idénticos. Su sistema de detección se basa en un sistema

de visión omnidireccional binocular, con un sensor de infrarrojos en la parte inferior de la aeronave.

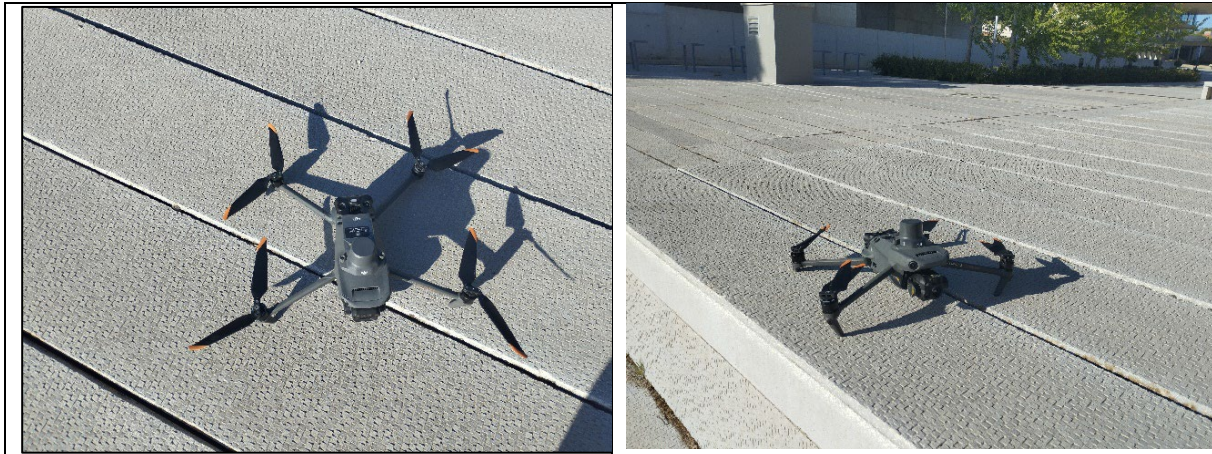


Figura 7 Drones DJI Mavic ·M (a la izquierda) y DJI Mavic 3T (a la derecha). Su única diferencia apreciable es la cámara de fotos que equipan.

Con estos equipos hay un cambio de mentalidad frente a la serie Matrice. Mientras que los Matrice están pensados para llevar diferentes tipos de sensores, los UAS de la serie Enterprise son auténticas cajas cerradas: no es posible adaptarlos a ninguna misión diferente para la que estén pensadas.

Cada equipo tiene sus ventajas e inconvenientes. Mientras que el Matrice 300 tiene como principal ventaja su versatilidad y como inconvenientes, su falta de autonomía, la real viene a ser de unos veinte minutos que puede variar en función del peso, y que su puesta a punto es mucho más laboriosa, por no hablar de su tamaño. Además, cada vez que se actualiza hay que comprobar si también es necesario actualizar cada uno de los sensores, con lo que una actualización puede convertirse en un proceso largo y tedioso. Frente a eso, la serie Enterprise tiene más autonomía, una media hora, es más cómodo de transportar y, sobre todo, ponerlo en el aire no lleva más de cinco minutos.

La principal ventaja de estos tres UAS es que vienen equipados con un módulo RTK, lo que permite que las coordenadas de las fotos tengan precisión centimétrica. Esta ventaja se pone de manifiesto durante el procesamiento de las imágenes, ya que la alineación se hace de una forma más rápida. Además, nos permite realizar levantamientos sin necesidad de puntos de control. Las principales especificaciones de estos equipos vienen recogidas en la Tabla 2.

Aeronave	MATRICE 300RTK	DJI3M	DJI3T
Dimensiones	810 × 670 × 430 mm	347.5 × 283 × 139.6 m	347.5 × 283 × 107.7 m
Distancia diagonal entre ejes	895 mm	380.1 mm	380.1 mm
Peso (con tan solo un estabilizador inferior único)	6.3 kg (con dos baterías)	951 g	920 g
Carga máx.	2.7 kg		
MTOM	9 kg	1050 g	1050 g
Precisión en vuelo estacionario (modo P, con GPS)			
	Vertical:		
Sistema de visión activado	±0.1 m	±0.1 m	±0.1 m
GPS activado	±0.5 m	±0.5 m	±0.5 m
RTK activado	±0.1 m	±0.1 m	±0.1 m
	Horizontal		
Sistema de visión activado	±0.3 m	±0.3 m	±0.3 m
GPS activado	±1.5 m	±1.5 m	±1.5 m
RTK activado	±0.1 m	±0.1 m	±0.1 m
Precisión de posicionamiento RTK			
Horizontal	1 cm + 1 ppm	1 cm + 1 ppm	1 cm + 1 ppm
Vertical	1.5 cm + 1 ppm	1.5 cm + 1 ppm	1.5 cm + 1 ppm
Autonomía	55 min	45 min	45 min
GNSS	GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo	GPS + Galileo + BeiDou + GLONASS (GLONASS solo es compatible cuando el módulo RTK está activado)	

Tabla 2 Principales especificaciones de los equipos dadas por el fabricante (DJI 2020), (DJI 2022) y (DJI 2023).

3.2.2. Equipos GNSS.

Para la realización del vuelo se utilizaron dos receptores diferentes. El primero de ellos es un receptor Topcon GR5 – RTK que se utilizó para dar coordenadas al punto que se utilizaría como base para la antena RTK a la que se enlazarían los UAS.

El segundo equipo es la estación móvil D-RTK 2, un receptor GNSS que nos da correcciones diferenciales en tiempo real que, a su vez, generan información de posicionamiento de precisión centimétrica para una mejor precisión relativa de los UAS. Las especificaciones dadas por el fabricante se encuentran en la Tabla 3.

Frecuencia GNSS	Recibe simultáneamente
	GPS: L1 C/A, L2, L5
	BEIDOU: B1, B2, B3
	GLONASS: F1, F2
	Galileo: E1, E5A, E5B
Precisión del posicionamiento	Punto único
	Horizontal: 1.5 m (Media cuadrática)
	Vertical: 3.0 m (Media cuadrática)
	Horizontal: 1 cm +1 ppm (Media cuadrática)
	Vertical: 2 cm + 1 ppm (Media cuadrática)

Tabla 3 Especificaciones de la base móvil D-RTK 2 (Fuente <https://bit.ly/3VnyKx8>).

A su vez, tanto al DJI Mavic 3M como al DJI Mavic 3T se le puede acoplar un módulo RTK cuyas características vienen reflejadas en la Tabla 4:

Módulo RTK	
Dimensiones	50.2 × 40.2 × 66.2 mm
Peso	24 ± 2 g
Interfaz	USB-C
Potencia	Aprox. 1.2 W
Precisión de posicionamiento RTK	RTK fijo:
	Horizontal: 1 cm + 1 ppm;
	Vertical: 1.5 cm + 1 ppm:

Tabla 4 Especificaciones del módulo RTK (Fuente: <https://bit.ly/3z74oHQ>).

3.2.3. Sensores utilizados.

Para la realización de este estudio se han utilizado diferentes sensores, que vienen recogidos de forma resumida en la Tabla 5

Sensor	RGB	IR	Multiespectral
Zenmuse P1	✓		
H20T	✓	✓	
Micasense			✓
DJI 3T	✓	✓	
DJI 3M	✓		✓

Tabla 5 Resumen de los sensores utilizados.

Los sensores Zenmuse P1, Zenmuse H20T y Micasense siempre fueron a bordo del Matrice 300 RTK, mientras que los DJI Mavic 3T y DJI Mavic 3M utilizaron sus propios sensores.

La cámara Zenmuse P1 (Figura 8) puede equiparse con objetivos de 24/35/50 mm, siendo en nuestro caso el objetivo de 35 mm, y va montada sobre un eje cardan que le permite fotografías cada 0,7 s en todas las direcciones.



Figura 8 Cámara Zenmuse P1 equipada con un objetivo de 35 mm.

Su sistema TimeSync 2.0 sincroniza las imágenes con el receptor RTK lo que permite que la captura de datos tenga precisión centimétrica. Sus principales características vienen dadas en la Tabla 6.

Dimensiones	198 × 166 × 129 mm
Peso	Aprox. 800 g
Objetivo	35 mm
Sensor	Tamaño del sensor (instantánea): 35.9 × 24 mm (fotograma completo). Tamaño de sensor (Área máx. de grabación de vídeo): 34 × 19 mm. Píxeles efectivos: 45MP. Tamaño de píxel: 4.4 µm
GSD (a 100 m)	1,25 cm
Tamaño de fotografía:	3:2 (8192×5460)
Rango de apertura:	f/2.8-f/16
Rango ISO	Foto: 100-25600. Vídeo: 100-25600

Tabla 6 Principales características de la cámara Zenmuse P1 (Fuente: <https://bit.ly/4coxuRo>).

La cámara H20T (Figura 9) es una herramienta multisensor compatible con el Matrice 300 RTK. Integra un sensor RGB con una resolución de 20 Mpx, una cámara termográfica radiométrica y un telémetro láser. Las imágenes que captura la cámara termográfica tienen un formato R-JPEG, incorporando información de la temperatura. Sus principales características vienen dadas en la Tabla 7.



Figura 9 Cámara H20T.

Dimensiones	167 × 135 × 161 mm
Peso	Aprox. 828 g
Objetivo	RGB: 4.5 mm (equivalente a 24 mm). IR: 13.5 mm (equivalente a 58 mm)
Sensor	Gran angular: CMOS 1/2.7", 20 MP. Térmica: Microbolómetro VOx no refrigerado
Banda espectral	IR: 8-14 μ m
GSD (a 100 m)	RGB: 3,5 cm. IR: 8,9 cm
Tamaño de fotografía:	RGB 5184×3888. Térmica: 640×512
Rango de apertura:	Normal: f/2.8-f/11. Nocturna: f/1.6-f/11
Rango ISO	Video: 100-25600. Foto: 100-25600

Tabla 7 Principales características de la cámara H20T (Fuente: <https://bit.ly/3XnXmZi>).

La Micasense RedEdge MX es un sensor multispectral desarrollado específicamente para drones, evitando las distorsiones típicas que se producen al utilizar sensores o cámaras modificadas. También puede ser utilizado de forma autónoma con tan solo suministrarle energía, ya que la configuración de la toma de dato se hace a través de conexión wifi con ayuda de un teléfono móvil o tablet.



Figura 10 Cámara Micasense RedEdge y su correspondiente placa de calibración

Dimensiones	83 mm x 59 mm x 45 mm			
Peso	231,9 g			
Objetivo	5.4 mm			
Sensor	Dimensiones 4,8 mm x 3.6 mm. Píxeles efectivos: 12 MP. Tamaño de píxel: 3.75 µm			
Banda espectral	Nombre	N ^a Banda	Centro	Ancho de banda
	Azul	1	475 nm	32 nm
	Verde	2	560 nm	27 nm
	Rojo	3	668 nm	16 nm
	Borde Rojo	4	717 nm	12 nm
	Infrarrojo cercano	5	842 nm	57 nm
GSD (a 100 m)	6,8 cm/píxel por banda			
Tamaño de fotografía:	1280 x 960			

Tabla 8 Principales características de la cámara Micasense RedEdge (Fuente: bit.ly/3xiZ43B).

En el DJI Mavic 3M encontramos una cámara multispectral de cuatro bandas. Este tipo de cámaras tiene su principal campo de aplicación en la agricultura de precisión, ya que nos permite obtener diferentes índices de vegetación, aunque su campo de aplicación se está dirigiendo cada vez más otras disciplinas como la minería, ingeniería civil o biología. Sus principales características se encuentran recogidas en la Tabla 9.

Objetivo	RGB: 24 mm Ms: 25 mm			
Sensor	RGB: CMOS 4/3. Píxeles efectivos: 20 MP Ms: 1/2.8 pulgadas; píxeles efectivos: 5 MP			
Banda espectral	Nombre	N ^a Banda	Centro	Ancho de banda
	Verde	1	560 nm	16 nm
	Rojo	2	650 nm	16 nm
	Borde Rojo	3	730 nm	16 nm
	Infrarrojo cercano	4	860 nm	23 nm
GSD (a 100 m)	2,7 cm / 4,6 cm			
Tamaño de fotografía:	RGB: 5280×3956 Ms: 2592×1944			
Rango ISO	100-6400			

Tabla 9 Principales características de la cámara a bordo del DJI Mavic-3M (Fuente: <https://bit.ly/3z74oHQ>).

Por su parte, el DJI Mavic 3T viene equipado con cámara térmica, que lo hace útil para misiones de extinción de incendios, búsqueda y rescate, inspecciones y operaciones nocturnas. Conviene recordar que también La fotografía infrarroja también se utiliza en arqueología (Collaro, y otros 2023). Sus principales características se encuentran recogidas en la Tabla 10.

Objetivo	RGB: 24 mm. IR: 40 mm
Sensor	RGB: CMOS de 1/2 pulgadas; píxeles efectivos: 48 MP. IR: Microbolómetro VOx no refrigerado. Pixel pitch: 12 µm
Banda espectral	IR: 8-14 µm
GSD (a 100 m)	3,6 cm / 13,2 cm
Tamaño de fotografía:	RGB: 8000×6000. IR: 640×512
Rango ISO	100-25 600

Tabla 10 Principales características de la cámara a bordo del DJI Mavic-3T (Fuente: <https://bit.ly/3Vwa0D7>)

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal (mm)	Tamaño de píxel (µm)	Dimensiones del sensor (mm)	Precalibrada
ZenmuseP1	8192 x 5460	35	4,4 x 4,4	35,9 x 24,0	No
H20T (RGB)	5184 x 3888	4,5	1,6 x 1,6	8,147 x 6,517	No
H20T (IR)	640 x 512	13,5	12 x 12	7,680 x 6,144	No
RedEdge-M, Blue	1280 x 960	5,5	3,75 x 3,75	4,800 x 3,600	Sí
RedEdge-M, Green	1280 x 960	5,5	3,75 x 3,75		Sí
RedEdge-M, Red	1280 x 960	5,5	3,75 x 3,75		Sí
RedEdge-M, Red edge	1280 x 960	5,5	3,75 x 3,75		Sí
RedEdge-M, NIR	1280 x 960	5,5	3,75 x 3,75		Sí
M3M (RGB)	5280 x 3956	12,29	3,3 x 3,3	17,424 x 13,055	Sí
M3M, Green	2592 x 1944	4,34	2,0 x 2,0	5,184 x 3,888	Sí
M3M, Red	2592 x 1944	4,34	2,0 x 2,0		Sí
M3M, RedEdge	2592 x 1944	4,34	2,0 x 2,0		Sí
M3M, NIR	2592 x 1944	4,34	2,0 x 2,0		Sí
M3T (RGB)	4000 x 3000	4,4	1,6 x 1,6	6,400 x 4,800	No
M3T (IR)	640 x 512	9,1	12 x 12	7,680 x 6,144	No

Tabla 11 Resumen de las características de los sensores.

3.3. Software utilizado.

3.3.1. Agisoft Metashape.

Metashape, antes conocido como Photoscan, es un producto de software de la casa Agisoft que permite realizar el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales, generando datos espaciales en 3D, que pueden utilizarse en una gran variedad de aplicaciones ya sea documentación del patrimonio cultural, topografía, agricultura e incluso producción de efectos visuales. Se ha utilizado la versión profesional 2.1.0 build 17532 (64 bits). Permite descargar y utilizar una versión de evaluación completa durante 30 días, lo que la hace especialmente atractiva para su utilización en cursos de corta duración. Tiene además licencias educativas, así como licencias flotantes que permiten la utilización del software en diferentes puestos simultáneamente.

Los productos finales que genera son nubes de puntos, modelos digitales de terreno, mosaicos georreferenciados, medidas de volúmenes, distancias, áreas y superficies, generación de modelos 3D, modelado 4D para escenas dinámicas, procesamiento de datos lidar, procesamiento de imágenes multiespectrales, detección automática de líneas eléctricas y procesamiento de imágenes por satélite. Además, se le pueden crear scripts en Python y Java API para aumentar sus prestaciones. El procesamiento se puede hacer en un ordenador personal o bien en la nube a través de un servicio de pago. La configuración recomendada para su uso es (Agisoft, L 2024):

Sistema Operativo:	Windows 7 SP 1 o posterior (64 bit), Windows Server 2008 R2 o later (64 bit), macOS Mojave o posterior, Debian/Ubuntu con GLIBC 2.19+ (64 bit)
Procesador	Intel Core i7 o AMD Ryzen 7 processor
Tarjeta gráfica	NVIDIA: GeForce GTX 7xx series y posterior, Quadro M4000 y posterior con soporte CUDA. AMD: Radeon R9 y posterior, Radeon Pro WX 7100y posterior con soporte OpenCL 1.2
Memoria	32 GB of RAM

Tabla 12 Configuración recomendada para ejecutar el Agisoft Metashape 2.1.

El precio de una licencia profesional es 3.499 US\$, y las actualizaciones son gratuitas de por vida. El precio de la versión estándar es de 179 US\$ Si la licencia es educacional los precios se reducen a 549 US\$ y 59 US\$ respectivamente.

Hay una comunidad de usuarios muy activa y el soporte es muy eficiente con numerosos tutoriales que cubren una gran variedad de aplicaciones y una base de conocimiento de muy fácil acceso.

3.3.2. Pix4Dmapper.

Al igual que Metashape, Pix4Dmapper es un software de procesamiento de imágenes que se obtienen mediante cámaras digitales, ya sean a bordo de drones o de otro tipo de dispositivos. Genera nubes de puntos, modelos digitales de superficie y ortomosaicos de calidad que se pueden utilizar en diferentes campos. Como diferencia con Metashape, cuenta con una línea de dispositivos de captura de datos propia, entre los cuales se incluyen cámaras y sensores que complementan al software, se ha utilizado la versión Pix4Dmapper 4.9.0 (64 bits). También tiene una versión de evaluación, pero su duración es de tan solo quince días.

Los productos finales que genera son básicamente los mismo que los de Metashape, si bien hay que tener en cuenta que Pix4Dmapper cuenta con una amplia familia de programas que realizan por separado lo que en Metashape viene de forma

integrada. De hecho, Pix4Dmapper, más que un programa, es una familia de programas cada uno con su propia funcionalidad. Por ejemplo, para el procesado de imágenes tenemos el *Pix4Dmapper*, si quisiéramos realizar la detección de tendidos eléctricos *PIX4Dinspect* y para trabajar con algún lenguaje de programación lo más apropiado sería usar *Pix4Dengine*.

La configuración recomendada para su uso es (Pix4D 2024):

Sistema Operativo:	Windows 8 o posterior (64 bit), Windows Server 2008 R2 o later (64 bit), macOS Mojave o posterior, Debian/Ubuntu con GLIBC 2.19+ (64 bit)
Procesador	Intel Core i7 o AMD Ryzen 7 processor
Tarjeta gráfica	NVIDIA: GeForce GTX con Open GL 3.2 y 2 GB de RAM.
Disco Duro	SSD
Memoria	32 GB of RAM

Tabla 13 Configuración recomendada para ejecutar el Pix4Dmapper 2.1.

El precio de una licencia profesional es 4.690 € y las actualizaciones son gratuitas solamente durante el primer año. También tiene la opción de utilización mediante pagos mensuales de 241,67 €.

Como en el caso anterior, también la compañía tiene en su página web numerosos tutoriales que cubren una gran variedad de aplicaciones y una amplia base de conocimiento. Como ventaja añadida la página web tiene versión en español.

4. DESARROLLO DEL TRABAJO.

4.1. Plan de vuelo.

La planificación de los vuelos se hizo con el programa DJI Pilot. A la hora de determinar el polígono de vuelo nos ayudamos de Google Earth. Una vez que el polígono estaba dibujado se descarga en formato KMZ y se carga en el controlador. Como se quiere mantener una altura constante sobre el terreno, de la página web del CNIG se descargan los MDT con 2 m de resolución de la zona, para incluirlo en el controlador. Todos los vuelos se hicieron siguiendo la misma configuración, que figura en la Tabla 14.

Altura de vuelo sobre el terreno	50 m
Solape longitudinal	80 %
Solape transversal	70 %
Margen	10 m
Tipo de vuelo	Rejilla sencilla

Tabla 14 Configuración de los vuelos.

A partir de estos parámetros el programa calcula de forma automática el plan de vuelo y estima la distancia recorrida, la duración del vuelo, el número de fotos, el área cubierta y el GSD. A continuación, se muestran tanto las rutas como los datos estimados para cada parcela y para cada cámara.

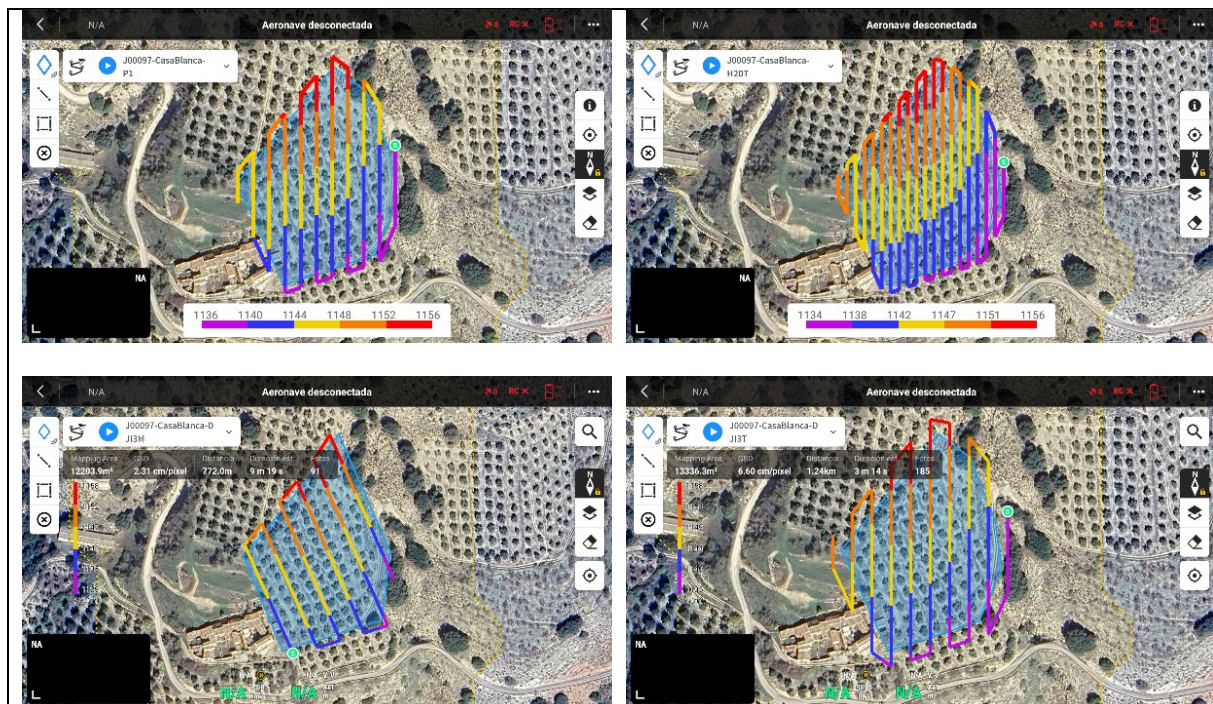


Figura 11 Plan de vuelo en Casablanca. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Matrice 300 RTK con P1 + Micasense, Matrice 300 RTK con H20T, DJI Mavic 3M y DJI Mavic 3T

Casablanca	P1	H20T	DJI Mavic 3M	DJI Mavic 3T
Distancia	1264 m	2155 m	772 m	13336 m
Duración estimada	6 m 11 s	31 m 17 s	9 m 19s	3 m 14 s
Fotos	369	948	91	185
Área	11201 m ²	11201 m ²	12204 m ²	13336 m ²
GSD	0,6 cm/px	4,4 cm/px	2,3 cm/px	6,6 cm/px

Tabla 15 Estimación dada por DJI Pilot del resultado de los vuelos para Casablanca.

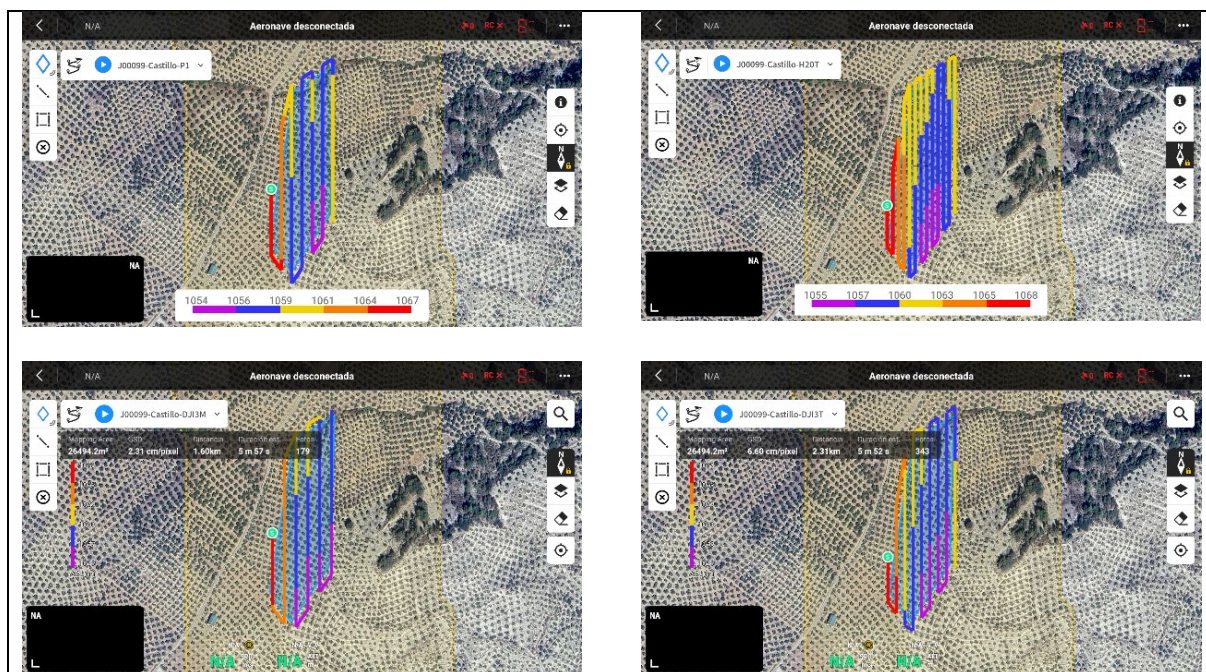


Figura 12 Plan de vuelo en Castillo. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Matrice 300 RTK con P1 + Micasense, Matrice 300 RTK con H20T, DJI Mavic 3M y DJI Mavic 3T.

Castillo	P1	H20T	DJI Mavic 3M	DJI Mavic 3T
Distancia	1863 m	3290 m	1600 m	26494 m
Duración estimada	13 m 47 s	24 m 25 s	5 m 57 s	5 m 52 s
Fotos	264	709	179	343
Área	26494 m ²	26494 m ²	26494 m ²	2310 m ²
GSD	0,6 cm/px	4,4 cm/px	2,3 cm/px	6,6 cm/px

Tabla 16 Estimación dada por DJI Pilot del resultado del vuelo para Castillo.

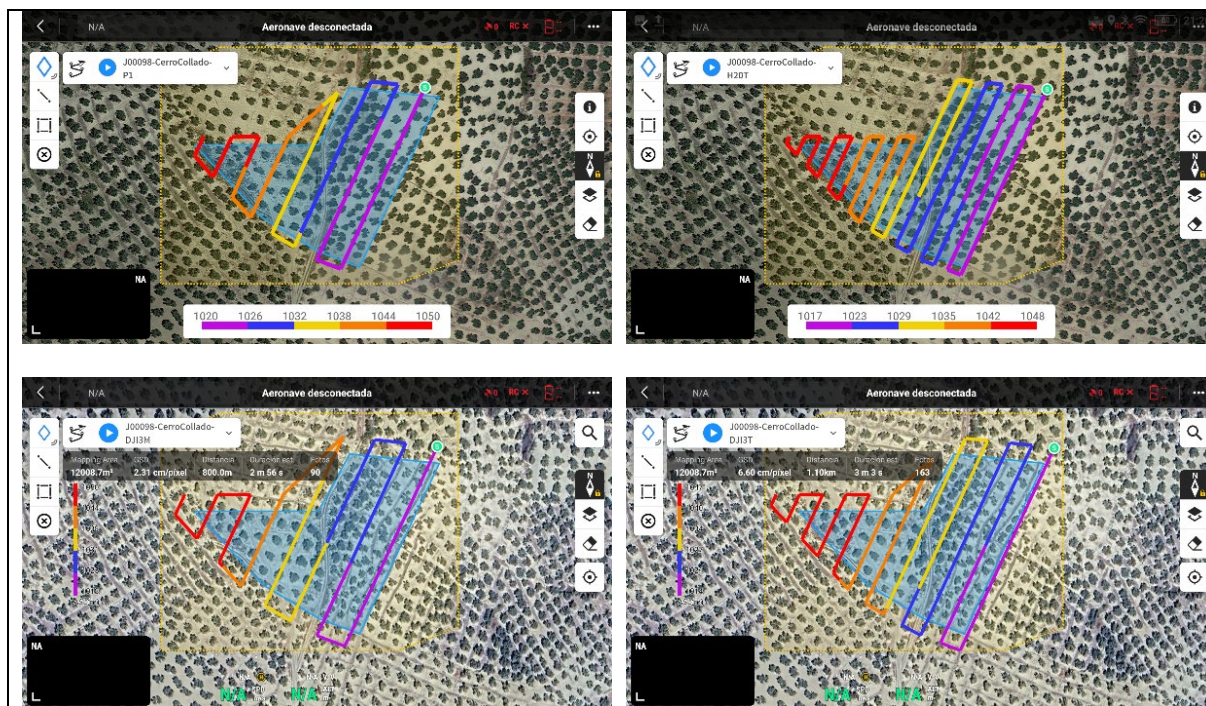


Figura 13 Plan de vuelo en Cerro Collado. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Matrice 300 RTK con P1 + Micasense, Matrice 300 RTK con H20T, DJI Mavic 3M y DJI Mavic 3T.

Cerro Collado	P1	H20T	DJI Mavic 3M	DJI Mavic 3T
Distancia	707	1244 m	800 m	1100 m
Duración estimada	2 m 18 s	9m 12 s	2 m 56 s	3 m 3 s
Fotos	104	274	90	163
Área	9614 m ²	9613 m ²	12009 m ²	12009 m ²
GSD	0,6 cm/px	4,4 cm/px	2,3 cm/px	6.6 cm/px

Tabla 17 Estimación dada por DJI Pilot del resultado del vuelo para Cerro Collado.

4.2. Realización de los vuelos.

En primer lugar, comentar que se decidió volar en dos épocas diferentes del año para que las cámaras térmicas y la multiespectral captaran las diferencias térmicas y de humedad en el terreno, de manera que en verano se voló Casablanca y Castillo, mientras que en invierno se voló Cerro Collado.

Una de las ventajas que tienen los UAS que hemos utilizado, es que pueden obtener su posición en tiempo real a través de un módulo RTK. Este posicionamiento puede realizarse de dos maneras:

- (a) Enlazando vía wifi el controlador con la Red Andaluza de Posicionamiento (RAP) o cualquier otro servidor que nos suministre correcciones diferenciales en tiempo real. Para ello lo único que necesitamos es un móvil que hará las veces de emisor wifi, cobertura y no perder el enlace móvil – controladora.
- (b) Utilizar la antena D-RTK 2 de DJI como base y que sea ella la que enlace con el UAS.

La ventaja del primer sistema es obvia: se evita llevar una antena junto con el correspondiente trípode. Los inconvenientes, desde el punto de vista teórico, los errores en posicionamiento del UAS van a depender de la distancia a las estaciones de referencia de la RAP, Estos errores vienen dados habitualmente dados por una parte constante (*a*), del orden de los milímetros, y otra (*b*) que es proporcional a la distancia a la base que viene dada en partes por millón. La fórmula habitual para representar este tipo de error es:

$$a + b \text{ ppm}$$

viniendo el error final dado por:

$$\varepsilon = \sqrt{a^2 + (b \times D)^2}$$

Como en este caso la distancia a la base (*D*, en kilómetros) va a ser del orden de las decenas de kilómetros, el término predominante va a ser *b x D* por lo que, si algún otro día se decide repetir el vuelo, se podría tener problemas al realizar el encaje

de las imágenes. Además, si en algún momento falla la cobertura o, simplemente, se aleja el móvil del controlador se perdería la precisión RTK.

El segundo sistema tiene la ventaja de que el enlace entre la estación y el UAS va a ser siempre más estable y no va a haber problema de pérdida de señal. El inconveniente que tiene este sistema es que la exactitud en posicionamiento absoluto no es muy elevada y requiere hacer un post-proceso para mejorarlo, porque la posición de partida de la antenna se obtiene en modo navegación.

Para salvar este inconveniente, la solución adoptada consistió en:

1. Obtener coordenadas precisas del punto de estación de la antenna con el receptor Topcon GR5 RTK-GNSS (Figura 14). Esta solución RAP-NRTK proporciona una precisión entre 0,004 m y 0,030 m en la componente este, entre 0,004 m y 0,059 m en la componente norte y entre 0,007 m y 0,094 m en la componente vertical (Garrido, y otros 2013).



Figura 14 Obtención de las coordenadas para la estación de referencia D-RTK2 de DJI.

2. A continuación, según se ve en la Figura 15, situar en el mismo punto la estación referencia D-RTK 2 e introducir las coordenadas que se han obtenido en el paso anterior.



Figura 15 Estación de referencia D-RTK2 de DJI.

De esta manera se asegura que el UAS no van a perder el posicionamiento RTK, por lo que se va a mantener siempre tanto el error como la precisión. La diferencia entre ambas coordenadas puede verse en la Figura 16.

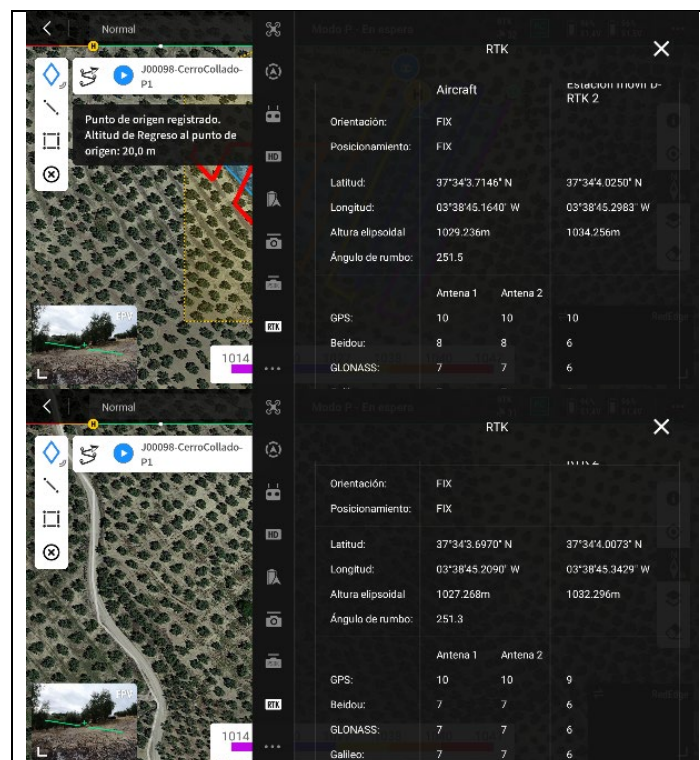


Figura 16 A la izquierda las coordenadas originales de la estación. A la derecha, las coordenadas de la estación dadas por el GPS. Obsérvese como han variado las coordenadas del UAS. En la foto que aparece abajo a la izquierda se puede comprobar que el UAS no se ha movido del sitio .

Las coordenadas de las diferentes bases aparecen en la Tabla 32

Punto de Estación	Latitud	Longitud	h
CASABLANCA	37° 34' 09.903"	-3° 40' 07.170"	1135.468
CERRO COLLADO	37° 34' 04.073"	-3° 38' 45.343"	1032.296
CASTILLO	37° 34' 51.962"	-3° 37' 10.885"	1073.135

Tabla 18 Coordenadas geodésicas de las diferentes bases. Están dadas en el sistema ETRS89 y las alturas (m) son elipsoidales.



Figura 17 Calibración de la cámara multiespectral Micasense RedEdge.

4.3. Procesado de las imágenes.

4.3.1. Fundamentos teóricos.

El procesado de las imágenes sigue el flujo de trabajo que se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Se comienza introduciendo las imágenes y las coordenadas de los puntos de apoyo y de control.

Los **puntos de apoyo** son aquellos que se toman en campo para poder realizar la orientación absoluta. Habitualmente, las coordenadas que se van a utilizar para los puntos de apoyo serán planas, en este caso UTM, y referidas al datum oficial (ETRS89). Deben cumplir las siguientes condiciones (Muñoz Lomas 2000):

- Distribuidos de manera uniforme por el terreno.
- Claramente identificables en todos los fotogramas en los que aparezcan.
- Tener buena estereoscopia, esto es, no deben estar muy al borde de la fotografía para evitar distorsiones.
- Estables.
- Se marcan con anterioridad a la salida a campo.

- Correcto posado de cota.
- Dimensión apropiada para la escala de la fotografía.
- Se debe entregar una reseña de cada uno de los puntos utilizados.

Los **puntos de control** son puntos fácilmente identificables en el suelo que sirven para comprobar la bondad del ajuste.

El número de puntos a tomar varía en función de la extensión del terreno y de la orografía del mismo. En general, se debe contar siempre con un número mínimo de cuatro puntos de apoyo y dos de control. A continuación, tiene lugar el proceso de orientación o alineación de las imágenes. En este proceso se determina dónde se tomaron exactamente las fotografías en el momento de su toma y, de esta manera, poder montar así el vuelo fotogramétrico. Naturalmente, al ser el punto de partida de todo el proceso, su resultado va a determinar la calidad de los productos finales que generemos. El resultado final será una nube de puntos dispersa formada por los puntos de paso y la posición de cada una de las fotografías.

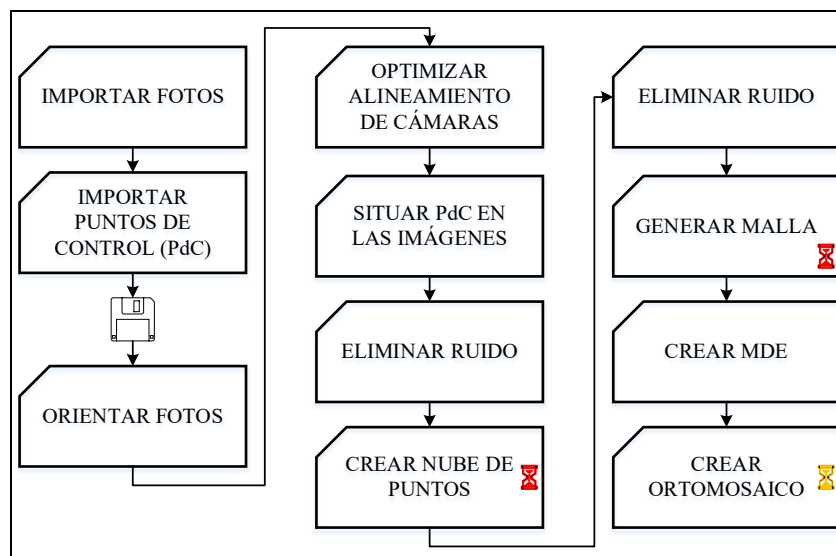


Figura 18 Esquema general del procesado fotogramétrico (Elaboración propia) Los relojes en rojo indican que son procesos que consumen muchos recursos y tiempo.

La posición de la cámara en el momento en el que se toma la fotografía viene definida por los parámetros de orientación interna y externa.

Los parámetros de orientación interna incluyen la distancia focal, las coordenadas del punto principal de la imagen y los coeficientes de distorsión del objetivo (Agisoft, L 2024).

Cada imagen almacena esta información en los metadatos EXIF, de manera que esto se hace automáticamente en la mayoría de los casos. Si no estuviesen

disponibles, los parámetros iniciales de orientación interior deben configurarse con el certificado de la cámara.

Los parámetros de orientación exterior definen la posición y orientación de la cámara. Se estiman durante la alineación de la imagen y constan de tres coordenadas y los tres ángulos de rotación, conocidos como ángulos de Euler.

Normalmente todo UAS está equipado con un sistema GNSS que permite determinar su posición con errores métricos, siempre mayores en altura, que van a utilizarse como parámetros de orientación exterior. La utilización de un sistema RTK lo que hace es reducir a unos pocos centímetros dicho error, mejorando el proceso de orientación de una manera evidente.

Para el cálculo definitivo de los parámetros, tanto interiores como exteriores, se utiliza aerotriangulación mediante ajustes de bloques basándonos en las ecuaciones de colinealidad. Se ajusta así de forma conjunta las mediciones fotogramétricas de los puntos de enlace con las mediciones a bordo. Como resultado se obtienen parámetros de orientación exteriores mucho más precisos.

El resultado final de la orientación de las imágenes serán los parámetros estimados de orientación externa (posición y rotación) e interna de la cámara, junto con una nube de puntos de enlace que contiene posiciones trianguladas de puntos clave coincidentes en las imágenes. Estos *puntos de enlace* serán puntos comunes a varias imágenes que van a servir para conectarlas. Si, además, se conoce su posición absoluta con precisión se denominarán *puntos de apoyo*. Normalmente en esta nube aparecen muchos puntos espurios que conviene eliminar para evitar problemas durante la generación de la nube de puntos. Este proceso, de eliminación de ruido, se realiza después de la *optimización* con herramientas de selección de puntos de la que disponen los programas.

Durante el proceso de *optimización* se realiza un proceso de ajuste completo del bloque fotogramétrico ya alineado, de manera que se mejoran tanto los parámetros de orientación externa como interna, así como las coordenadas trianguladas de los puntos de enlace. Este ajuste se basa en todas las medidas posibles, y sus correspondientes precisiones.

A partir de los parámetros calculados de orientación externa e interna de la imagen, se genera una nube de puntos densa basada en mapas de profundidad. Los mapas de profundidad contienen información relacionada con la distancia de las superficies de los objetos desde una perspectiva específica a un punto de referencia,

como la lente de la cámara. Metashape permite generar y visualizar un modelo de nube de puntos densa.

Los múltiples mapas de profundidad por pares generados para cada imagen, se fusionan en un mapa de profundidad combinado, utilizando la información excesiva de las regiones superpuestas para filtrar las mediciones de profundidad erróneas. Los mapas de profundidad combinados generados para cada imagen, se transforman en nubes de puntos parciales, que se fusionan en una nube de puntos final con un paso adicional de filtrado de ruido aplicado en las regiones solapadas.

Para cada punto de la nube de puntos final, se registra el número de mapas de profundidad combinados que contribuyen y se almacena como valor de confianza, que puede utilizarse posteriormente para realizar un filtrado adicional de los puntos de baja confianza. Esta nube de puntos puede editarse y clasificarse y utilizarse como base para posteriores etapas de procesamiento.

La siguiente etapa sería, con la información de la nube de puntos densa o con los datos de los mapas de profundidad, reconstruir un modelo poligonal o *Malla* que crea un modelo 3D detallado del terreno y permite visualizar con precisión su forma y estructura. Generalmente la malla se crea si queremos visualizar un objeto determinado, como por ejemplo un edificio o un jarrón, pero si queremos realizar un producto cartográfico, no es un proceso estrictamente necesario.

En este caso, es mucho más útil generar un *Modelo Digital de Elevaciones (MDE)* que proporciona datos precisos sobre las alturas del terreno. Conviene diferenciar entre Modelo Digital de Superficie y el de Elevaciones (Figura 19). En el primero tenemos las alturas de todos los elementos que aparecen en la imagen, mientras que, en el segundo, tras un proceso de clasificación, se queda solo con los puntos que pertenecen al terreno.

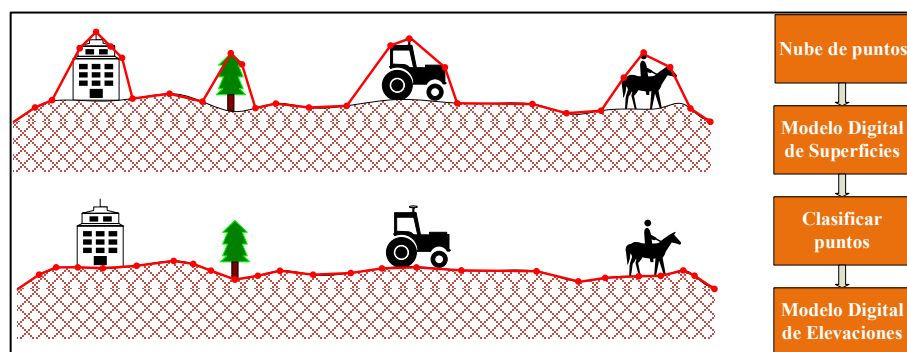


Figura 19 Diferencia entre MDS y el MDE.

Por último, se genera el *ortomosaico* que es una representación fotográfica y geométrica de la superficie terrestre, en el que se ha eliminado el efecto del relieve. Al ser una representación geométrica plana, se pueden realizar mediciones con exactitud y podemos utilizar la imagen obtenida con las mismas características que un plano a escala constante al no existir deformaciones relativas al relieve. Esto se consigue mediante la ortorrectificación en la que se eliminan los errores por perspectiva.

4.3.2. Procesado de datos con Metashape.

Una vez abierto el programa, aparece una ventana la ventana principal del programa aparece dividida en varios paneles (Figura 20) que se pueden redimensionar con los controles habituales de Windows. En estos paneles se muestra, de izquierda a derecha y de arriba abajo:

- (a) Espacio de trabajo, que contiene los bloques que componen el proyecto
- (b) El modelo, que podrá ser la nube de puntos, la malla, el ortomosaico
- (c) Los datos de cada uno de los bloques que componen el proyecto (sistema de referencia, tipo de dato...)
- (d) Miniaturas de las imágenes

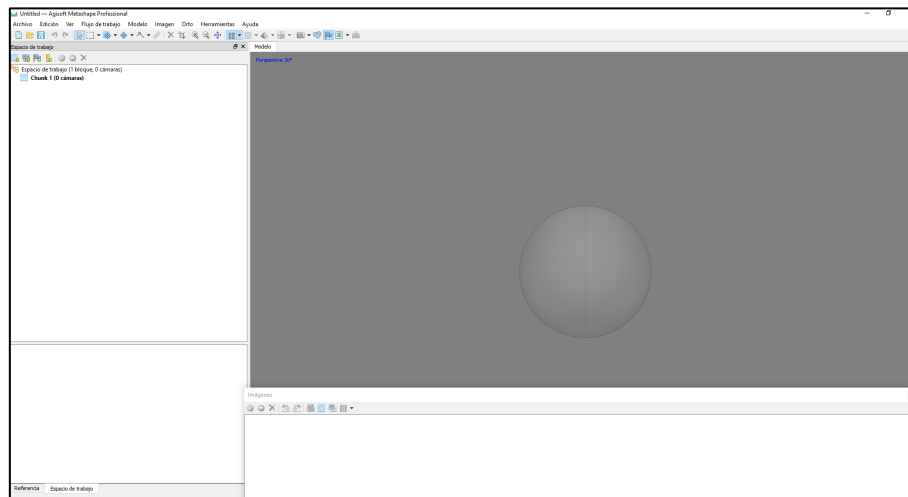


Figura 20 Interfaz gráfica del programa.

También se pueden abrir/cerrar otros paneles con la opción *Ver* del menú principal (Figura 21).

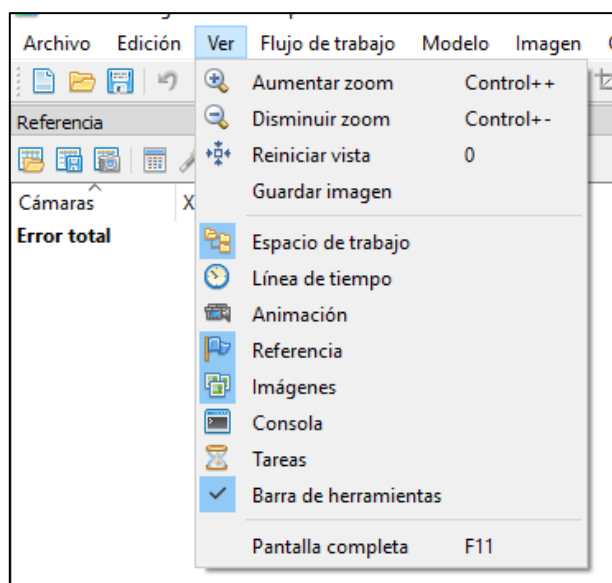


Figura 21. Vistas.

Una vez que tenemos seleccionadas todas las vistas, basta pulsar la pestaña correspondiente para poder visualizarla (Figura 22).

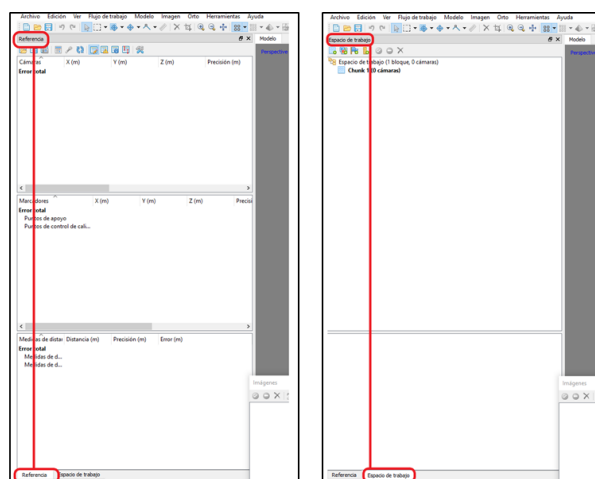


Figura 22. Selección de panel.

Una de las características que hacen que Metashape sea un programa muy versátil y potente es la utilización de bloques (*Chunk*). Un *Chunk* es una sección independiente dentro de un proyecto donde se lleva a cabo el procesamiento para un conjunto de imágenes y puntos de apoyo y control, por ejemplo, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** vemos todos los bloques que se han creado para el vuelo Cerro Collado.

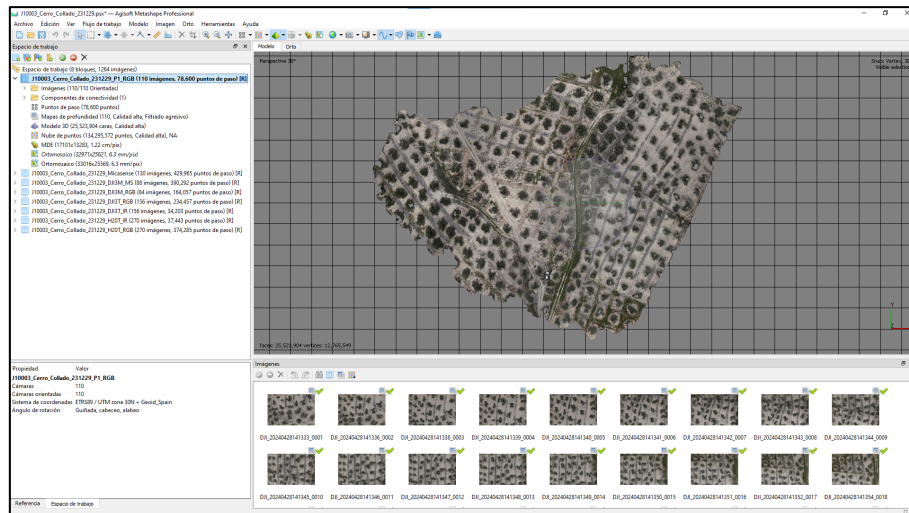
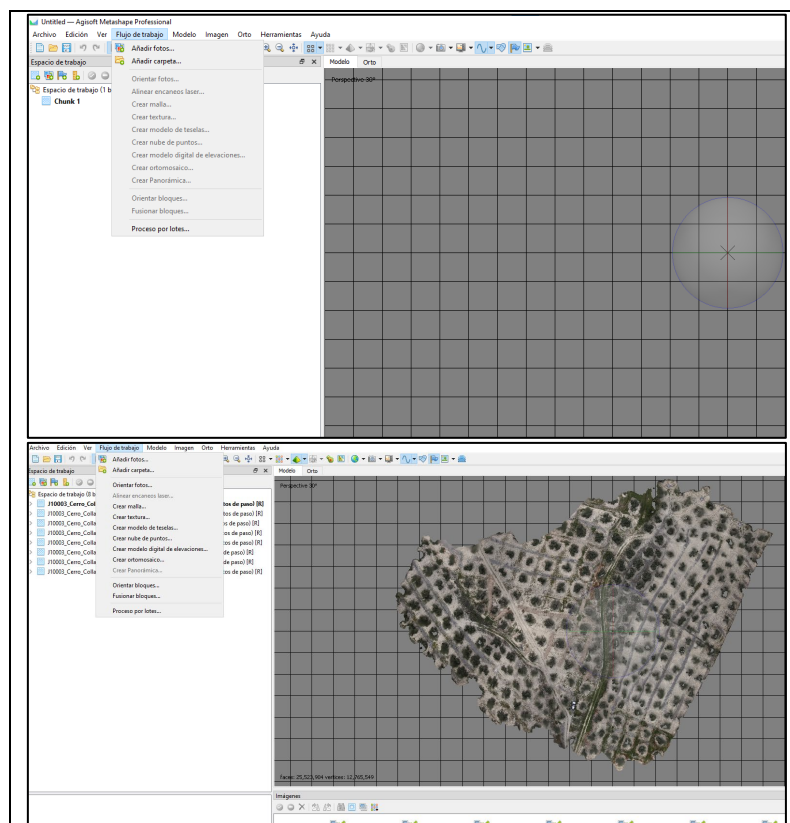


Figura 23 Trabajo con bloques.

Todo el procesado en Metashape se basa en un flujo de trabajo cuyas opciones se van a ir activando cuando la operación sea posible realizarla. De manera que, como se ve en la Figura 24, en la primera pantalla lo único que se puede hacer es *Añadir Fotos* mientras que al final del proceso se han activado todas las posibles opciones del menú *Flujo de Trabajo*.

Figura 24 Evolución del menú *Flujo de trabajo*, desde el inicio hasta el final.

Así una vez que se hayan introducido las fotos, se activará la opción *Orientar fotos* y así sucesivamente. Cada vez que se seleccione una opción, a su vez se

desplegará un panel en el que se podrán introducir los parámetros de procesamiento. Estos paneles, Figura 25, tienen a su vez menús desplegables en los cuales seleccionar más opciones. Es evidente que, aunque el proceso esté guiado, no es muy fácil de usar porque un usuario no experto, no solo no es que no sepa cuáles son los parámetros más adecuados para realizar el procesamiento, sino que no puede entender algunos de los términos que aparecen en los menús. Como ventaja, tiene que el procesamiento puede adaptarse fácilmente a las necesidades del usuario. Estos dos puntos se verán más claramente cuando se vea el modo que tiene Pix4Dmapper de realizar el procesamiento.

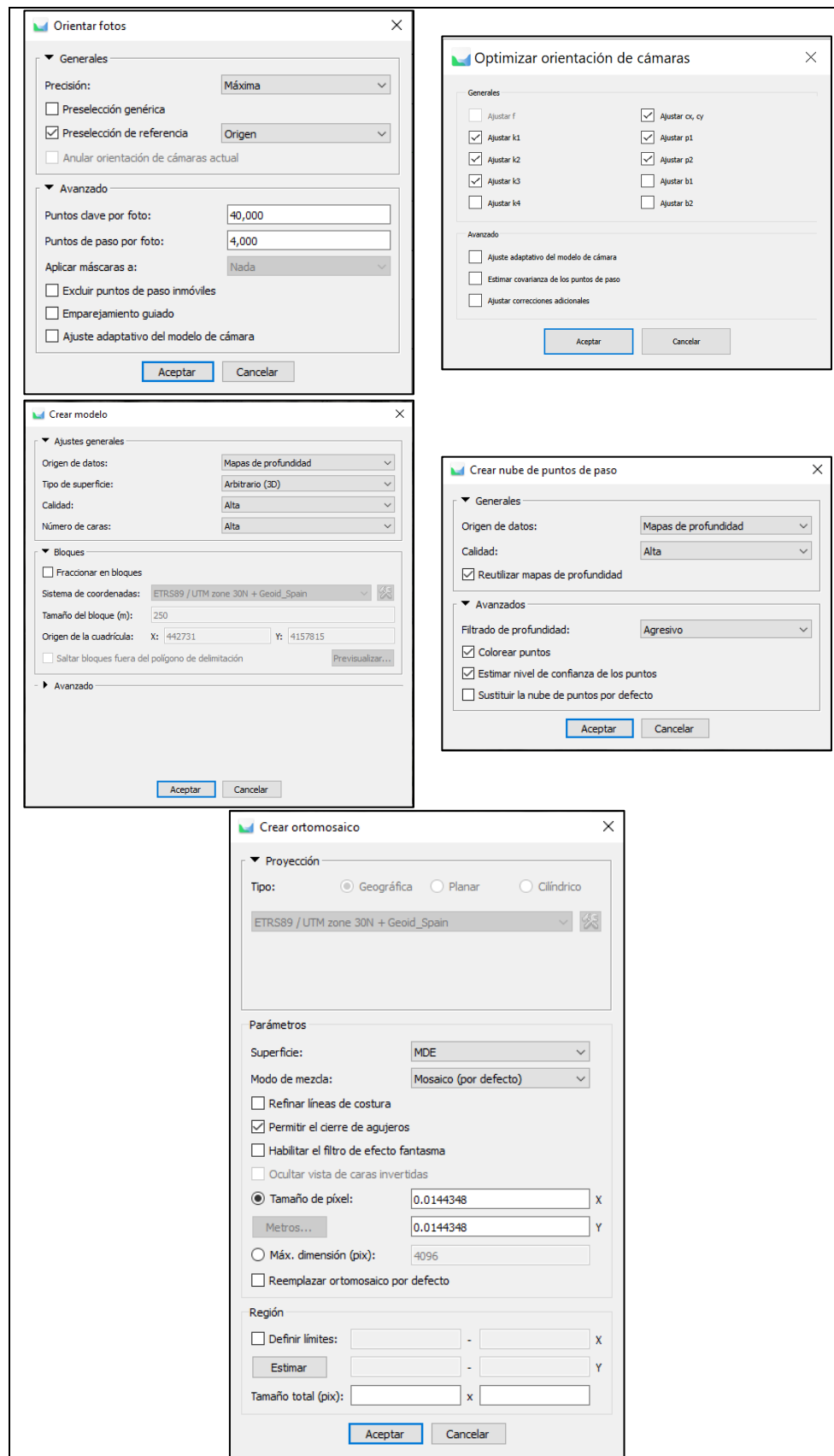


Figura 25. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Etapas a seguir en el procesado con Metashape: Orientación, Crear Modelo, Crear nubes de puntos, Crear Ortomosaico.

En la Figura 25 aparece el flujo de trabajo habitual en Metashape, desde inicio (Orientar las imágenes) hasta la generación del ortomosaico. Aunque se ha incluido la generación de la Malla, este proceso no es imprescindible y, en aplicaciones topográficas, puede obviarse. Esta metodología paso a paso que sigue Metashape presenta un grave inconveniente. El tiempo de procesamiento de los datos muchas veces es de varias horas, e incluso días, por lo que hay que estar pendiente de cuando finaliza un proceso para empezar el siguiente. Esto da lugar a la aparición de tiempos muertos si, por ejemplo, el procesamiento finaliza de noche. Afortunadamente Metashape incluye una herramienta que permite evitar este problema. Se puede realizar un *Procesamiento por lotes*, donde se ejecuta una serie de tareas sin intervención manual (Figura 26).

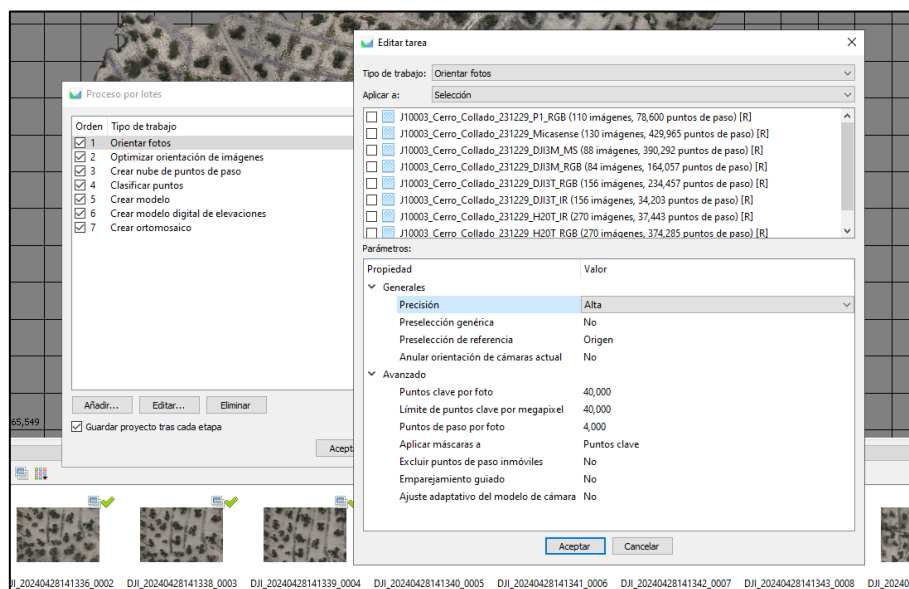


Figura 26 Procesado por lotes.

En el *Proceso por lotes*, se puede seleccionar el tipo de trabajo que se quiere hacer, los parámetros del mismo y a qué bloques se le quiere aplicár. Esta función ha sido tremendamente útil a la hora de realizar este proyecto, tras haber comprobado cuáles eran los parámetros adecuados para realizar el procesamiento, bastaba con cargar en cada bloque (Zenmuse_P1, H20T_RGB, H20T_IR, Micasense, DJI3M_RGB, DJI3M_MS, DJI3T_RGB y DJI3T_IR) las imágenes correspondientes y ejecutar mediante esta herramienta todos los pasos sin estar pendiente de cuando acababa cada uno de ellos.

El procesamiento de imágenes térmicas y multiespectrales es ligeramente diferente. De acuerdo con (Agisoft, L 2024) en el procesamiento de imágenes térmicas no va a ser

necesario calcular la malla y, al final habrá que utilizar la calculadora raster que trae incorporada el programa para obtener la temperatura.

Para el procesamiento de imágenes multiespectrales se han seguido las directrices descritas en (Sivanandam, Turner y Lucieer 2022) y (Agisoft, L s.f.). La principal diferencia respecto al anterior es que previo a realizar el procesamiento, hay que calibrar la reflectancia de las imágenes. Con la calculadora raster (Figura 31) se pueden calcular aquellos índices que resulten de interés para su posterior tratamiento con otro programa, como QGIS.

El procesamiento de imágenes termográficas es más complicado. De entrada, hay dos tipos de formatos TIFF (Tagged Image File Format) y R-JPG / R-JPEG (Radiometric Joint Photographic Experts Group). Básicamente, en un fichero en TIFF se almacena imágenes de mapa de bits. Se comprimen sin pérdida de datos y todos los datos pueden ser editados y almacenados, incluyendo información de temperatura. Su mayor inconveniente es que tienen un tamaño superior al de la mayoría de los archivos y su principal ventaja es que no se pierde calidad de imagen.

El formato R-JPG almacena un fichero JPG, que es un archivo de imagen, junto con fichero TIFF, que en su momento podemos extraer.

Inicialmente, Metashape no procesaba las imágenes R-JPEG y las trataba como imágenes RGB normales de 8 bits. Si se estaba interesado en la extracción de valores de temperatura del ortomosaico, era necesario preprocesar las imágenes en una aplicación externa, *ImageJ.exe*², para extraer el correspondiente archivo TIFF, de banda única con punto flotante valores, donde cada valor representaba el valor de temperatura. En la actualidad el procesamiento es posible, pero solo en la versión profesional.

El procedimiento para imágenes TIFF es (Agisoft, L s.f.):

- Cargar imágenes.
- Orientar fotos.
- Construir MDE.
- Construir ortomosaico.

² Este software puede descargarse gratuitamente de <https://github.com/gpereyrrairujo/IRimage>

- Aplicar la calculadora ráster para extraer los valores absolutos de las temperaturas del ortomosaico termal a partir de una fórmula que depende del fabricante de la cámara.

Para el procesado de imágenes R-JPG o bien se extrae el fichero TIFF mediante una aplicación externa, o bien se sigue el siguiente proceso (Agisoft, L s.f.):

- Cargar imágenes, seleccionando sistema Multi-cámara.
- Orientar fotos.
- Construir MDE.
- Construir ortomosaico.
- Visualización de los valores de la temperatura. Para ello, utilizando la calculadora ráster se define la fórmula, que dependerá del fabricante de la cámara, que transforma los valores brutos en valores de temperatura.

El procedimiento, para unificar criterios, que se ha seguido ha sido el procesado con imágenes TIFF.

4.3.3. Procesado de datos con Pix4Dmapper.

A diferencia de Metashape, todo el flujo de trabajo en Pix4Dmapper es tremendamente intuitivo. En la Figura 27 se ve cómo todo el proceso está guiado a base de ventanas emergentes, en las solo hay que limitarse a seguir las instrucciones. En el caso de duda, o desconocimiento, basta confiar en el buen criterio de los creadores del programa y aceptar las opciones por defecto. Todo el proceso se hace secuencialmente y de una sola vez.

Tampoco Pix4D puede generar mapa con valores de temperatura a partir de las imágenes producidas por Mavic 3T o la H20T, por lo que se ha seguido el mismo proceso que con Metashape, primero se convierten en formato TIFF con ayuda de *ImageJ.exe* y luego se procesan normalmente.

Al no estar ninguno de los sensores calibrados, el mapa de temperaturas que se va a obtener en ambos casos, no es absoluto sino relativo; por lo que habrá diferencias entre los mapas de temperaturas obtenidos con la H20T y la DJI3T.

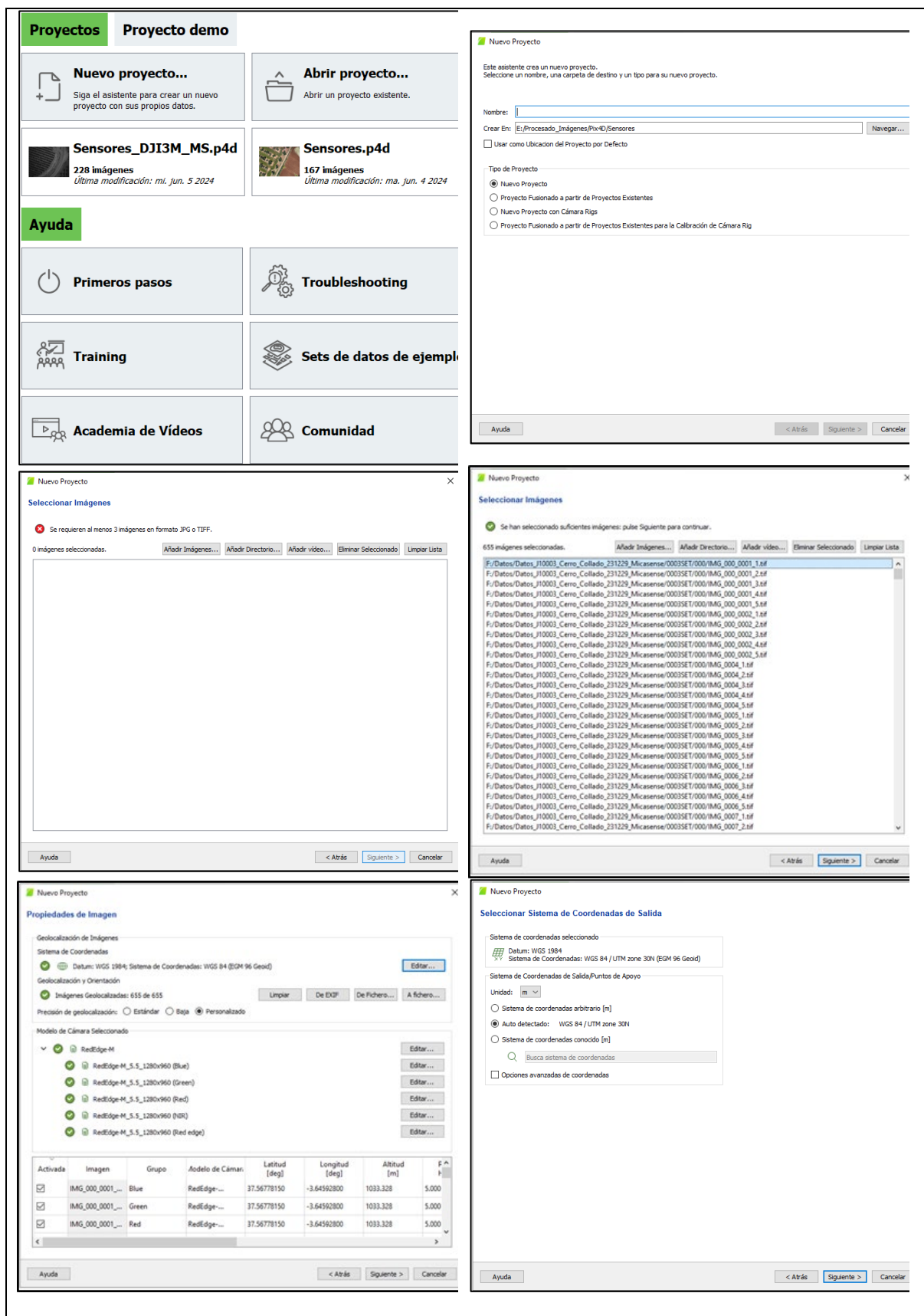


Figura 27 Flujo de trabajo para el Pix4Dmapper. Las etapas van de izquierda a derecha y de arriba a abajo.

El orden es:

- Crear proyecto.
- Cargar imágenes.
- Seleccionar sistema de coordenadas de salida.
- Plantilla de opciones de procesamiento (Figura 28).

En esta última etapa vamos a seleccionar el tipo de procesamiento que se quiere realizar de entre los que nos proponen. Se puede ver que el sistema describe el producto final que se va a obtener en función.

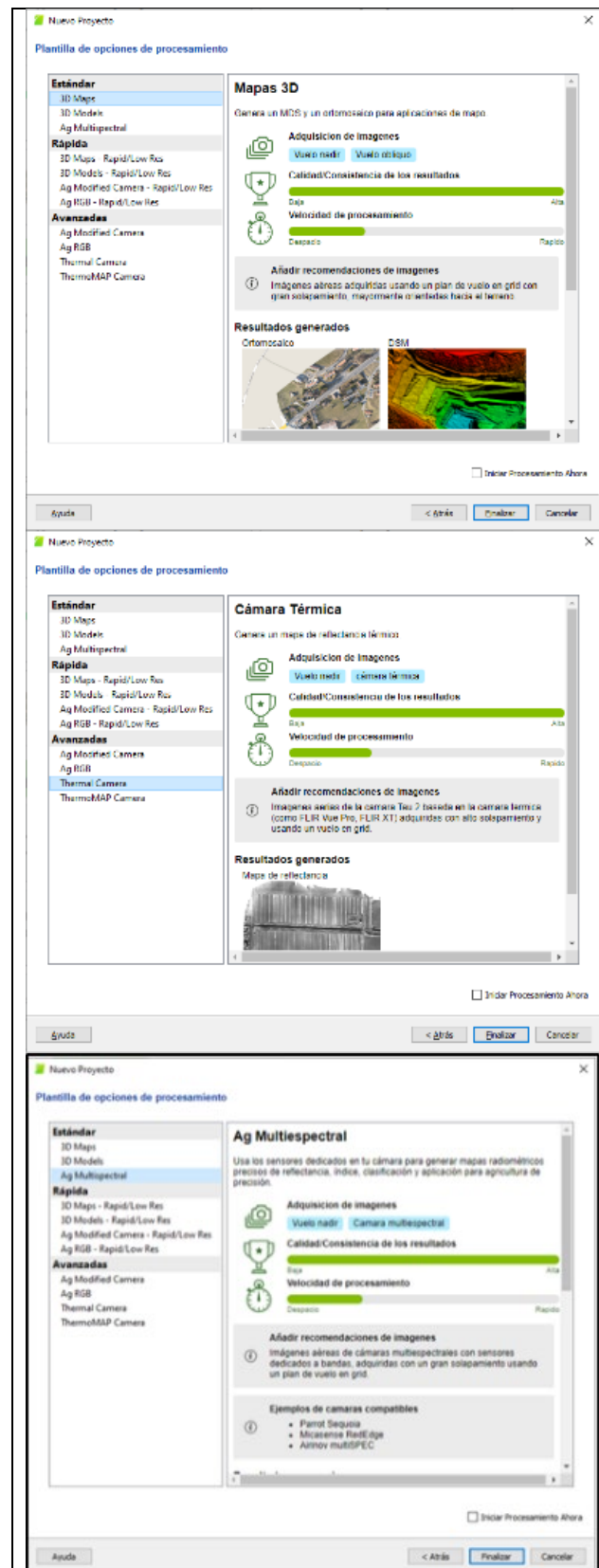


Figura 28 Plantilla de opciones de procesamiento. De arriba abajo: Mapas 3D, Cámara térmica y Cámara Multiespectral.

Una vez que se haya elegido el producto final aparece la posición de las cámaras sobre una imagen del terreno (Figura 29) y bastaría con pulsar *Inicio* para que todo el proceso se realizase de forma automática.



Figura 29 Pantalla previa al inicio del procesamiento.

Se ve claramente que todo el proceso está muy guiado, es tremendamente intuitivo, pero no se tiene ningún tipo de información acerca de cuáles han sido los parámetros que se han utilizado a la hora de hacer el procesamiento. Si se quisieran modificar, se tendría que ir a *Opciones de Procesamiento* y ahí seleccionar los parámetros para cada una de las etapas (Figura 30). Una de las cuestiones que se aprecian es que Pix4D, a diferencia de Metashape, se calcula el índice NDVI directamente.

El NDVI o índice de verde es un indicador que señala el verdor, densidad y salud de la vegetación en cada píxel de una imagen aérea. Se calcula a través de la fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR-rojo}{NIR+rojo}.$$

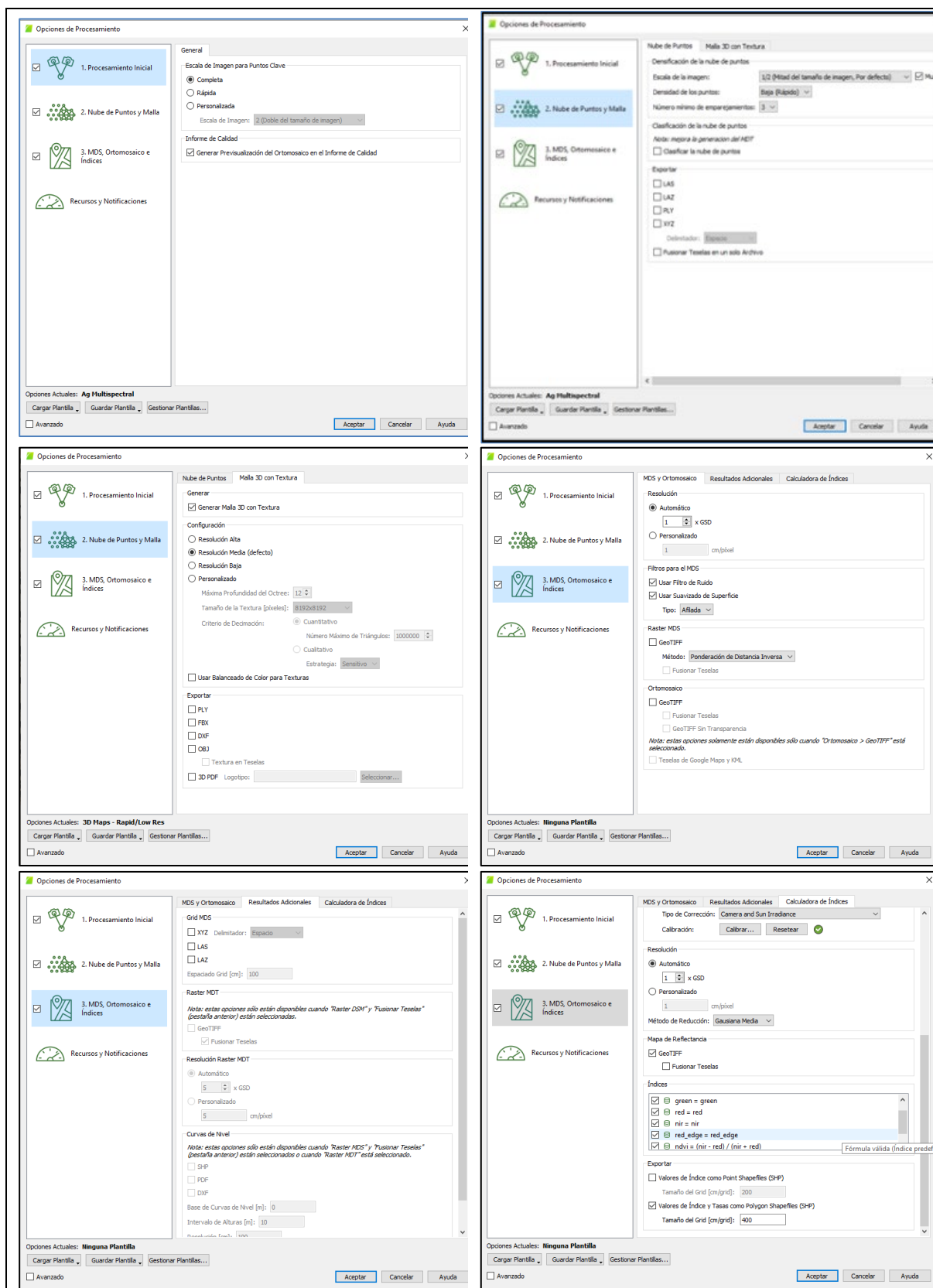


Figura 30 Opciones de Procesamiento. De arriba abajo y de izquierda a de derecha: Procesamiento inicial, Nubes de puntos y Mallas, y MDS, Ortomosaicos e Índices.

Por último, todos los parámetros de procesamiento pueden guardarse en un fichero para ser utilizados posteriormente en otro procesado. También se ha utilizado esta característica para asegurar que todas las imágenes se han procesado de la misma manera.

4.3.4. Parámetros utilizados durante el procesamiento.

Las imágenes se han procesado con un ordenador portátil cuyas características vienen reflejadas en la Tabla 19

Sistema Operativo	Windows 11 Education 10.0.22631
Procesador	Intel Core i7-13700H
Memoria RAM	32 Gb
Disco Duro	SSD de 1Tb
Tarjeta Gráfica	NVIDIA GeForce RTX 4070

Tabla 19 Ordenador utilizado para el procesado.

Se han tomado parámetros comunes para poder realizar el procesamiento en idénticas condiciones. Además, durante el procesado, el ordenador ha estado completamente dedicado a esta tarea, para evitar que otros procesos pudiesen utilizar los recursos y, de esta manera, enmascarar el tiempo real de procesado. Los principales valores de estos parámetros vienen recogidos en la Tabla 20. En el caso de que algún parámetro no fuera configurable, se ha tenido que dejar el que por defecto utiliza el programa.

Orientación		
	Precisión	Alta
	Puntos clave por fotos	40000
	Puntos de paso	4000
Crear Malla		
	Calidad	Alta
	Número de caras	Alta
Generar nube de puntos de paso		
	Origen de datos	Mapas de profundidad
	Calidad	Alta
	Filtrado	Agresivo
Crear ortomosaico		
	Superficie	MDE

Tabla 20 Parámetros utilizados durante el procesamiento.

4.4. Productos obtenidos.

Los productos finales que se han obtenido son (Tabla 21): la malla, la nube de puntos, el modelo digital de superficies, la clasificación de los puntos, el modelo digital de elevaciones y el ortomosaico para cada una de las bandas y un mapa de índices NDVI; lo que hace un total de productos de 77 productos por parcela, la mayor parte de cuáles no tienen por qué tener un sentido inmediato, como, por ejemplo, la malla en la banda NIR de una cámara hiperespectral. Como hay tres parcelas y se procesa con dos softwares nos encontramos con que el número final de productos es de 462.

Sensor	P1	H20T		Micasense	DJI3M		DJI3T	
Bandas	RGB	RGB	IR	MS	RGB	MS	RGB	IR
Nube de puntos	1	1	1	5	1	4	1	1
Malla	1	1	1	5	1	4	1	1
MDS	1	1	1	5	1	4	1	1
MDE	1	1	1	5	1	4	1	1
Ortomosaico	1	1	1	6	1	5	1	1
Total	5	5	5	26	5	21	5	5

Tabla 21 Número de productos que se pueden generar en función de la cámara y del sensor. En el caso de las cámaras multispectrales se ha considerado un producto por banda más el índice NDVI

En aras de la claridad, es preferible no presentar todos los resultados y representar solo una selección de ellos. Los productos que se van a representar aparecen reflejados en la Tabla 22

Sensor	Producto
P1	Ortomosaico — MDS
H20T IR	Mapa térmico
Micasense	NDVI
DJI3M MS	NDVI
DJI3T IR	Mapa térmico

Tabla 22 Productos finales a representar

Cada uno de estos productos se generará para cada parcela y para cada software

En la representación de los NDVI la escala va, en todos los casos, en el intervalo [-1, 1]. Los MDE se han sacado todos también en el mismo rango de altura, variable en cada parcela, para que las diferentes representaciones sean comparables entre sí. En todos los casos el procedimiento ha sido generar el fichero en formato TIFF y realizar los mapas utilizando el QGIS.

A continuación, se comentarán algunos de los resultados obtenidos. Se ha preferido mostrar toda la zona procesada y no solo la zona de interés, dentro del marco, porque es la mejor forma de ver con que software se ha realizado el procesamiento.

En el procesado en RGB se aprecia que Metashape presenta algunas zonas en blanco, si bien esto se puede evitar fácilmente aceptando la opción de “Permitir el cierre de agujeros” o bien utilizando las herramientas de edición de imágenes que también tiene el programa.

Los modelos digitales generados parecen casi idénticos y no parece que haya diferencias apreciables entre ellos. No obstante, si se analizan los histogramas (Figura 35) se ve que en el modelo generado por Metashape hay mucho más ruido.

La cámara multispectral nos permite ver detalles que no aparecen en el ortomosaico. Así, en la Figura 43 se puede apreciar en la zona centro el humedal y en la norte el torrente que lleva aguas de escorrentía. Al estar efectuado el vuelo en verano, aparece prácticamente seco. Por el contrario, en la Figura 50, al estar realizado el vuelo en invierno, se aprecia claramente la existencia de zonas húmedas donde solía haber fuentes.

Los valores del índice NDVI que genera PIX4D son más elevados que los que genera Metashape. Una posible razón podría estar en el modo de calcular la reflectancia ambos programas. Además, la diferencia entre los valores NDVI que presenta las imágenes tomadas con la cámara Micasense frente a la cámara del DJI Mavic 3M pueden deberse a que cada uno trabaja, y lo calcula, en longitudes de onda diferentes.

Del mismo modo, los sensores térmicos no están calibrados, por lo que los resultados que se obtienen no son temperaturas absolutas sino relativas.

Por último, a la hora de procesar las imágenes obtenidas con las cámaras multispectrales, se ve que la información que presentan ambos programas es muy diferente. Mientras que en Metashape (Figura 31) es necesario introducir la fórmula para calcular el índice NDVI, Pix4Dmapper calcula por defecto ese índice (Figura 32) y muestra mucha más información acerca de los resultados.

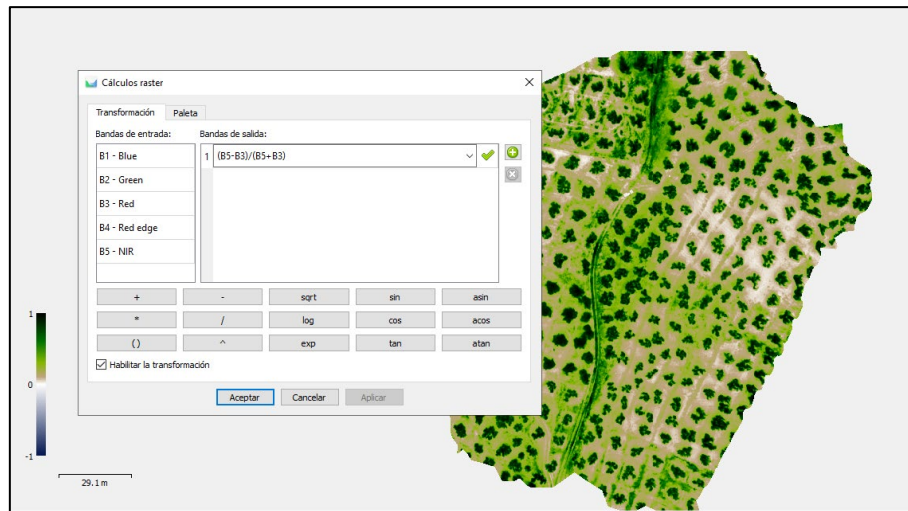


Figura 31 Cálculo del índice NDVI en Cerro Collado con Metashape.

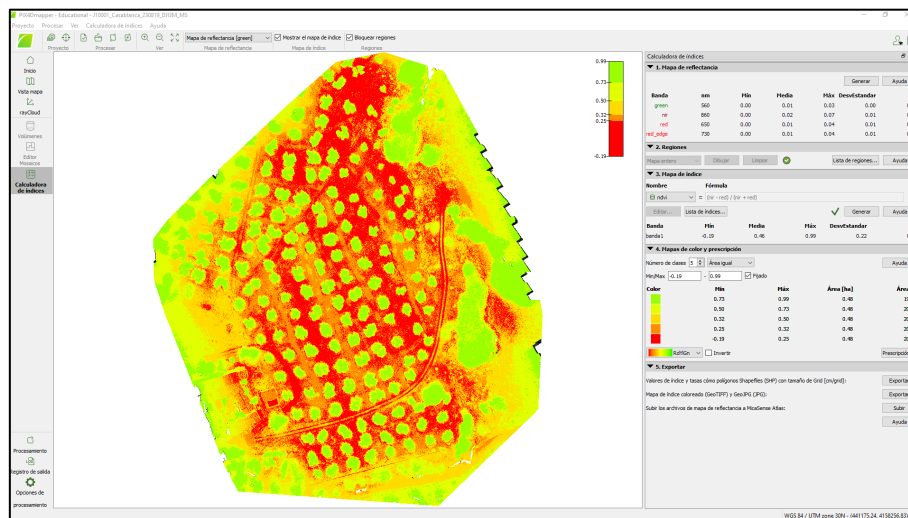


Figura 32 Cálculo del índice NDVI en Casablanca, con Pix4Dmapper.

La comparativa de las imágenes se muestran siguiendo el siguiente orden de parcelas:

- Casablanca,
- Castillo,
- Cerro Collado
- El orden de productos es:
- Ortomosaico generado por la Zenmuse P1
- DMS generado por la Zenmuse P1
- Mapa térmico generado por la H20T
- Índice NDVI generado por la Micasense
- Índice NDVI generado por la DJI Mavic 3M
- Mapa térmico generado por la DJI Mavic 3T

Se comparan los mismos productos procesados por los dos programas, ya que no tendría sentido, por ejemplo, comparar el MDE generado por la P1 con el MDE generado por la H20T en RGB, ya que sus GSD son diferentes.

También se muestra en un caso los histogramas del MDE que genera Metashape con el de Pix4Dmapper, para ver cuál de los dos es más detallado. Los resultados obtenidos con los otros productos son similares.

Cada producto ha generado un informe de unas quince páginas por cada procesado, de manera que hay un total de 48 informes, de manera que por razones de economía, se muestran solo dos de ellos, en el anexo adjunto, para poder comparar el tipo de información que hay que uno de ellos.

4.4.1. Presentación de resultados

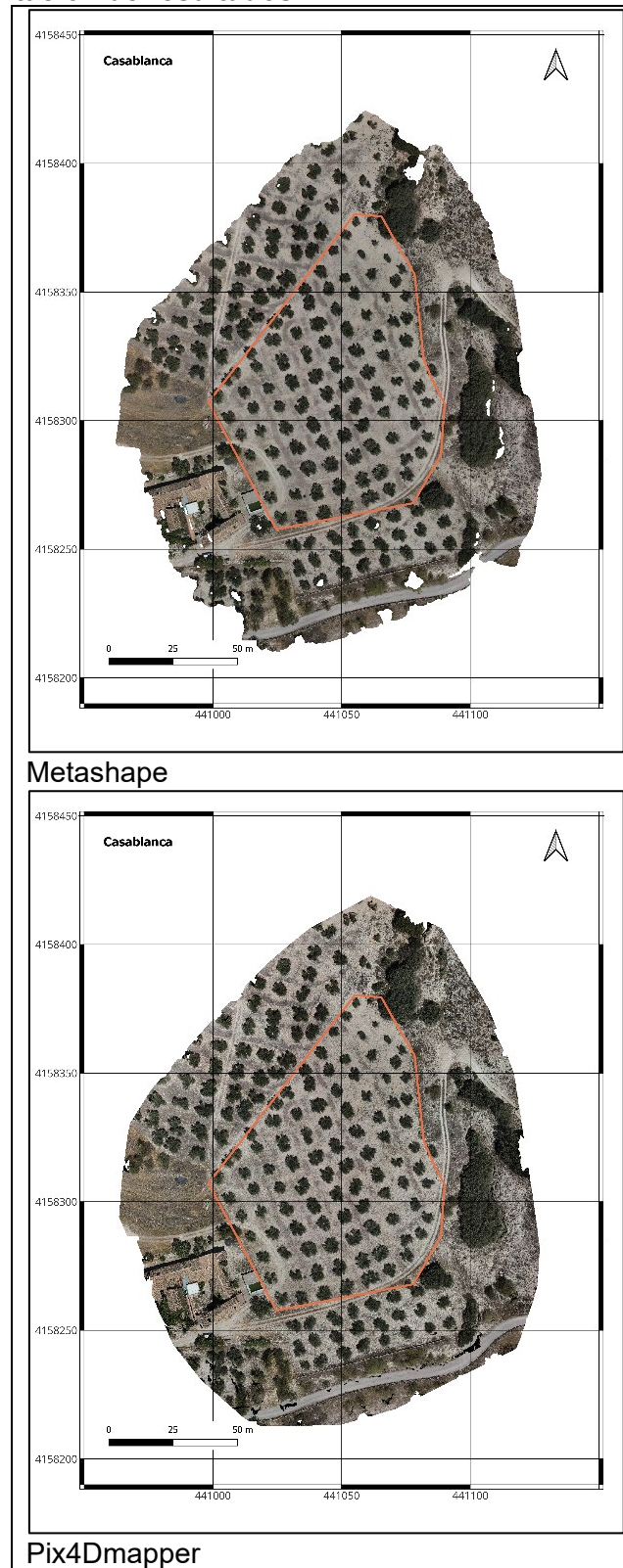


Figura 33 Ortomosaico RGB de Casablanca obtenido con la cámara Zenmuse P1. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

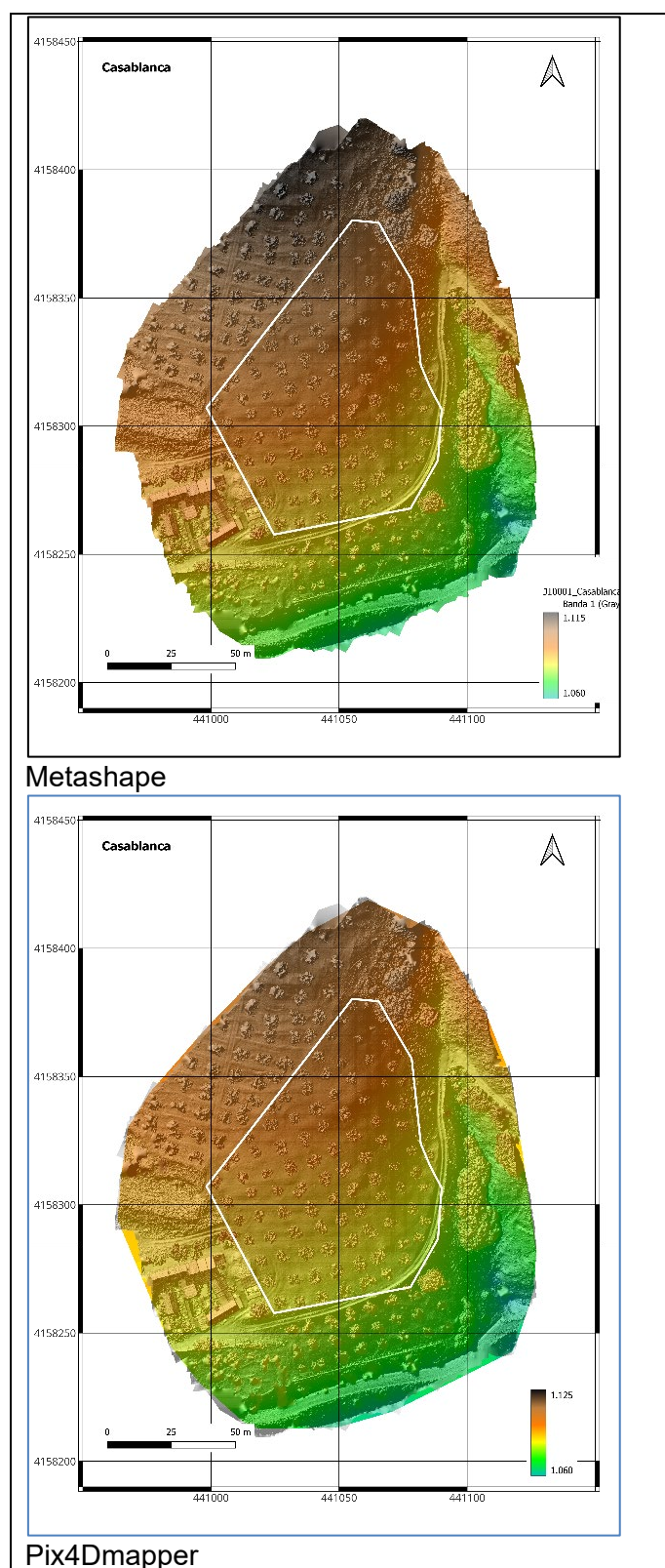


Figura 34 Modelo Digital de Elevaciones de Casablanca obtenido con la cámara Zenmuse P1. En blanco, la zona de estudio. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

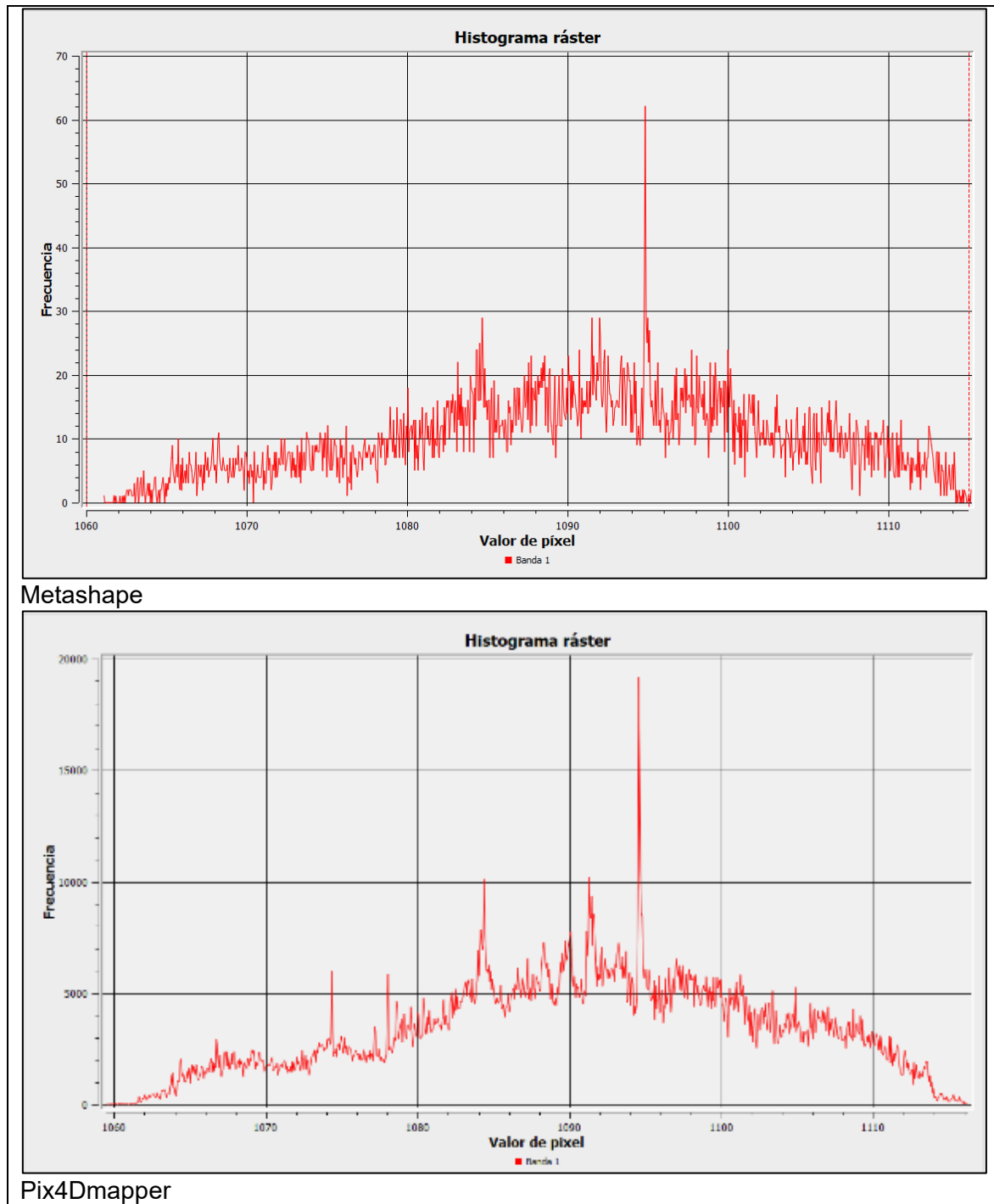


Figura 35 Histograma del MDE de Casablanca obtenido con la cámara Zenmuse P1. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

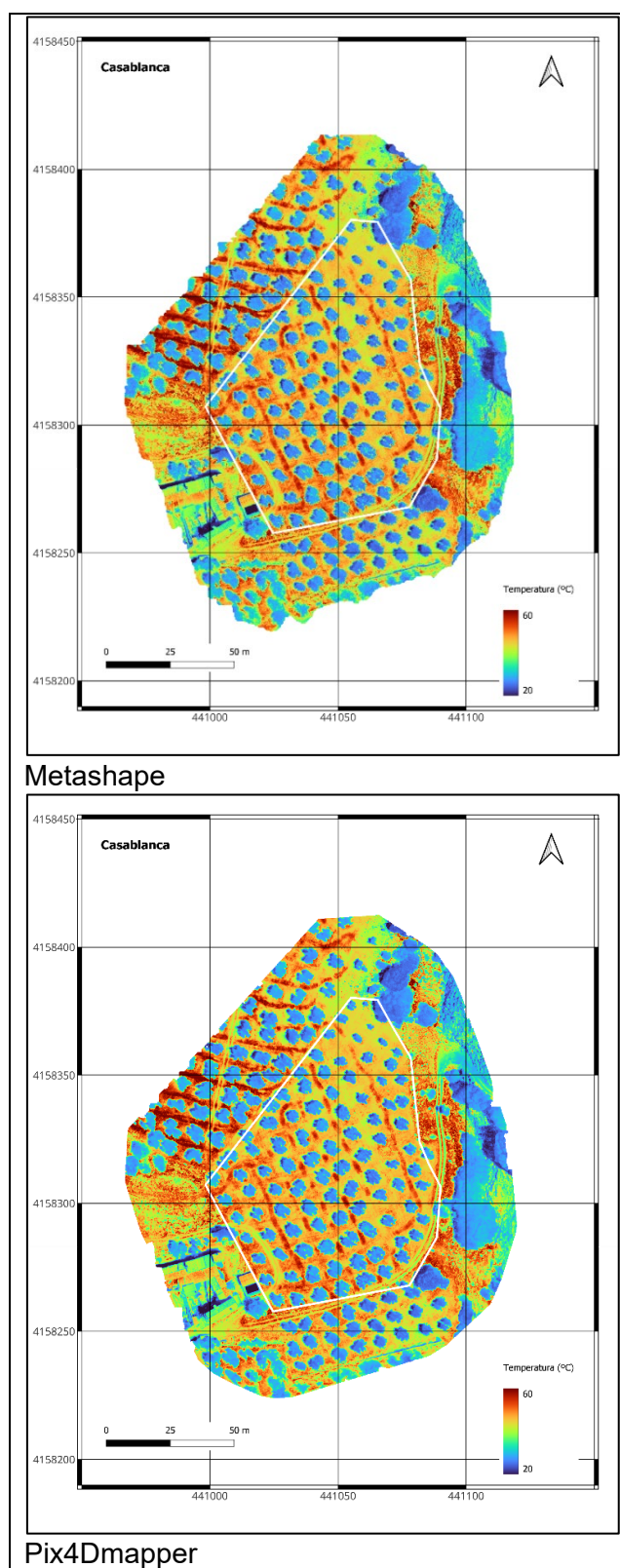


Figura 36 Mapa térmico de Casablanca obtenido con la cámara H20T en IR. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

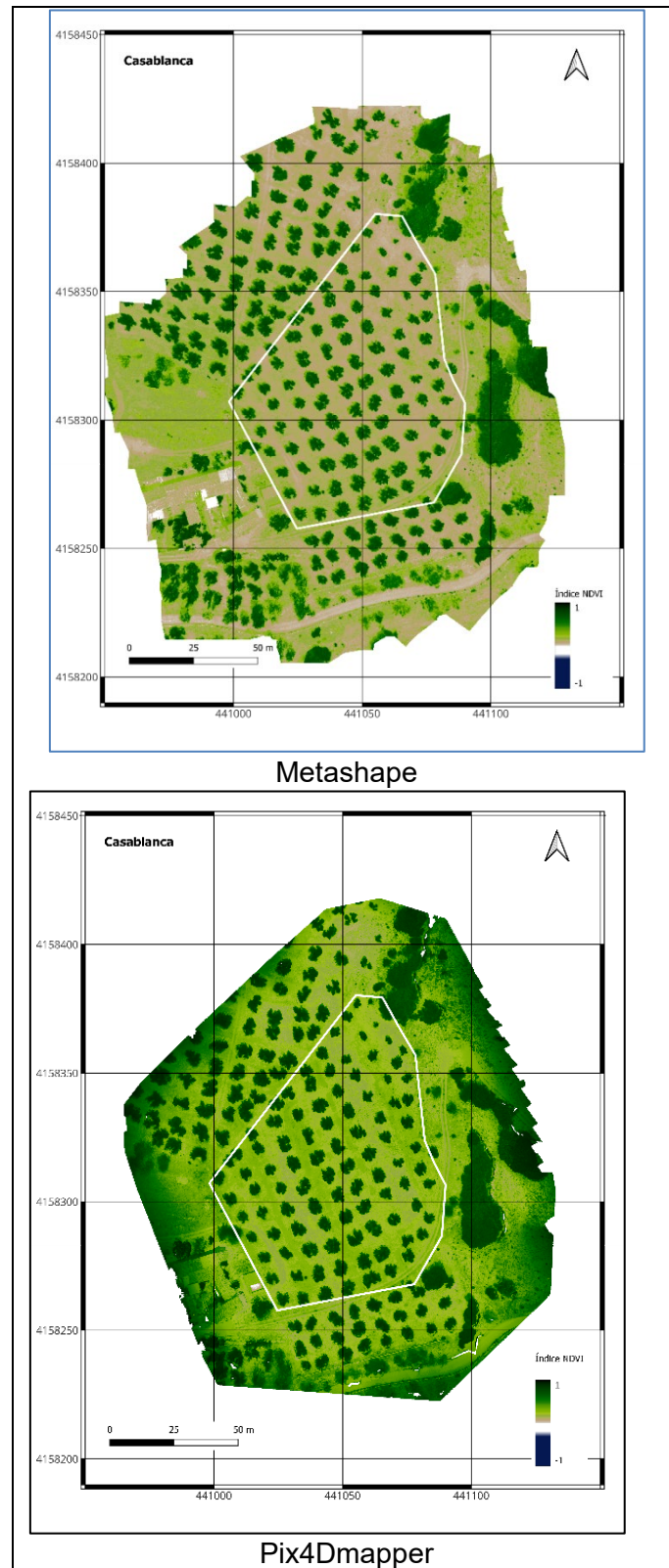


Figura 37 Ortomosaico NDVI de Casablanca obtenido con la cámara Micasense RedEdge. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

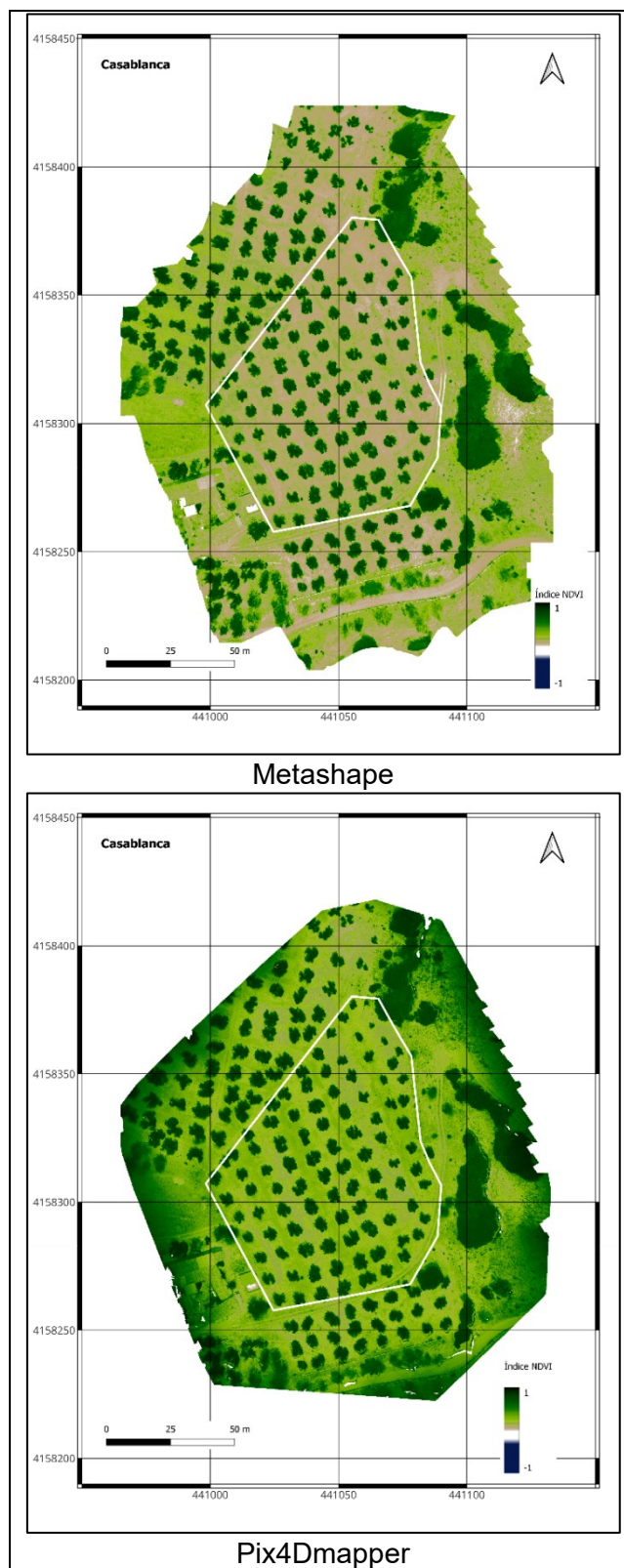


Figura 38 Ortomosaico NDVI de Casablanca obtenido con la cámara DJI3M. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

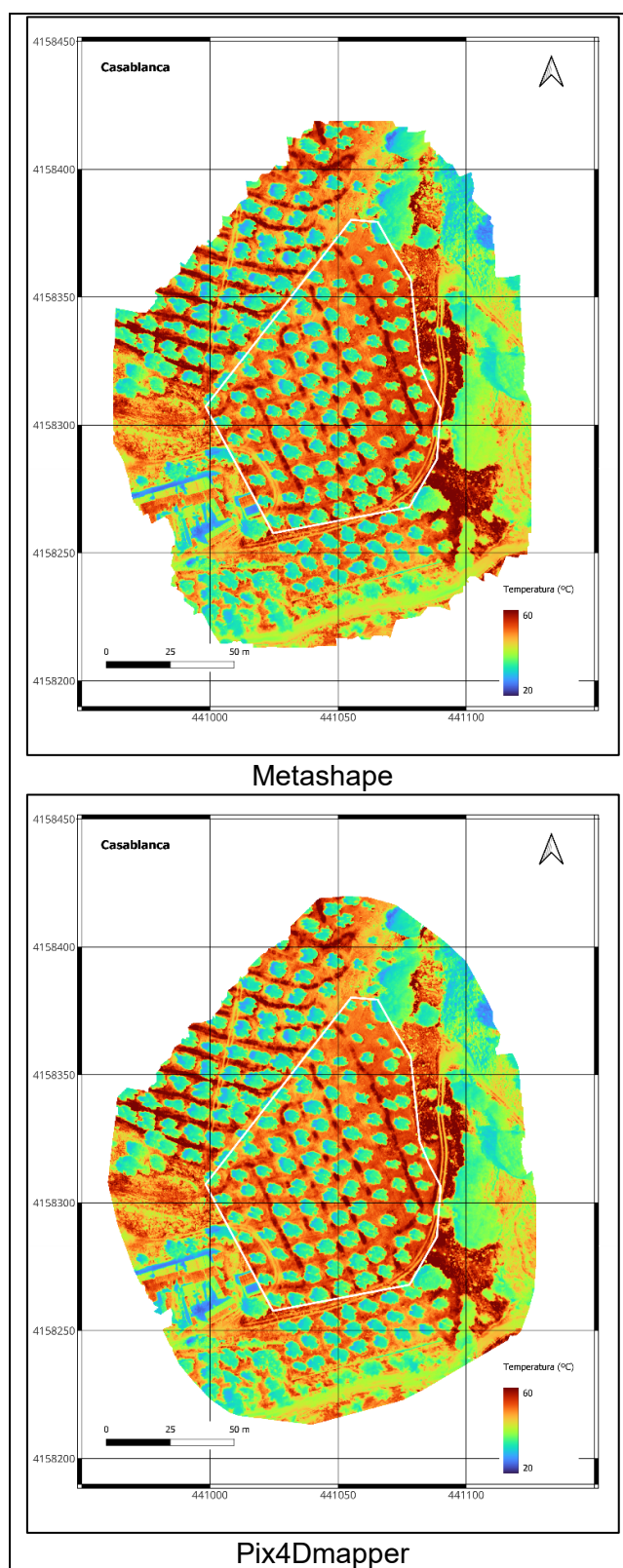


Figura 39 Mapa térmico de Casablanca obtenido con la cámara DJI3T. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

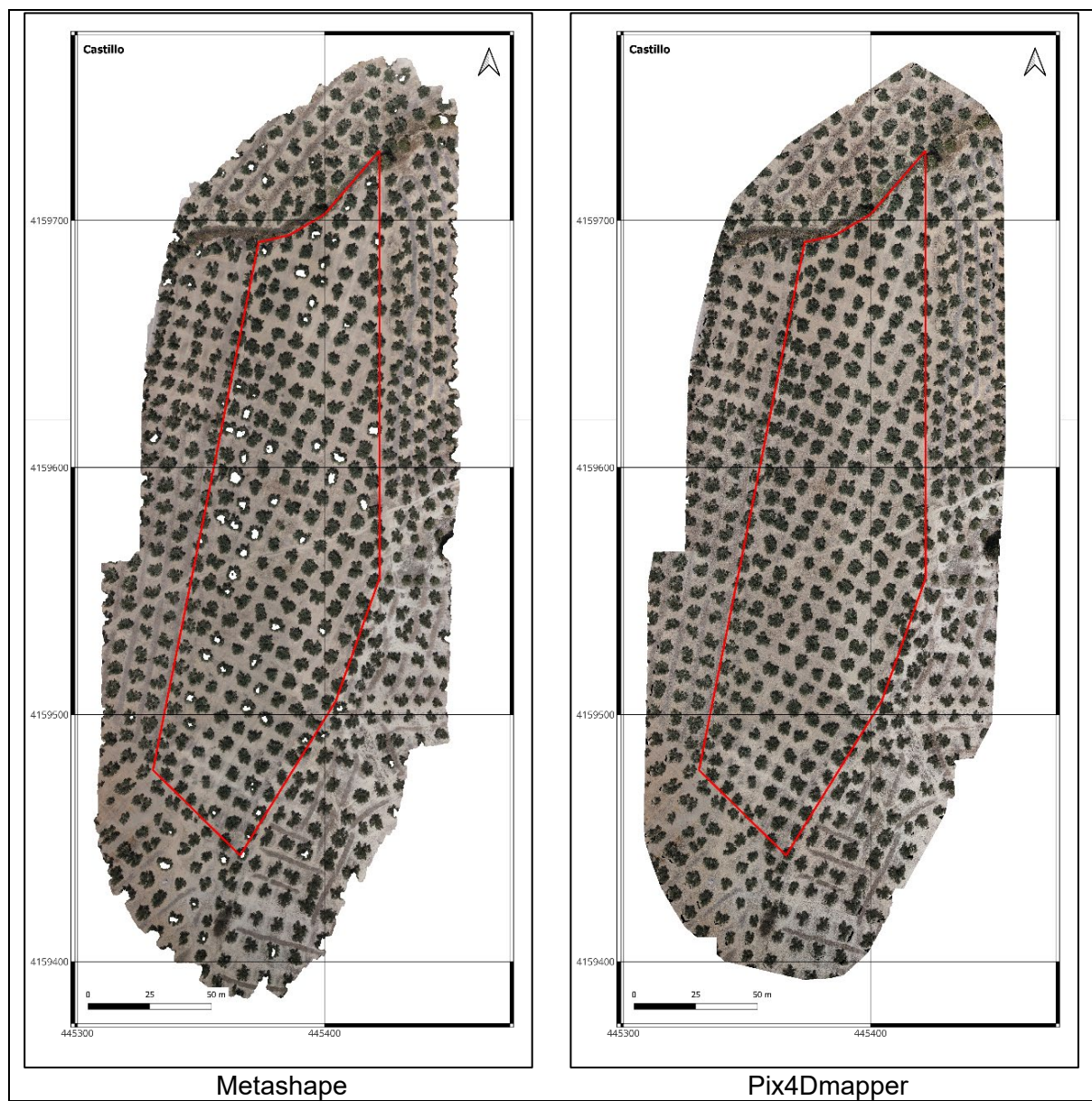


Figura 40 Ortomosaico RGB de Castillo obtenido con la cámara Zenmuse P1. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

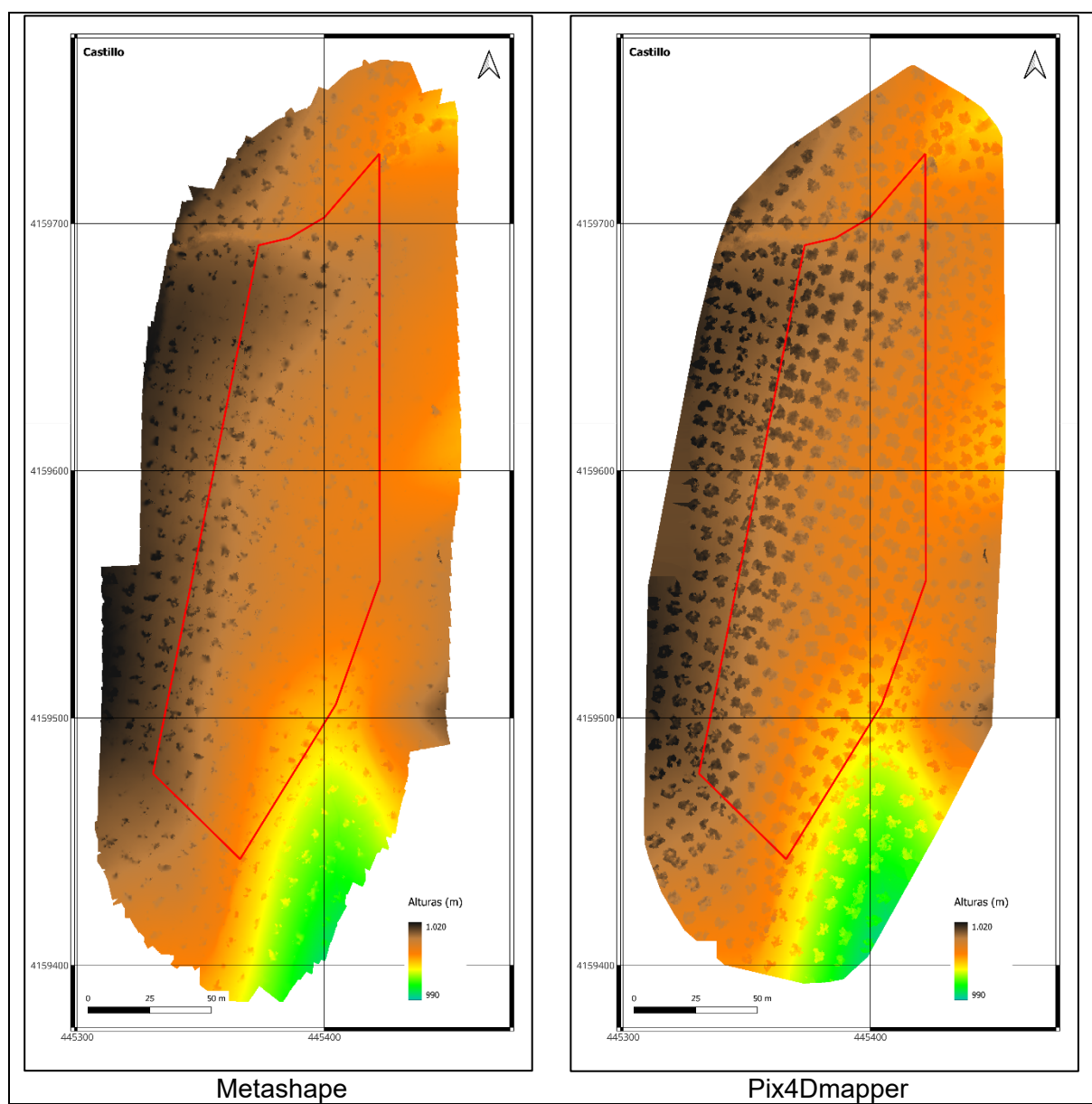


Figura 41 Modelo digital de superficies de Castillo obtenido con la cámara P1. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

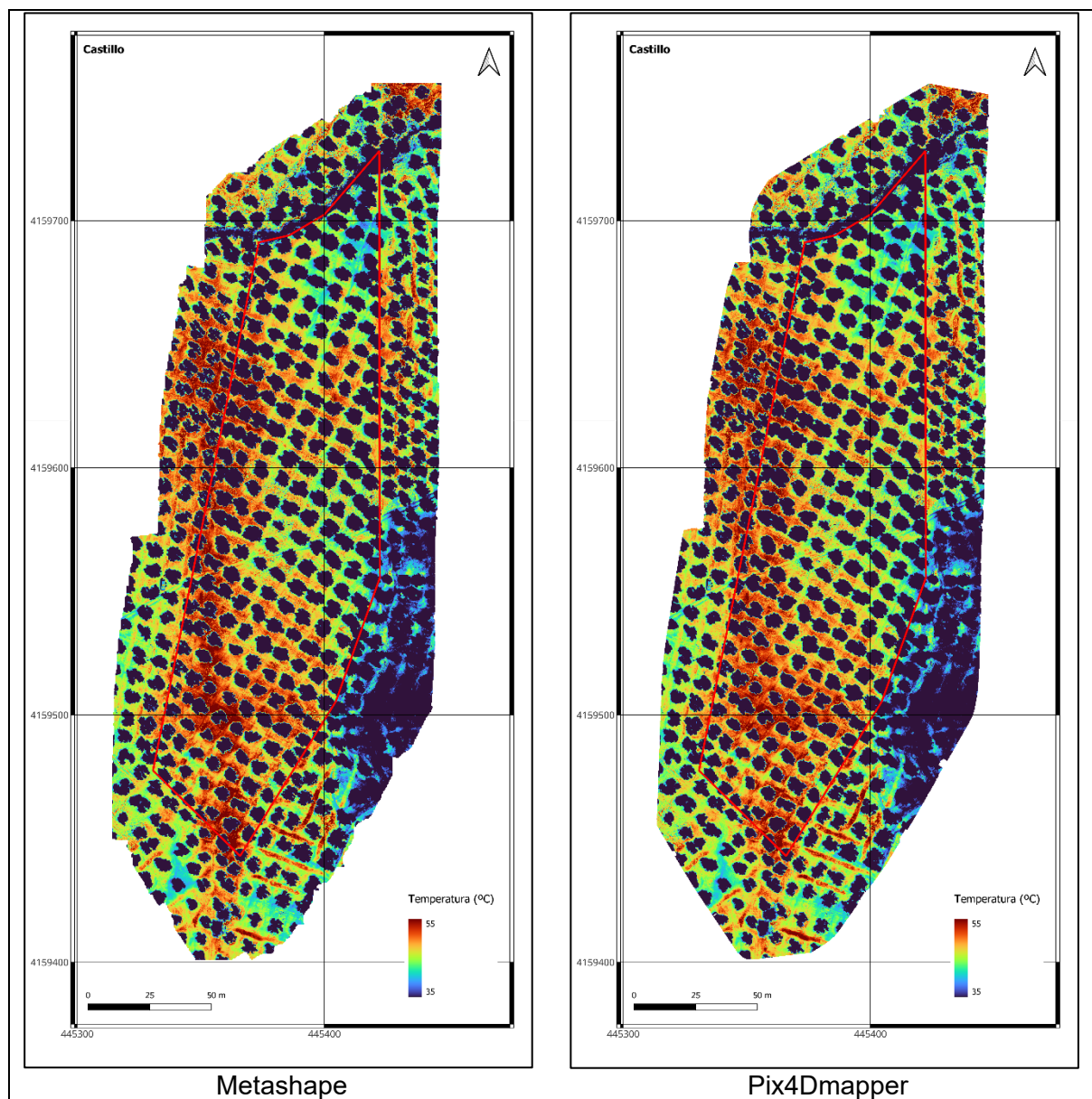


Figura 42 Mapa térmico de Castillo obtenido con la cámara H20T en IR. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

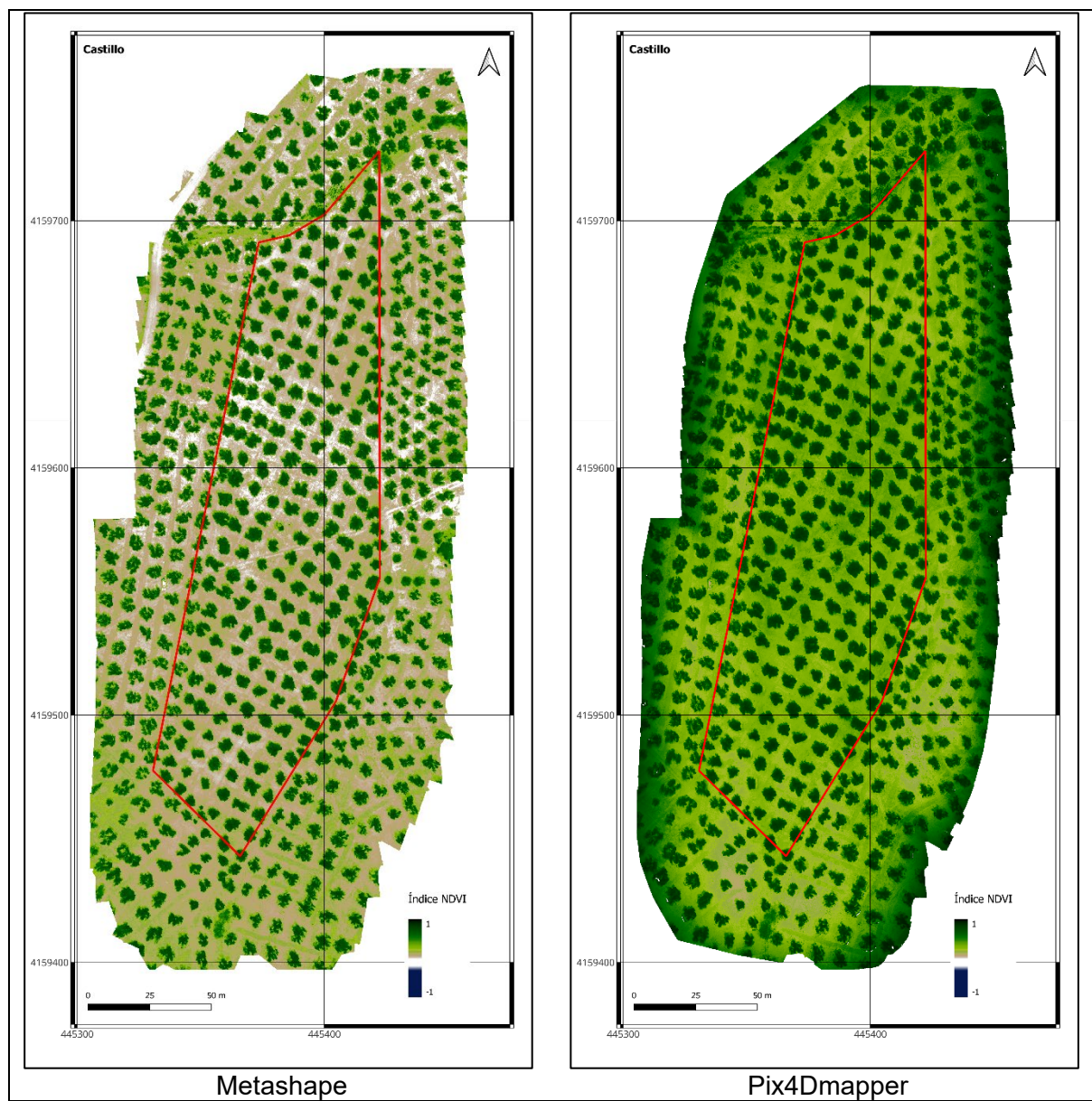


Figura 43 Ortomosaico NDVI de Castillo obtenido con la cámara Micasense. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

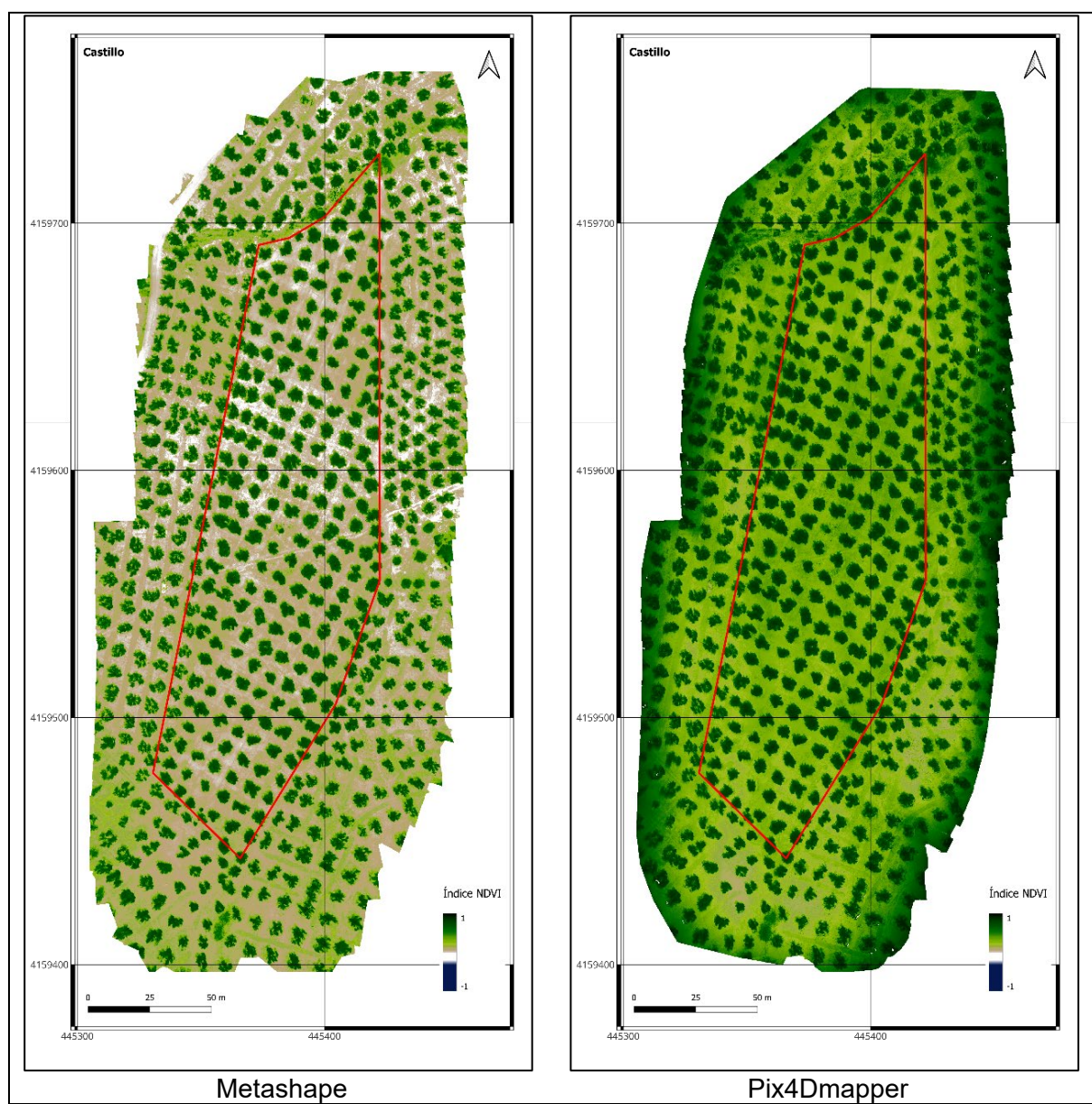


Figura 44 Ortomosaico NDVI de Castillo obtenido con la cámara DJI Mavic 3M. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

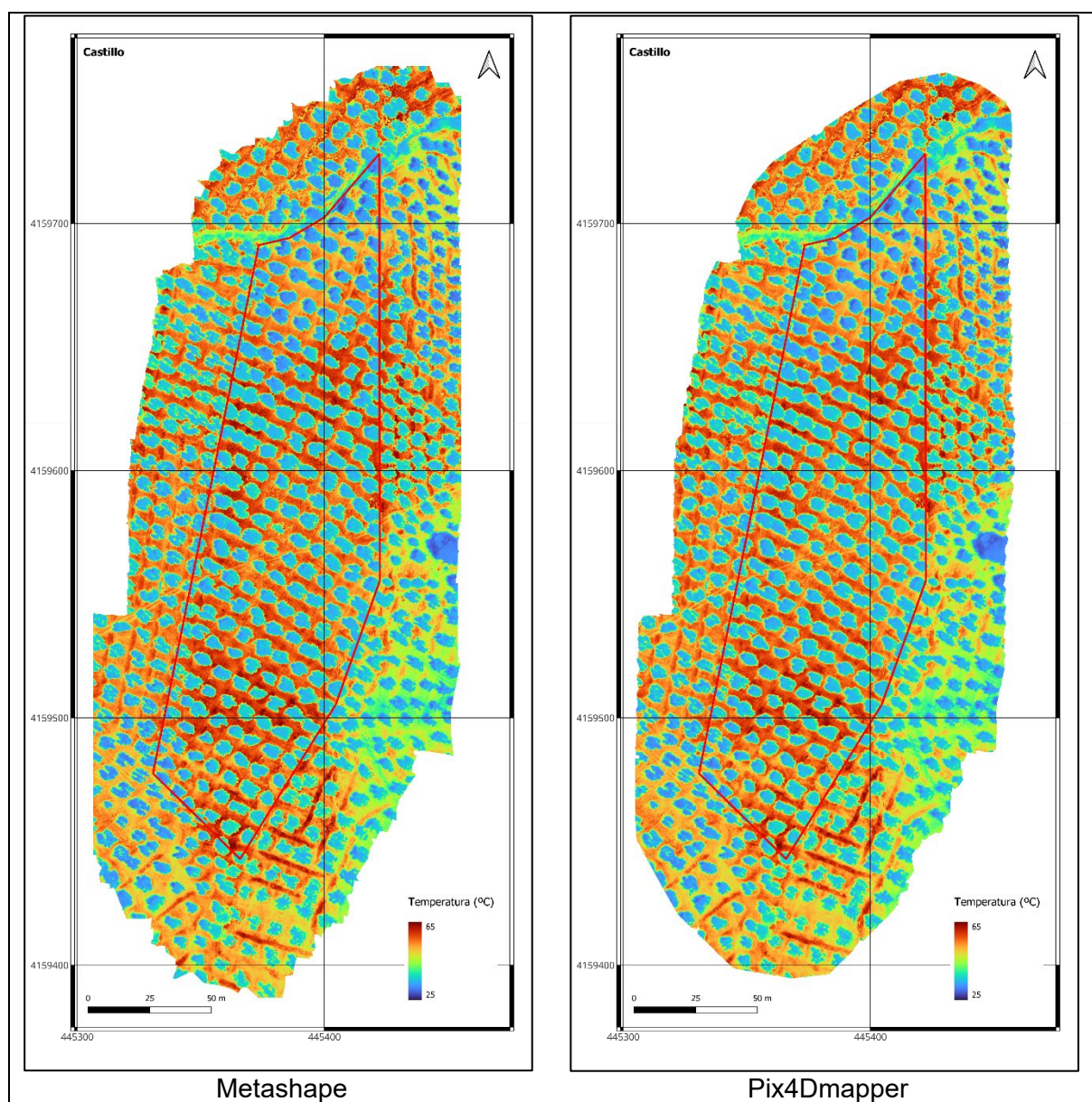


Figura 45 Mapa térmico de Castillo obtenido con la cámara DJI3T en IR. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).).

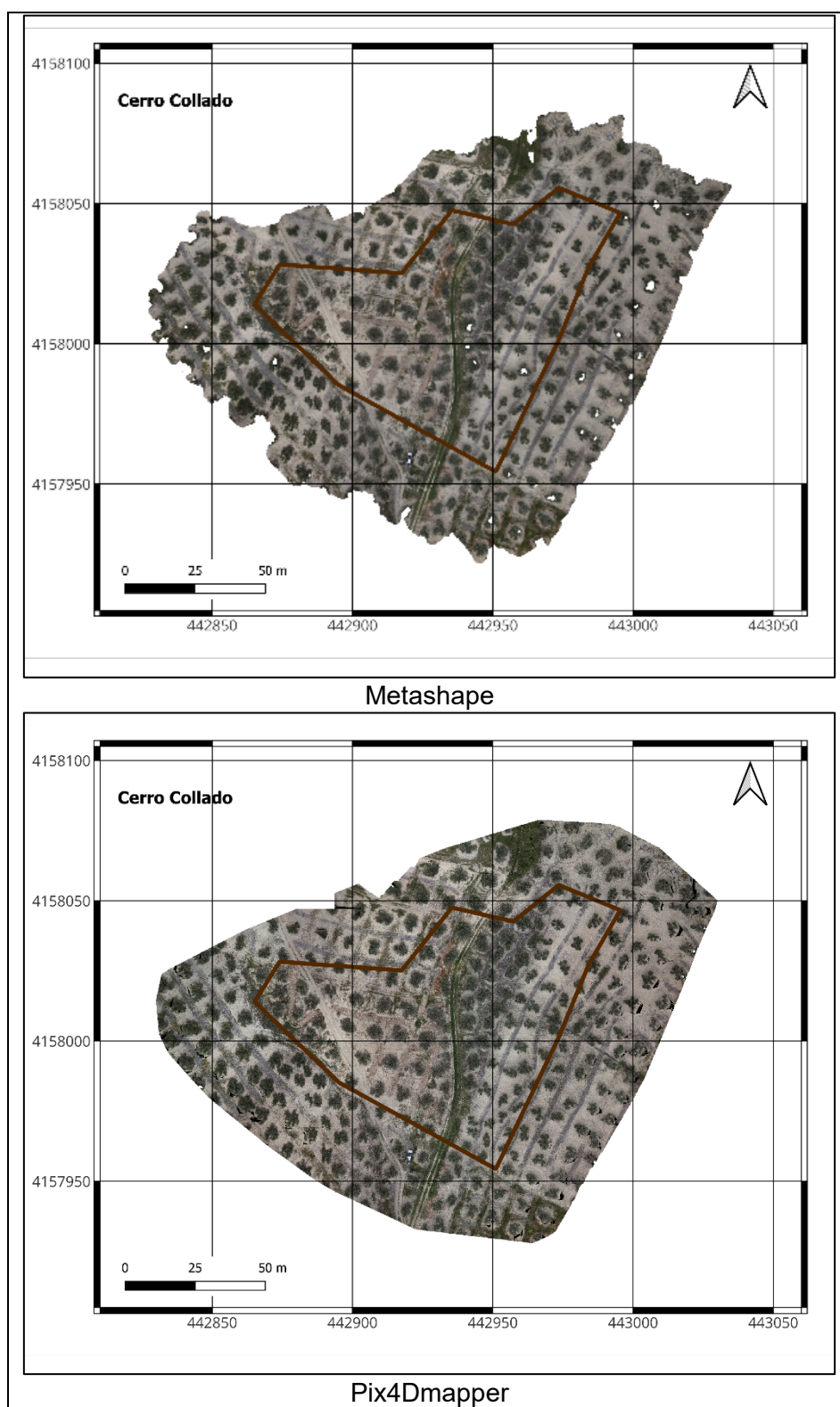


Figura 46 Ortomosaico RGB de Cerro Collado obtenido con la cámara Zenmuse P1. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

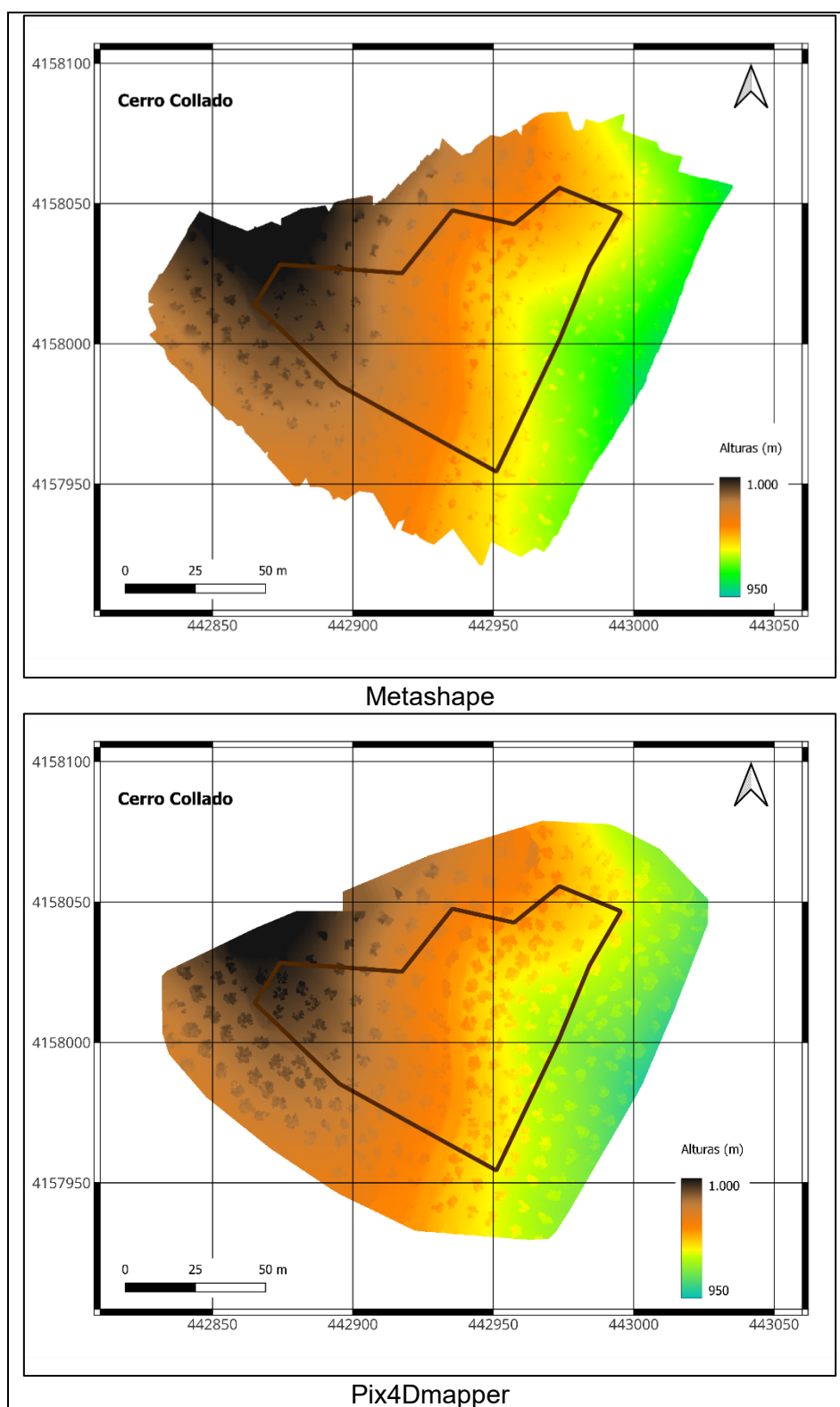


Figura 47 Modelo digital de superficies de Cerro Collado obtenido con la cámara Zenmuse P1. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

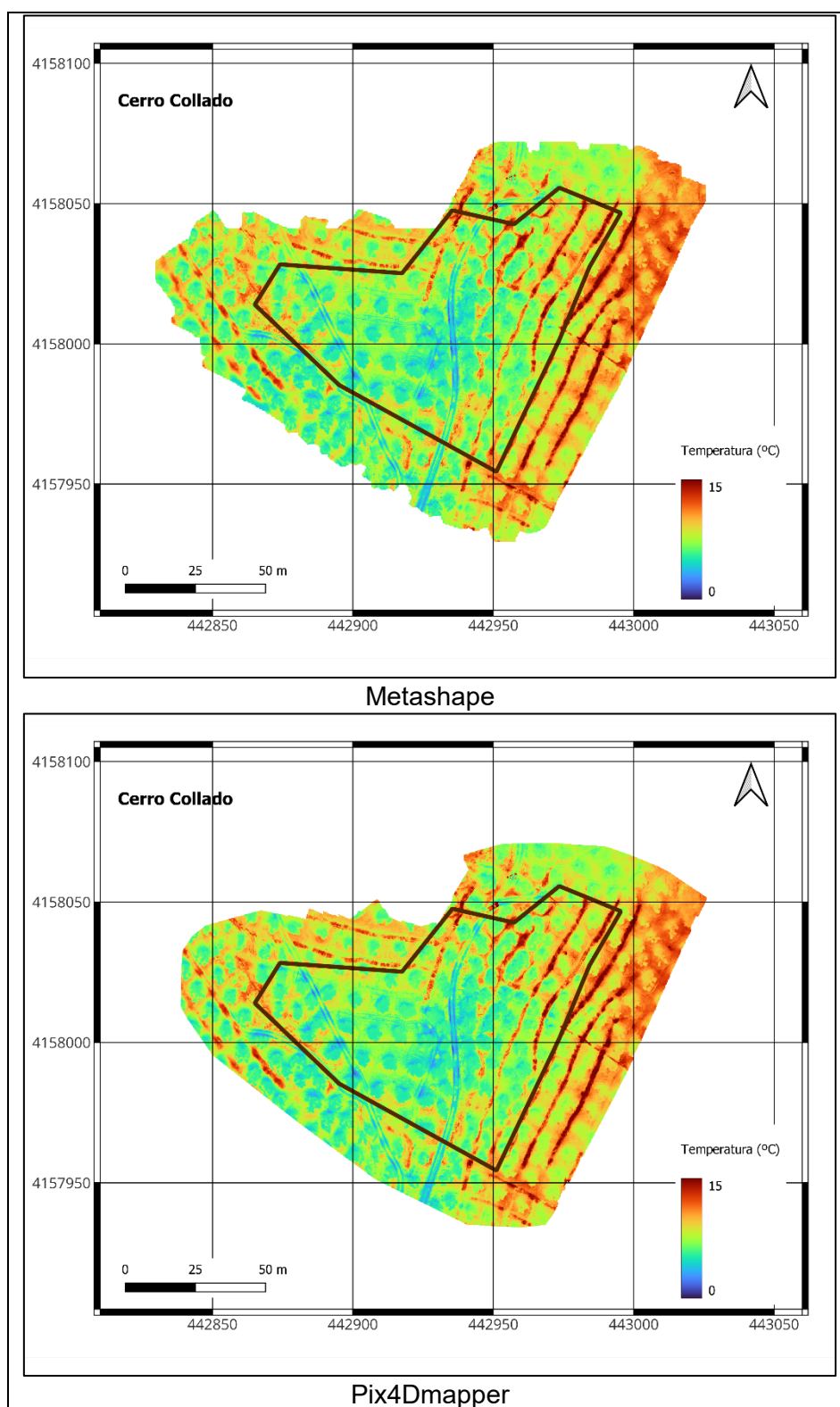


Figura 48 Mapa térmico de Cerro Collado obtenido con la cámara DJI3T en IR. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

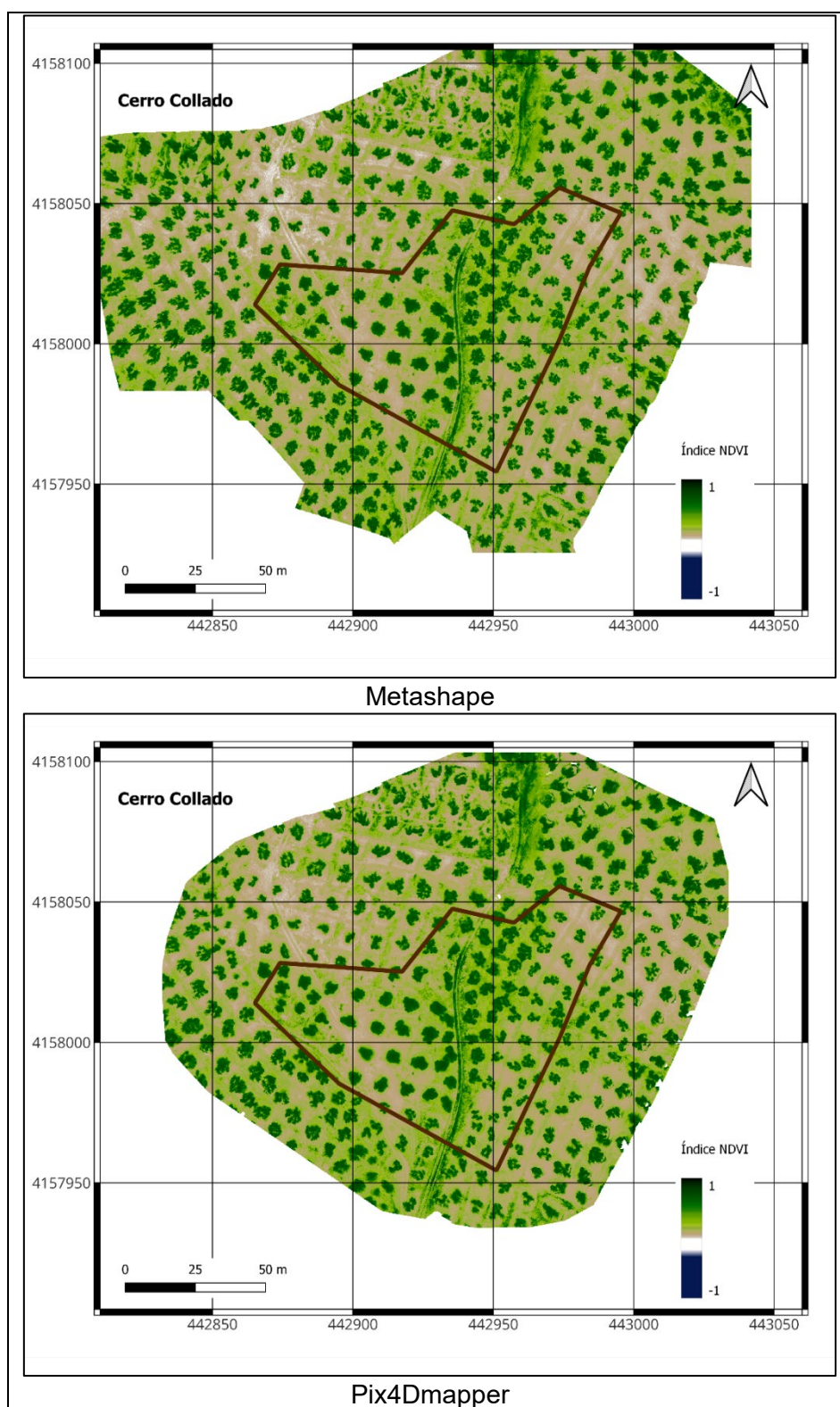


Figura 49 Ortomosaico NDVI de Cerro Collado obtenido con la cámara Micasense Red Edge. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

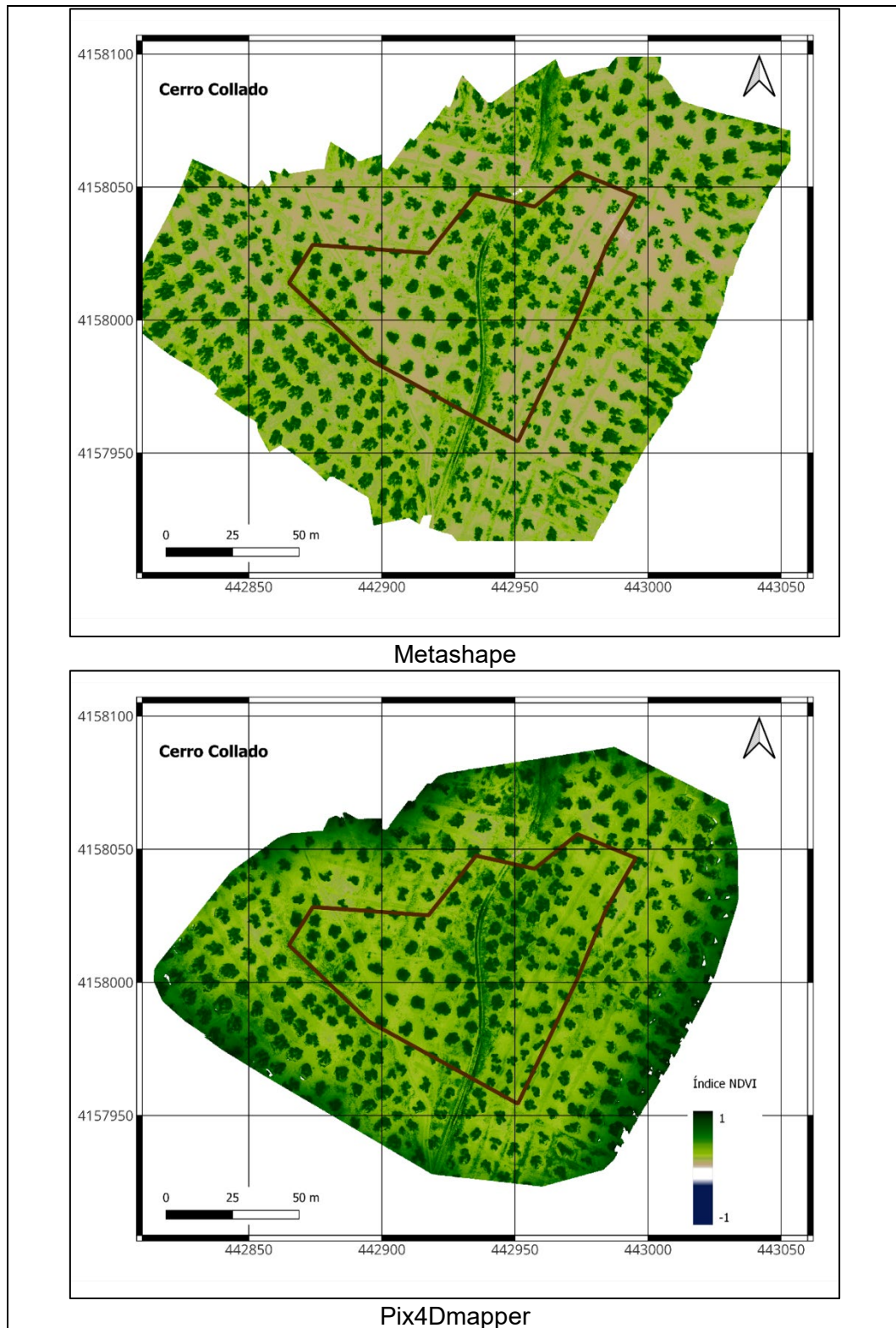


Figura 50 Ortomosaico NDVI de Cerro Collado obtenido con la cámara DJI 3M. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

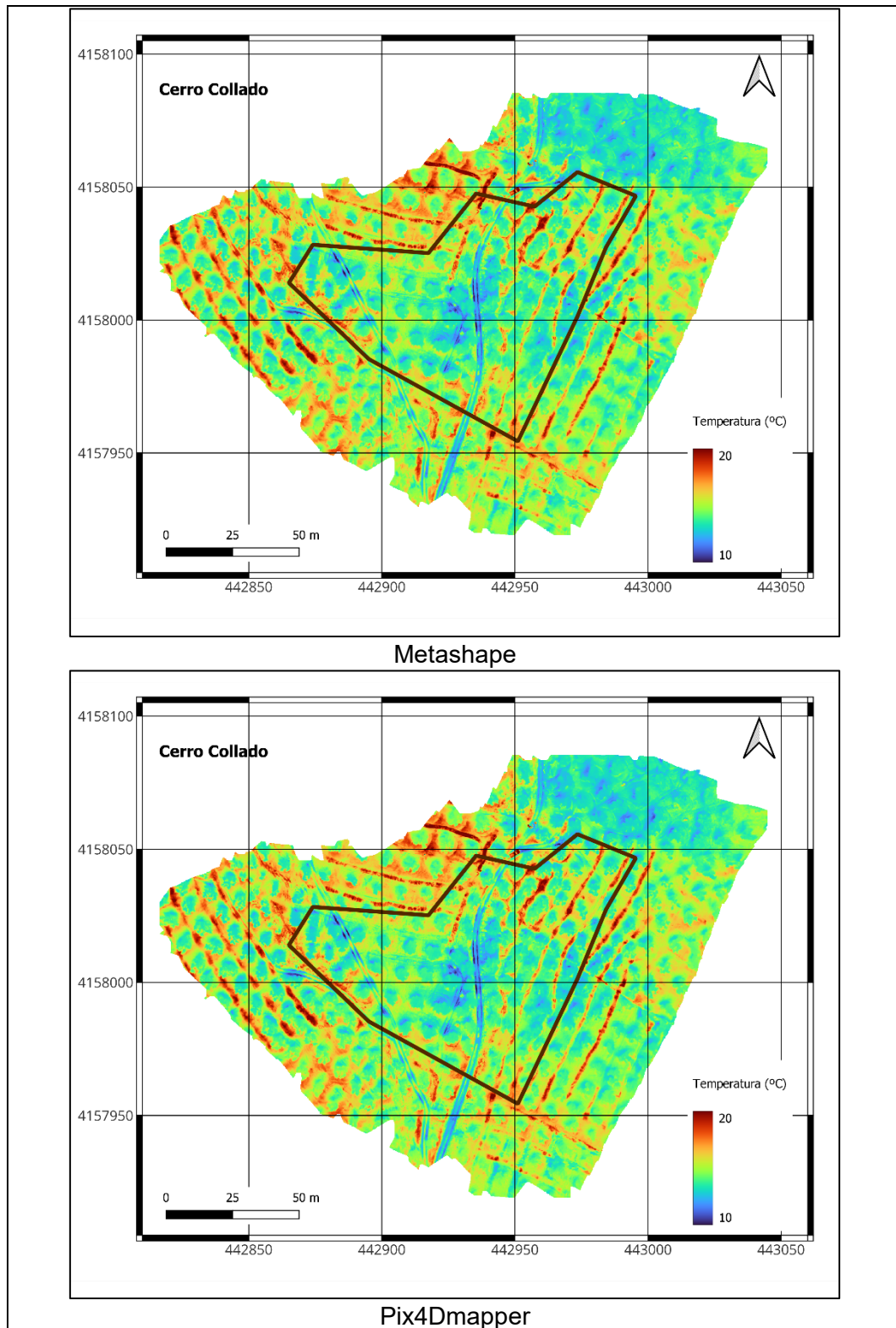


Figura 51 Mapa térmico de Cerro Collado obtenido con la cámara DJI3T en IR. Coordenadas referidas a EPSG: 25830 (ETRS89 / UTM30N).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En esta sección se presenta el rendimiento que ha tenido cada uno de los programas y se procede a analizarlos. Los datos están obtenidos a partir de los informes que generan los programas.

Comenzando por los recursos Metashape, pese a que puede guardar todos los vuelos procesados de cada parcela en un único proyecto, consume significativamente más recursos que Pix4Dmapper.

	Metashape	Pix4Dmapper
Castillo	79,8 Gb	47,1 Gb
Casablanca	77,5 Gb	54,7 Gb
Cerro Collado	44,5 Gb	25,0 Gb
	201,8 Gb	121,8 Gb

Tabla 23 Consumo de almacenamiento.

A continuación, desde la Tabla 24 a la Tabla 31 se ven los diferentes tiempos de procesamiento de cada una de las parcelas en función del sensor utilizado.

P1	Casablanca		Castillo		Cerro Collado	
	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper
Número de fotos	382	382	286	285	110	110
Procesado inicial	0:08:46	0:22:55	0:04:40	0:07:27	0:04:32	0:12:15
Mapas de profundidad	0:54:03		0:32:55		0:17:41	
Nube de puntos	1:38:00	1:00:08	0:30:03	0:38:08	0:51:01	2:03:39
Tiempo de clasificación	0:08:02	0:00:55	1:41:00	0:01:44	0:36:31	0:00:55
Creación del MDE	0:01:21	0:35:35	0:02:19	0:40:06	0:36:00	2:34:08
Crear malla	0:30:25	0:12:52	0:29:31	0:17:38	0:14:32	0:26:09
Ortomosaico	0:13:35	0:58:16	0:16:02	0:45:45	0:09:07	0:21:48
Reflectancia						
Mapa de índices						
TOTAL	3:34:12	3:10:41	3:36:30	2:30:48	2:49:24	5:38:54

Tabla 24 Tabla de tiempos de procesamiento con la cámara P1 (hh:mm:ss).

H20T RGB	Casablanca		Castillo		Cerro Collado	
	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper
Número de fotos	1100	1100	725	725	270	270
Procesado inicial	1:31:23	4:45:53	0:19:57	0:30:04	0:04:44	0:25:18
Mapas de profundidad	0:40:38		0:22:18		0:08:19	
Nube de puntos	3:01:00	1:14:54	1:27:00	1:41:27	0:40:54	0:21:54
Tiempo de clasificación	0:02:36	0:01:56	0:03:39	0:02:35	0:03:19	0:01:08
Creación del MDE	0:11:12	0:37:51	0:00:35	0:30:16	0:00:20	0:12:18
Crear malla	0:40:38	0:11:10	0:08:27	0:08:27	0:03:55	0:04:21
Ortomosaico	0:12:23	0:43:55	0:07:54	0:28:06	0:03:35	0:09:06
Reflectancia						
Mapa de índices						
TOTAL	6:19:50	7:35:39	2:29:50	3:20:55	1:05:06	1:14:05

Tabla 25 Tabla de tiempos de procesado con la cámara H20T RGB (hh:mm:ss).

H20T IR	Casablanca		Castillo		Cerro Collado	
	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper
Número de fotos	1100	1100	725	725	270	270
Procesado inicial	0:04:51	0:30:32	0:02:14	0:13:56	0:00:37	0:09:58
Mapas de profundidad	0:03:14		0:01:37		0:00:52	
Nube de puntos	0:02:49	0:03:42	0:00:55	0:01:45	0:00:19	0:00:44
Tiempo de clasificación	0:00:31	0:00:31	0:00:49	0:00:36	0:00:37	0:00:16
Creación del MDE	0:00:07	0:04:46	0:00:06	0:03:57	0:00:03	0:01:27
Crear malla	0:00:40	0:00:52	0:00:44	0:00:45	0:00:03	0:00:18
Ortomosaico	0:00:44	0:05:44	0:00:37	0:03:15	0:00:11	0:01:23
Reflectancia		0:05:26		0:04:02		0:01:32
Mapa de índices						
TOTAL	0:12:56	0:51:33	0:07:02	0:28:16	0:02:42	0:15:38

Tabla 26 Tabla de tiempos de procesado con la cámara H20T IR (hh:mm:ss).

Micasense	Casablanca		Castillo		Cerro Collado	
	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper
Número de fotos	1280	1250	1740	1725	650	650
Procesado inicial	0:06:48	0:13:41	0:11:36	0:06:24	0:02:50	0:05:28
Mapas de profundidad	0:01:19		0:01:41		0:00:37	
Nube de puntos	0:01:20	0:11:08	0:01:20	0:03:26	0:00:42	0:01:10
Tiempo de clasificación	0:00:21	0:00:43	0:00:33	0:00:00	0:00:47	0:00:21
Creación del MDE	0:00:10	0:17:25	0:00:13	0:03:08	0:00:09	0:04:07
Crear malla	0:00:49	0:03:52	0:00:59	0:01:52	0:00:36	0:00:42
Ortomosaico	0:01:05	0:12:34	0:01:31	0:10:04	0:01:12	0:04:20
Reflectancia		0:00:12		0:14:33		0:06:04
Mapa de índices		0:00:00		0:00:26		0:00:13
TOTAL	0:11:52	0:59:35	0:17:53	0:39:53	0:06:53	0:22:25

Tabla 27 Tabla de tiempos de procesado con la cámara Micasense (hh:mm:ss).

DJI 3M RGB	Casablanca		Castillo		Cerro Collado	
	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper
Número de fotos	87	87	172	172	84	84
Procesado inicial	0:01:14	0:03:30	0:01:58	0:04:47	0:01:47	0:13:48
Mapas de profundidad	0:04:56		0:09:00		0:09:03	
Nube de puntos	0:05:50	0:04:37	0:09:13	0:10:12	0:06:11	0:04:50
Tiempo de clasificación	0:02:07	0:00:28	0:07:28	0:01:07	0:06:58	0:00:34
Creación del MDE	0:00:24	0:05:18	0:00:40	0:11:06	0:00:24	0:05:18
Crear malla	0:04:06	0:03:02	0:06:38	0:04:39	0:05:55	0:04:50
Ortomosaico	0:02:12	0:05:22	0:03:54	0:11:38	0:02:25	0:05:50
Reflectancia						
Mapa de índices						
TOTAL	0:20:49	0:22:17	0:38:51	0:43:29	0:32:43	0:35:10

Tabla 28 Tabla de tiempos de procesado con la cámara DJI 3M RGB (hh:mm:ss).

DJI 3M MS	Casablanca		Castillo		Cerro Collado	
	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper
Número de fotos	348	348	688	688	360	336
Procesado inicial	0:05:21	0:02:35	0:12:17	0:05:39	0:04:07	0:04:52
Mapas de profundidad	0:01:10		0:02:19		0:01:06	
Nube de puntos	0:01:26	0:02:53	0:02:23	0:06:00	0:01:28	0:03:14
Tiempo de clasificación	0:00:37	0:00:00	0:01:02	0:00:00	0:01:47	0:00:24
Creación del MDE	0:00:10	0:03:04	0:00:16	0:07:00	0:00:11	0:07:29
Crear malla	0:00:52	0:00:00	0:01:46	0:05:13	0:00:55	0:02:02
Ortomosaico	0:01:30	0:00:00	0:02:23	0:09:41	0:01:29	0:04:36
Reflectancia		0:12:26		0:33:01		0:14:27
Mapa de índices		0:00:26		0:02:28		0:00:25
TOTAL	0:11:06	0:21:24	0:22:26	1:09:02	0:11:03	0:37:29

Tabla 29 Tabla de tiempos de procesado con la cámara DJI 3M Multiespectral (hh:mm:ss).

DJI 3T RGB	Casablanca		Castillo		Cerro Collado	
	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper
Número de fotos	218	218	352	352	156	156
Procesado inicial	0:06:29	0:10:52	0:05:51	0:02:44	0:02:03	0:09:11
Mapas de profundidad	0:06:21		0:10:28		0:04:31	
Nube de puntos	0:22:22	0:10:33	0:21:53	0:17:50	0:12:53	0:07:43
Tiempo de clasificación	0:04:55	0:00:59	0:05:10	0:01:46	0:03:50	0:00:00
Creación del MDE	0:00:18	0:09:20	0:00:30	0:14:04	0:00:18	0:03:17
Crear malla	0:04:01	0:04:17	0:05:22	0:05:51	0:03:05	0:03:36
Ortomosaico	0:02:40	0:06:36	0:03:55	0:13:30	0:02:08	0:05:19
Reflectancia						
Mapa de índices						
TOTAL	0:47:06	0:42:37	0:53:09	0:55:45	0:28:48	0:29:06

Tabla 30 Tabla de tiempos de procesado con la cámara DJI 3T RGB (hh:mm:ss).

DJI 3T IR	Casablanca		Castillo		Cerro Collado	
	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper	Metashape	Pix4DMapper
Número de fotos	218	216	352	352	156	156
Procesado inicial	0:02:02	0:04:03	0:01:04	0:04:47	0:00:45	0:02:04
Mapas de profundidad	0:00:50		0:01:06		0:00:47	
Nube de puntos	0:00:23	0:00:37	0:00:30	0:00:56	0:00:26	0:00:26
Tiempo de clasificación	0:00:09	0:00:13	0:00:15	0:00:23	0:00:07	0:00:10
Creación del MDE	0:00:03	0:01:06	0:00:03	0:01:31	0:00:03	0:00:55
Crear malla	0:00:17	0:00:17	0:00:28	0:00:42	0:00:22	0:00:14
Ortomosaico	0:00:09	0:01:04	0:00:15	0:01:42	0:00:14	0:00:50
Reflectancia		0:01:17		0:02:20		0:00:57
Mapa de índices						
TOTAL	0:03:53	0:08:37	0:03:41	0:12:21	0:02:44	0:05:36

Tabla 31 Tabla de tiempos de procesado con la cámara DJI 3T IR (hh:mm:ss)

Comentar que en aquellos casos en los que la diferencia de tiempos ha sido significativa, se ha procedido a repetir el procesado.

A la vista de los resultados en procesado de las imágenes RGB, no puede decirse que software es más rápido que otro, puesto que los resultados son muy similares. Lo que desde luego no se puede afirmar es que, a día de hoy, Pix4Dmapper sea más rápido que Metashape, como se decía en los trabajos que hemos tomado como referencia.

En el procesado de las cámaras multiespectrales y térmicas Pix4DMapper es más lento que Metashape, si bien genera mucha más información, como por ejemplo los mapas de índices que en el caso de Metashape hay que generarlos en otro proceso.

6. CONCLUSIONES.

De entrada, señalar que la utilización de sensores térmicos y multiespectrales permite detalles que no son visibles a simple vista. Ahora bien, este trabajo no va tanto de realizar un análisis de estas imágenes sino en evaluar el rendimiento del software al procesarlas. No obstante, como se dirá más adelante, esto abre una interesante línea de trabajo y sería deseable profundizar en ver cuál de los dos programas presenta resultados más precisos.

Normalmente, lo que se espera a la hora de hacer una comparativa es dar una valoración numérica y que un producto resulte vencedor frente al otro. En este caso,

no va ser así porque, aunque en última instancia los dos productos hagan lo mismo, la forma y la filosofía que tienen de hacerlo es muy diferente. En última instancia, será el usuario el que decida que producto se acerca más a sus necesidades.

En la Tabla 32 aparece un resumen con cada uno de los ítems que se han tomado en consideración a la hora de evaluar el producto, siempre teniendo que cuenta que es una valoración completamente subjetiva.

	Metashape	Pix4D
Facilidad de uso	3	5
Versatilidad	5	3
Calidad final	4	4
Tiempo de procesamiento	4	4
Versión de evaluación	30 días	15 días
Documentación	5	4
Precio³	3.499 US\$	4.690 €

Tabla 32 Tabla resumen con la evaluación de cada producto.

En la Tabla 33 aparece de forma resumida las ventajas e inconvenientes de cada uno de los productos.

	Ventajas	Inconvenientes
Metashape	Precio. Muy configurables. No tiene ampliaciones	Difícil de manejar
Pix4D	Facilidad de uso. Se puede complementar con otros programas	Precio. Poco configurable

Tabla 33. Ventajas e inconvenientes de Metashape y Agisoft.

Hay que tener en cuenta que Pix4D es realmente una *suite* de programas, cada uno de ellos con una funcionalidad diferente. Todos ellos juntos son, probablemente, superiores a Metashape, pero, si se hace la comparación solamente con Pix4Dmapper, Metashape resulta ser no solo más completo, sino también más económico. Por otra parte, es evidente que Pix4mapper es muchísimo más sencillo de manejar y que la calidad de los resultados es pareja. Quizás la política de precios de Pix4D y Agisoft esté determinada por este hecho: un usuario de Metashape puede adaptarse rápidamente a Pix4Dmapper, pero lo contrario es muy poco probable. De manera que Pix4D sabe que tiene un nicho de mercado en todos aquellos usuarios

³ Se ha preferido mantener los precios que figuran en las páginas web en vez de hacer la conversión de moneda. A efectos prácticos podemos considerar que la equivalencia entre ambas monedas.

que carecen de conocimientos de fotogrametría, mientras que Agisoft tiene que dirigirse a todos los usuarios. Podría pensarse que la política de precios está condicionada por la situación política actual, pero en (Núñez Calleja 2016) la diferencia de precios ya era notable: 6.500,00 € para Pix4D y de 3.077,80 € para Metashape.

Respecto a la información mostrada, Pix4Dmapper supera a Metashape, al procesar imágenes térmicas o multiespectrales. Esto es un fuerte indicio que demuestra que es un producto orientado a un público que esté más interesado en las posibles aplicaciones que en la fotogrametría misma. En Metashape tendríamos que exportar los ortomosaicos para posteriormente analizarlos con un software externo como, por ejemplo, QGIS.

Por otra parte, la utilización de bloques (chunk) en proyectos que hace Metashape y el procesado por lotes, facilita enormemente el trabajo. Basta cargar todas las imágenes correspondientes a una misma finca en un único proyecto, manteniendo cada sensor en un bloque diferente. Ejecutar el procesado por lotes, y esperar a que termine. Con Pix4Dmapper cada conjunto de imágenes tiene que ir en un proyecto diferente. En consecuencia, en Pix4Dmapper se generan 24 proyectos que ocupan 121,8 Gb y en Metashape tres proyectos que ocupan 201,8 Gb.

Los resultados obtenidos en cuanto a tiempo de procesado no son concluyentes. Para poder extraer resultados estadísticamente relevantes habría que repetir el procesado incluyendo, por ejemplo, más fincas de diferentes tamaños y asegurándonos condiciones idénticas de procesamiento hasta en el más mínimo detalle, como por ejemplo mantener siempre el mismo espacio en disco duro accesible o manteniendo la temperatura del procesador dentro de unos niveles determinados. La buena noticia es que el tiempo de procesado no debería ser un factor determinante a la hora de evaluar este tipo de productos. El motivo es que los ordenadores son cada más vez más rápidos y potentes, por lo que, si el tiempo de procesado disminuye a la mitad, también lo hará la diferencia de tiempos, lo que no va a suceder con el precio, ni con la versatilidad, ni con la facilidad de manejo de los programas.

En cuanto a trabajos futuros, sería deseable poder realizar un estudio cuantitativo de otros aspectos tales como:

- Introducir puntos de apoyo y de control para estudiar la precisión de la georreferenciación.
- Estudiar la precisión en el cálculo de elementos líneas, superficies y volúmenes.

- Estudiar la precisión en la generación de las curvas de nivel.
- Estudiar la precisión en la generación de índices.
- Estudiar la precisión en la generación de mapas térmicos.
- Estudiar la precisión en la reconstrucción de edificios.
- Estudiar la precisión en la reconstrucción de objetos.
- Estudiar la clasificación de los puntos en función del tipo de sensor utilizado.
- Estudiar cómo influye la calibración de los sensores térmicos en la generación de mapas.

Además de, por supuesto, ampliar la comparativa a otros tipos de software de pago y de uso libre.

En resumen, el tema del trabajo es mucho más extenso de lo que a primera vista pueda parecer, Además, la cantidad de factores que pueden intervenir en el proceso plantea la necesidad de seguir trabajando en esta línea.

Bibliografía.

- Agisoft, L. *Agisoft Helpdesk Portal*. s.f.
<https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000166933#Temperature-values-visualization> (último acceso: 15 de junio de 2024).
- . *Agisoft Helpdesk Portal*. s.f.
<https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000158942-thermal-imagery-processing> (último acceso: 15 de junio de 2024).
- . «Agisoft Metashape User Manual. Professional Edition, Version 2.1.» Agisoft LLC, 2024.
- . *Agisoft Helpdesk Portal*. s.f.
<https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000158942-thermal-imagery-processing#Raster-calculator> (último acceso: 15 de junio de 2024).
- Collaro, Carolina, Carmen Enríquez-Muñoz, Alfonso López, Carlos Enríquez, y Juan Manuel Jurado. «Detection of landscape features with visible and thermal imaging at the Castle of Puerta Arenas.» *Archaeological and Anthropological Sciences* (Springer Verlag) 15, n° 152 (septiembre 2023).
- Costales Acurio, Gabriel Alexander. «Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental, en la Escuela Politécnica Nacional.» *Análisis comparativo entre los software de prueba Agisoft Photoscan y Pix4D para el procesamiento de datos obtenidos con fotogrametría de vehículo aéreo no tripulado (UAV) de bajo costo aplicado a proyectos de medio ambiente*. Quito, Septiembre de 2018.
- DJI. «DJI Mavic 3E / 3T .» *Manual de usuario v 1.2*. noviembre de 2022.
- . «DJI Mavic 3M.» *Manual de usuario. v1.0*. febrero de 2023.
- . «Matrice 300 RTK.» *Manual de usuario v1.0*. mayo de 2020.
- Garrido, Ma. Selmira, Elena Giménez, Ma. Clara de Lacy, y Antonio J. Gil. «Dense Regional Active Networks and High Accuracy Positioning Services. A Case Study Based on the Andalusian Positioning Network (Southern Spain).» *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING* 6, n° 6 (December 2013): 2421-2433.

- ICAO. «Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS). .» *Cir 328 AN/190, International Civil Aviation Organization*. 999 University Street, Montréal, Quebec, 2011.
- ISO/TR 19122:2004(en): *Geographic information / Geomatics — Qualification and certification of personnel*. s.f. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:19122:ed-1:v1:en> (último acceso: 14 de junio de 2024).
- Jarahizadeh, Sina, y Bahram Salehi. «A Comparative Analysis of UAV Photogrammetric Software Performance for Forest 3D Modeling: A Case Study Using AgiSoft Photoscan, PIX4DMapper, and DJI Terra.» *Sensors (MDPI)* 24, n° 286 (2024).
- Kaimaris, Dimitris, Petros Patias, y Maria Sifnaiou. «UAV and the comparison of image processing software.» *International Journal of Intelligent Unmanned Systems (Emerald Insight)* 5, n° 1 (2018).
- Kloc , Barbara, Andrzej Mazur, y Malgorzata Szumilo Szumilo. «Comparison of Free and Commercial Software in the Processing of Data Obtained from Non-Metric Cameras.» *Journal of Ecological Engineering* 22, n° 2 (2021).
- Muñoz Lomas, M^a Francisca. «Trabajo Fin de Carrera. Ingeniería Técnica en Topografía. Universidad de Jaén.» *Apoyo fotogramétrico con GPS*. Jaén, 2000.
- Núñez Calleja, Paula . «Trabajo Fin de Master en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Escuela Politécnica de Mieres. Universidad de Oviedo.» *Comparativa de software para la realización de ortofotos a partir de imágenes obtenidas por drones*. Mieres, Junio de 2016.
- Pix4D. 24 de junio de 2024. <https://bit.ly/3z7Pu46>.
- Ramirez, Yort Eli Flores, y Hildemaro Diaz Soria. «Trabajo de Investigación para obtener el Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Civil. Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Facultad de INgeniería y Arquitectura. Universidad Peruana Unión.» *Comparación de postproceso entre el software Pix4D y Agisoft Metashape de un levantamiento topográfico con RPAS*. Lima, diciembre de 2020.
- Sivanandam, Poornima, Darren Turner, y Arko Lucieer. «TERN Terrestrial Ecosystem Research Network.» *Drone RGB and Multispectral Data Processing Protocol*. 2022. <https://acortar.link/ViKuZO> (último acceso: 15 de junio de 2024).
- Visockiene, Jurate Suziedelyte , Domantas Brucas, y Ugnius Ragauskas. «Comparison of UAV images processing softwares.» *Journal of Measurements in Engineering*, 2014.

Casablanca P1 RGB

Levantamiento en RGB de J10001_Casablanca con la cámara P1
26 June 2024



Datos del levantamiento

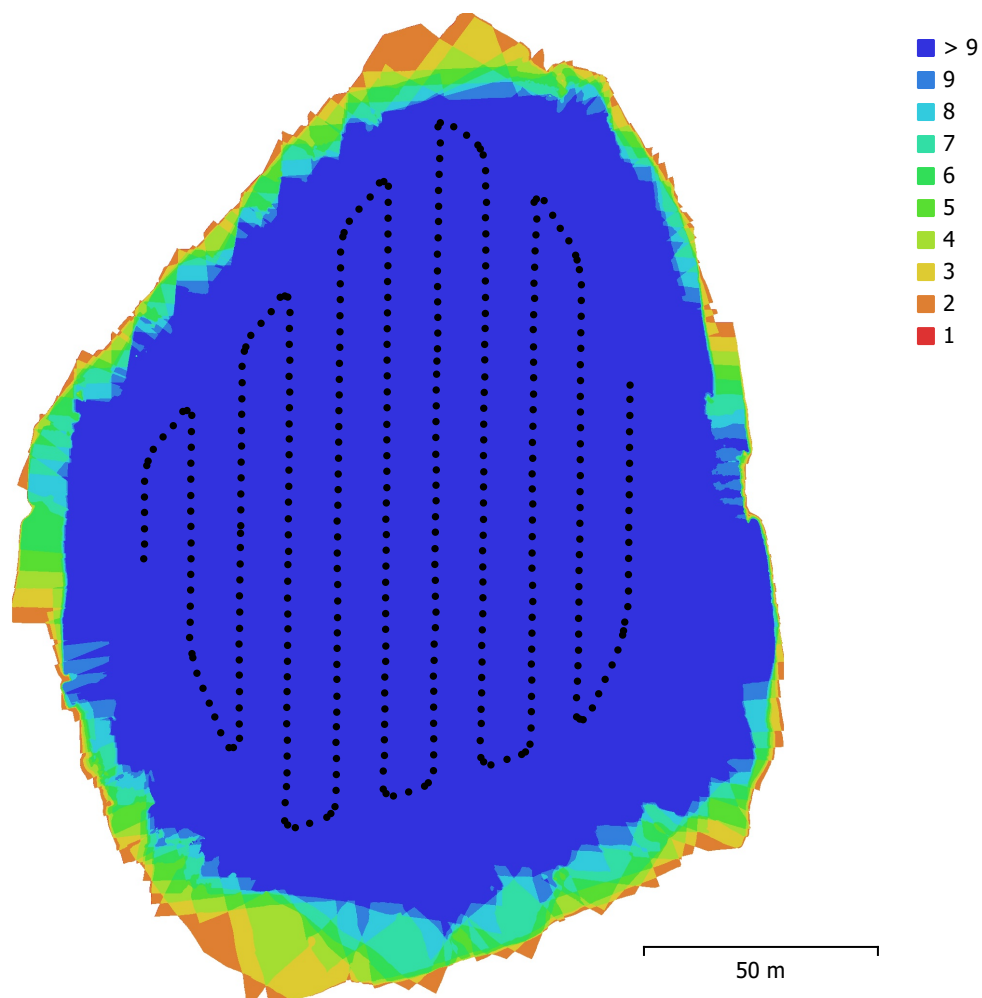


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 382

Imágenes alineadas: 382

Altitud media de vuelo: 51.2 m

Puntos de paso: 439,330

Resolución en terreno: 6.34 mm/pix

Proyecciones: 2,900,580

Área cubierta: 0.0247 km²

Error de reproyección: 0.73 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
ZenmuseP1 (35mm)	8192 x 5460	35 mm	4.39 x 4.39 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

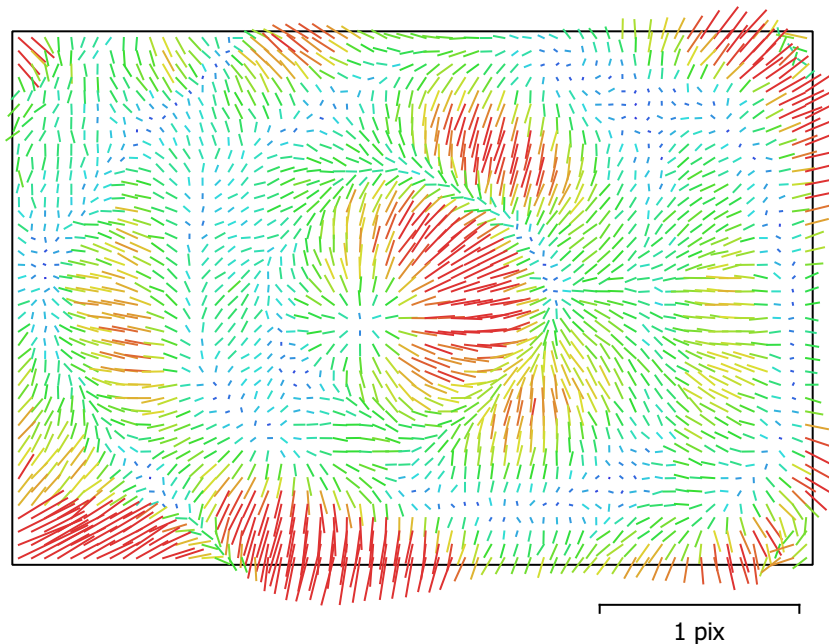


Fig. 2. Gráfico de residuales para ZenmuseP1 (35mm).

ZenmuseP1 (35mm)

382 imágenes

Tipo	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel
Cuadro	8192 x 5460	35 mm	4.39 x 4.39 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	8220.12	0.41	1.00	-0.64	0.88	-0.10	0.07	-0.28	-0.10	0.11
Cx	-9.1894	0.015		1.00	-0.55	0.02	-0.02	0.16	0.63	-0.09
Cy	31.6756	0.018			1.00	-0.09	0.06	-0.25	-0.08	0.32
K1	-0.0498501	1.5e-05				1.00	-0.65	0.59	-0.25	0.42
K2	0.0200293	6.5e-05					1.00	-0.96	0.02	0.01
K3	-0.111303	0.00013						1.00	0.01	-0.06
P1	-0.00110331	4.2e-07							1.00	-0.20
P2	0.00121142	3.9e-07								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Posiciones de cámaras

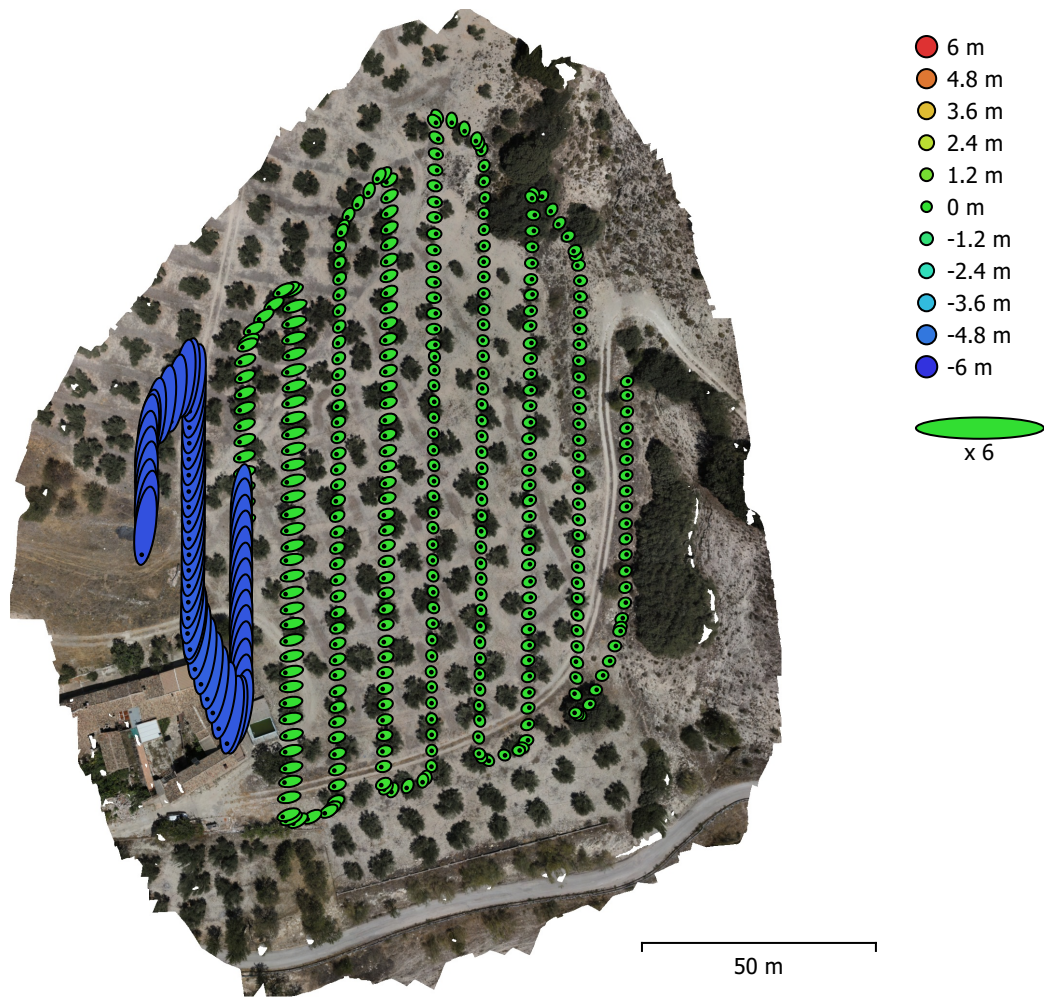


Fig. 3. Posiciones de cámaras y estimadores de error.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.
Posiciones estimadas de las cámaras se indican con los puntos negros.

Error en X (m)	Error en Y (m)	Error en Z (m)	Error en XY (m)	Error combinado (m)
0.216796	0.741712	1.94626	0.772746	2.09405

Tabla 3. Errores medios de las posiciones de cámaras.

X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

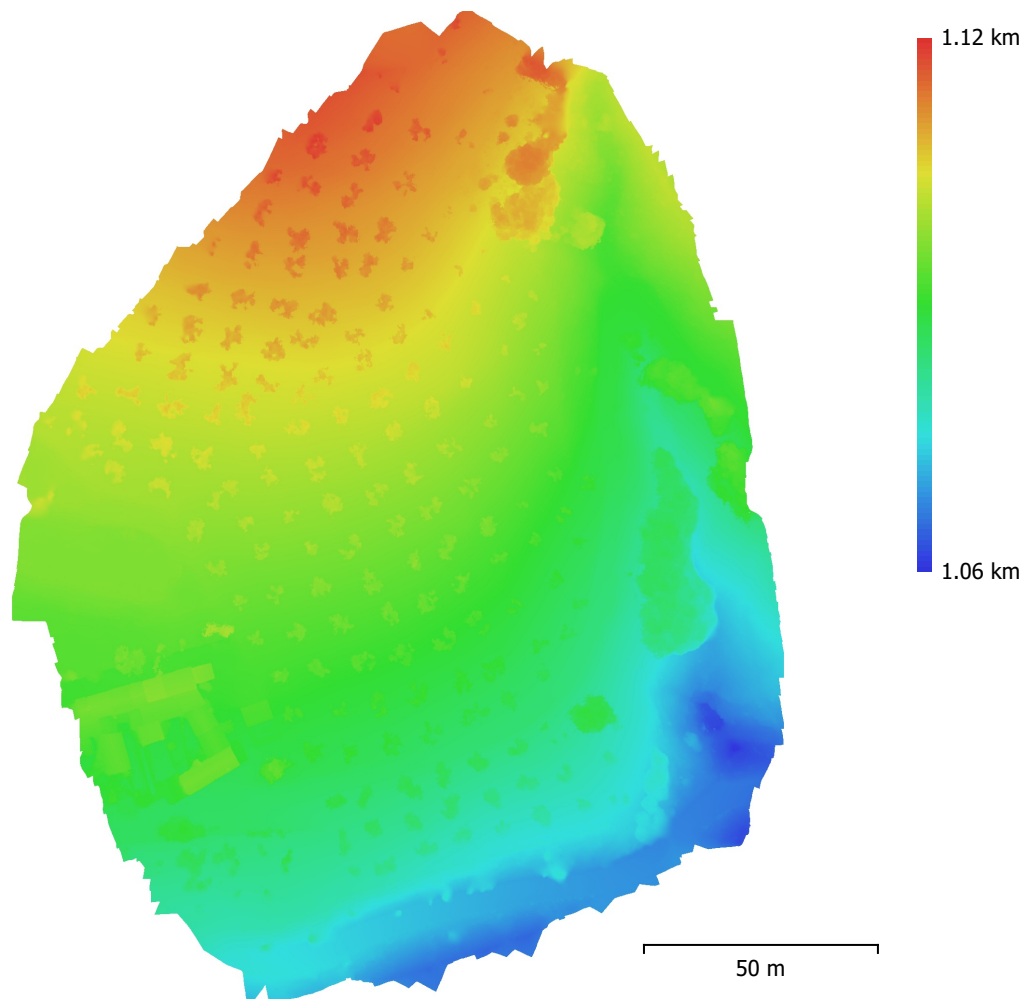


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 1.25 cm/pix
Densidad de puntos: 0.645 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	382
Cámaras orientadas	382
Sistema de coordenadas	ETRS89 / UTM zone 30N + Geoid_Spain
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Puntos de paso

Puntos	439,330 de 531,866
RMS error de reproyección	0.146566 (0.730297 pix)
Error de reproyección máximo	0.500821 (53.7403 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.75862 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	7.47304

Parámetros de orientación

Precisión	Alta
Preselección genérica	Sí
Preselección de referencia	No
Puntos clave por foto	40,000
Límite de puntos clave por megapixel	60,000
Puntos de paso por foto	10,000
Excluir puntos de paso inmóviles	No
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	3 minutos 58 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	505.21 MB
Tiempo de orientación	4 minutos 41 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	1.76 GB

Parámetros de optimización

Parámetros	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo de optimización	7 segundos
Fecha de creación	2024:06:25 22:25:50
Versión del programa	2.1.0.17532
Tamaño de archivo	72.28 MB

Mapas de profundidad

Número	382
--------	-----

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

Calidad	Alta
Modo de filtrado	Agresivo
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	54 minutos 3 segundos
Uso de memoria	10.11 GB
Fecha de creación	2024:06:25 23:30:41
Versión del programa	2.1.0.17532
Tamaño de archivo	4.74 GB

Nube de puntos

Puntos	189,709,795
Precisión de las coordenadas	3.17 mm

Atributos de los puntos

Color	3 bandas, uint8
-------	-----------------

Normal	
Confianza	1 - 67
Clases de puntos	
Terreno	4,784,361
Vegetación alta	35,843,406
Edificio	113,259,837
Firme de la carretera	17,724,649
Vehículo	16,579,030
Objetos hechos por el hombre	1,518,512
Parámetros de obtención de mapas de profundidad	
Calidad	Alta
Modo de filtrado	Agresivo
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	54 minutos 3 segundos
Uso de memoria	10.11 GB
Parámetros de generación de la nube de puntos	
Tiempo de procesamiento	1 hora 38 minutos
Uso de memoria	21.92 GB
Parámetros de clasificación de puntos	
Confianza	0
Tiempo de clasificación	8 minutos 2 segundos
Uso de memoria durante la clasificación	7.08 GB
Fecha de creación	2024:06:26 01:09:14
Versión del programa	2.1.0.17532
Tamaño de archivo	2.67 GB
Modelo	
Caras	34,092,387
Vértices	17,050,136
Colores de vértices	3 bandas, uint8
Parámetros de obtención de mapas de profundidad	
Calidad	Alta
Modo de filtrado	Agresivo
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	54 minutos 3 segundos
Uso de memoria	10.11 GB
Parámetros de reconstrucción	
Tipo de superficie	Arbitrario
Origen de datos	Mapas de profundidad
Interpolación	Habilitada
Máscaras volumétricas estrictas	No
Tiempo de procesamiento	30 minutos 25 segundos
Uso de memoria	15.27 GB
Fecha de creación	2024:06:26 07:52:47
Versión del programa	2.1.0.17532
Tamaño de archivo	731.61 MB
MDE	
Tamaño	13,230 x 16,935
Sistema de coordenadas	ETRS89 / UTM zone 30N + Geoid_Spain
Parámetros de obtención de mapas de profundidad	
Calidad	Alta
Modo de filtrado	Agresivo
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	54 minutos 3 segundos
Uso de memoria	10.11 GB
Parámetros de reconstrucción	
Origen de datos	Mapas de profundidad

Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	38 minutos 20 segundos
Uso de memoria	21.72 GB
Fecha de creación	2024:06:26 01:58:37
Versión del programa	2.1.0.17532
Tamaño de archivo	520.73 MB
Ortomosaico	
Tamaño	26,460 x 33,870
Sistema de coordenadas	ETRS89 / UTM zone 30N + Geoid_Spain
Colores	3 bandas, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	13 minutos 35 segundos
Uso de memoria	2.64 GB
Fecha de creación	2024:06:26 08:37:08
Versión del programa	2.1.0.17532
Tamaño de archivo	26.79 GB
Sistema	
Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	2.1.0 build 17532
OS	Windows 64 bit
RAM	31.71 GB
CPU	13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-13700H
GPU(s)	NVIDIA GeForce RTX 4070 Laptop GPU

Quality Report



Generated with PIX4Dmapper version 4.9.0



Important: Click on the different icons for:



Help to analyze the results in the Quality Report



Additional information about the sections



Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	J10001_Casablanca_P1_RGB
Processed	2024-05-08 08:59:16
Camera Model Name(s)	ZenmuseP1_35.0_8192x5460 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	0.65 cm / 0.25 in
Area Covered	0.024 km ² / 2.4413 ha / 0.01 sq. mi. / 6.0357 acres
Time for Initial Processing (without report)	22m:55s

Quality Check



Images	median of 35785 keypoints per image	
Dataset	382 out of 382 images calibrated (100%), all images enabled	
Camera Optimization	0.93% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 19113.1 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, no 3D GCP	

Preview

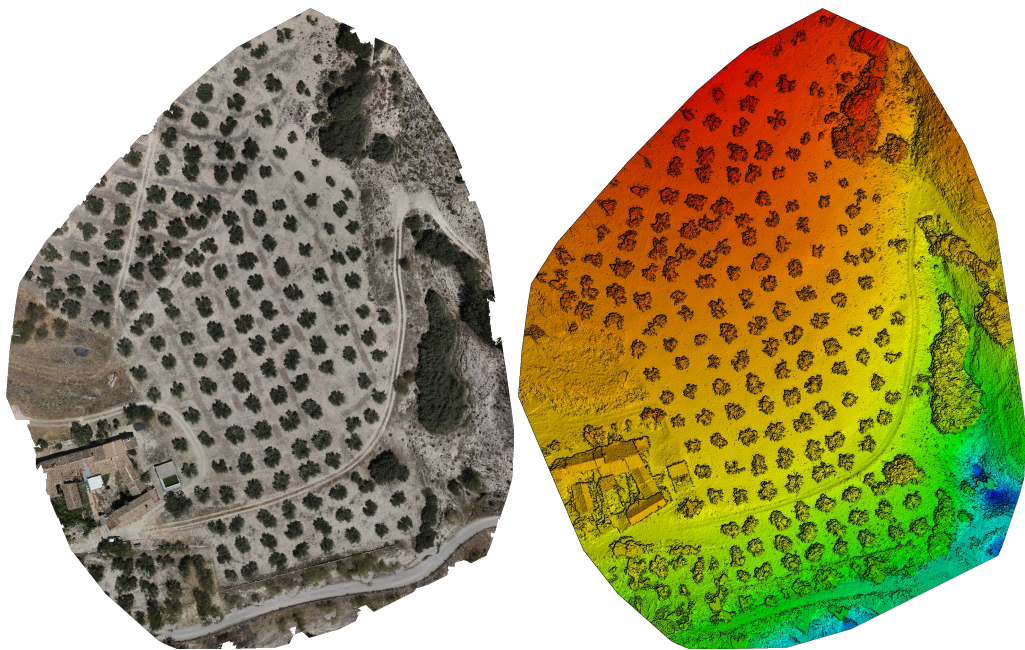


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



Number of Calibrated Images	382 out of 382
Number of Geolocated Images	382 out of 382

Initial Image Positions

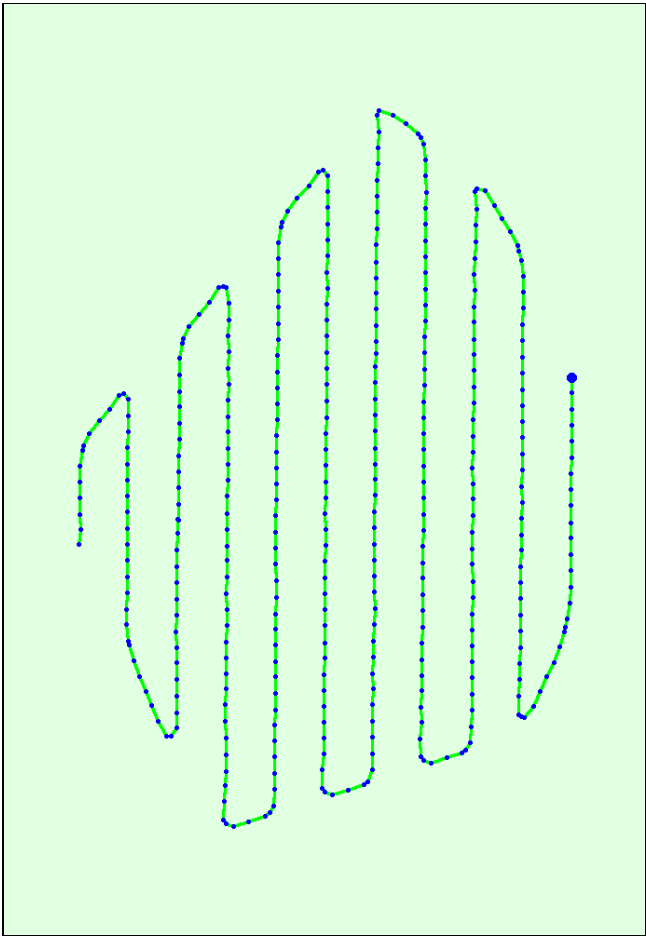
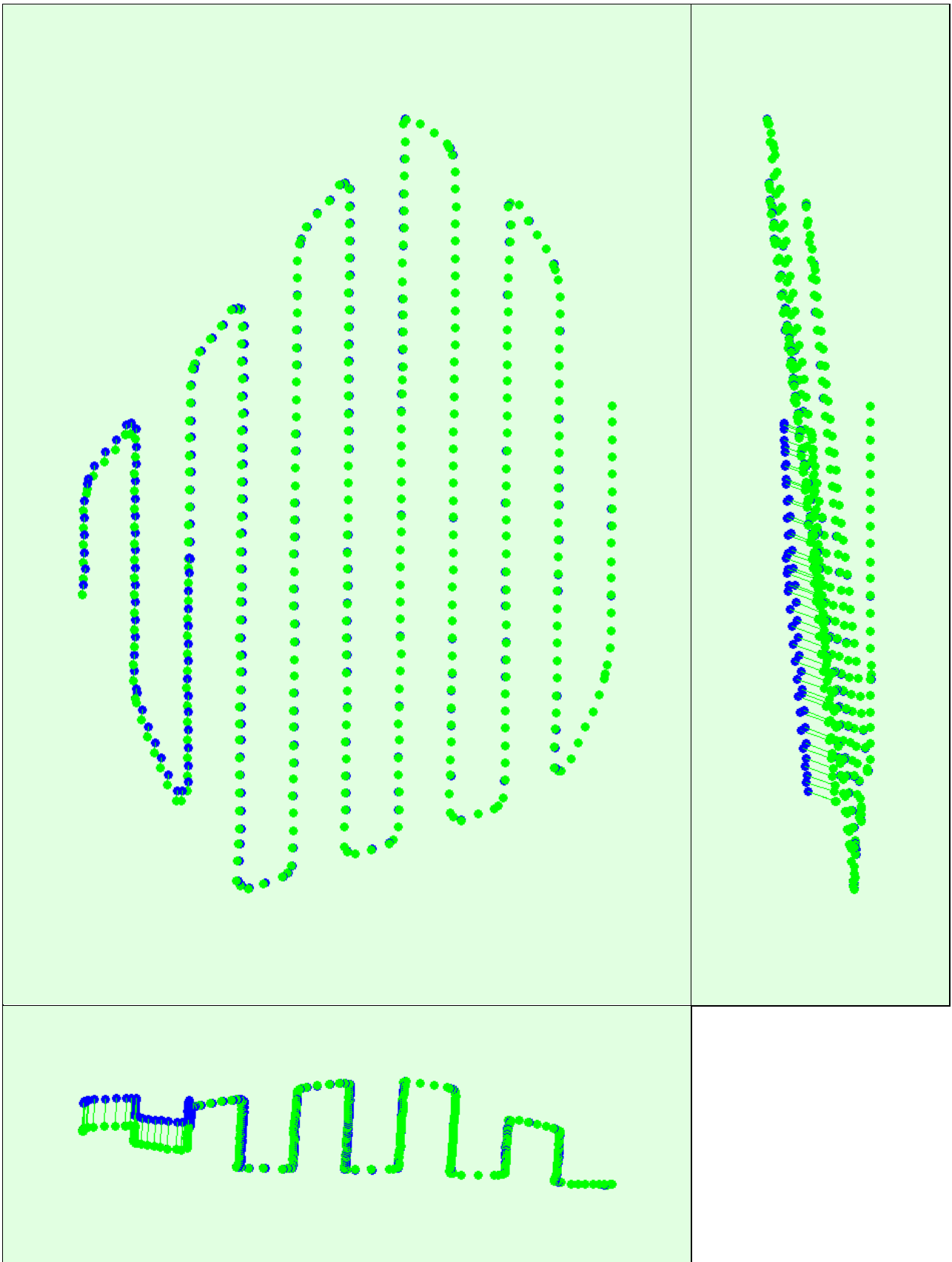


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions





Uncertainty ellipses 100x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

? Absolute camera position and orientation uncertainties



	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.003	0.004	0.003	0.006	0.006	0.002

Sigma	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

? Overlap

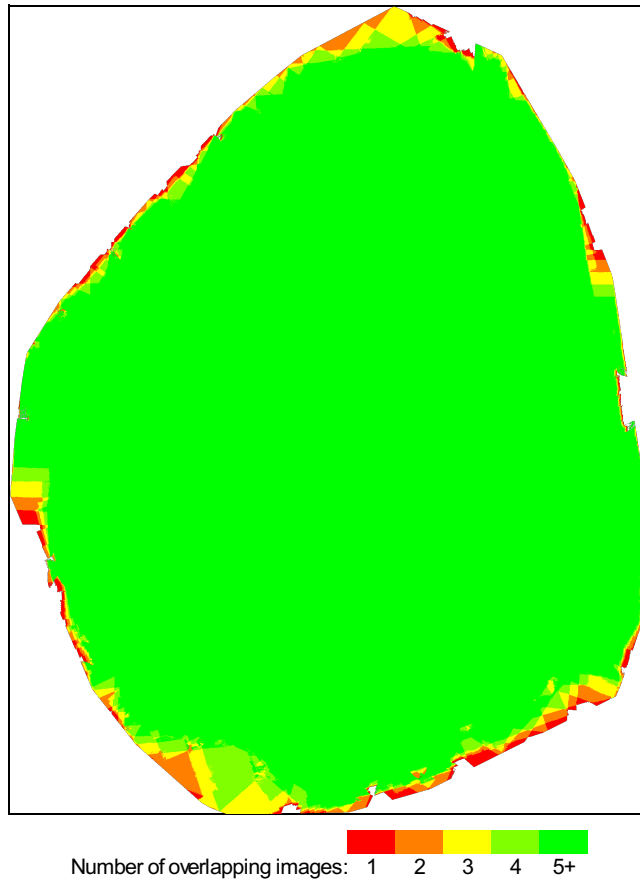


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details



Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	7555341
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	1522569
Mean Reprojection Error [pixels]	0.132

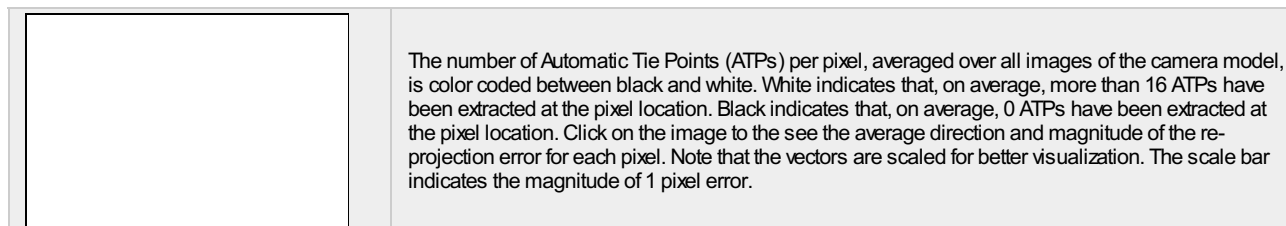
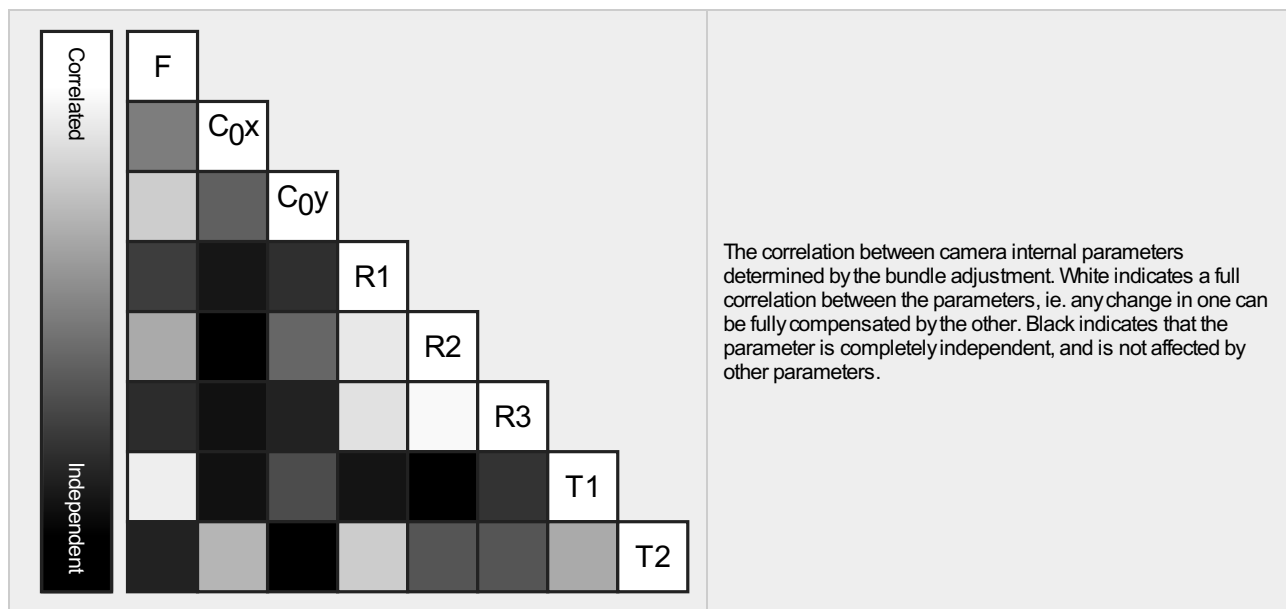
? Internal Camera Parameters

ZenmuseP1_35.0_8192x5460 (RGB). Sensor Dimensions: 35.000 [mm] x 23.328 [mm]



EXIF ID: ZenmuseP1_35.0_8192x5460

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	8194.340 [pixel] 35.010 [mm]	4096.001 [pixel] 17.500 [mm]	2729.996 [pixel] 11.664 [mm]	-0.048	0.021	-0.097	0.002	-0.001
Optimized Values	8270.936 [pixel] 35.337 [mm]	4087.720 [pixel] 17.465 [mm]	2763.569 [pixel] 11.807 [mm]	-0.049	0.012	-0.097	0.001	-0.001
Uncertainties (Sigma)	3.109 [pixel] 0.013 [mm]	0.140 [pixel] 0.001 [mm]	0.156 [pixel] 0.001 [mm]	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000



2D Keypoints Table



	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	35785	19113
Min	30499	14921
Max	40000	29544
Mean	36210	19778

3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	780323
In 3 Images	226021
In 4 Images	114396
In 5 Images	73620
In 6 Images	51955
In 7 Images	40244
In 8 Images	31728
In 9 Images	25875
In 10 Images	21214
In 11 Images	18205
In 12 Images	14418
In 13 Images	12422
In 14 Images	10952
In 15 Images	9589
In 16 Images	8422
In 17 Images	7646
In 18 Images	6770
In 19 Images	5950
In 20 Images	5544
In 21 Images	4955
In 22 Images	4461
In 23 Images	4114

In 24 Images	3839
In 25 Images	3490
In 26 Images	2986
In 27 Images	2848
In 28 Images	2497
In 29 Images	2462
In 30 Images	2123
In 31 Images	2087
In 32 Images	1906
In 33 Images	1684
In 34 Images	1511
In 35 Images	1509
In 36 Images	1316
In 37 Images	1302
In 38 Images	1200
In 39 Images	1190
In 40 Images	1116
In 41 Images	1092
In 42 Images	923
In 43 Images	892
In 44 Images	778
In 45 Images	725
In 46 Images	629
In 47 Images	639
In 48 Images	524
In 49 Images	525
In 50 Images	439
In 51 Images	351
In 52 Images	280
In 53 Images	169
In 54 Images	132
In 55 Images	121
In 56 Images	104
In 57 Images	78
In 58 Images	60
In 59 Images	62
In 60 Images	40
In 61 Images	36
In 62 Images	21
In 63 Images	25
In 64 Images	16
In 65 Images	7
In 66 Images	7
In 67 Images	4

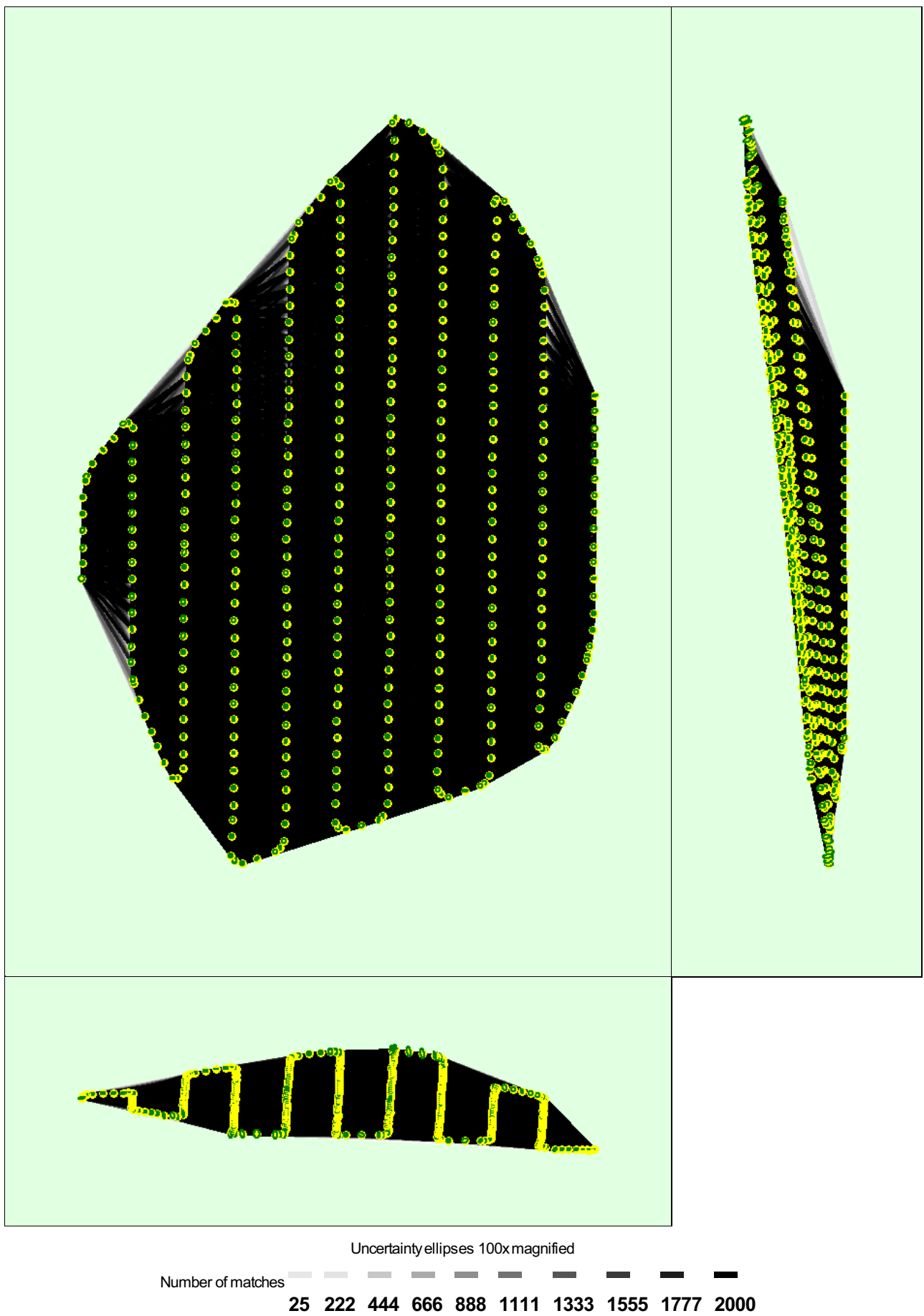


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.003	0.004	0.003	0.009	0.009	0.001
Sigma	0.001	0.001	0.002	0.004	0.005	0.000

Geolocation Details

? Absolute Geolocation Variance

Mn Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X[%]	Geolocation Error Y[%]	Geolocation Error Z[%]
-	-3.28	0.00	0.00	0.00
-3.28	-2.62	0.00	0.00	0.00
-2.62	-1.97	0.00	0.00	0.00
-1.97	-1.31	0.00	0.00	0.00
-1.31	-0.66	0.00	0.00	0.00
-0.66	0.00	31.15	30.89	42.67
0.00	0.66	68.85	55.76	43.98
0.66	1.31	0.00	0.00	0.00
1.31	1.97	0.00	6.81	0.00
1.97	2.62	0.00	6.54	0.00
2.62	3.28	0.00	0.00	0.00
3.28	-	0.00	0.00	13.35
Mean [m]		0.099274	0.283567	0.708804
Sigma [m]		0.138480	0.660333	1.831927
RMS Error [m]		0.170388	0.718645	1.964271

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

? Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X[%]	Images Y[%]	Images Z[%]
[-1.00, 1.00]	52.09	82.72	86.65
[-2.00, 2.00]	86.65	92.15	86.65
[-3.00, 3.00]	99.21	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	0.206887	0.206887	0.399243
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.306964	0.306964	0.692867

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	1.228
Phi	0.774
Kappa	1.556

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: 13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-13700H RAM: 32GB GPU: Intel(R) Iris(R) Xe Graphics (Driver: 31.0.101.4255), NVIDIA GeForce RTX 4070 Laptop GPU (Driver: 31.0.15.3667)
Operating System	Windows 11, 64-bit

Coordinate Systems



Image Coordinate System	WGS 84
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 30N

Processing Options



Detected Template	 Procesado_TFG_RGB*
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 0.5
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Custom, Number of Keypoints: 40000
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details



Processing Options



Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: High Resolution Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	01h:00m:08s
Time for Point Cloud Classification	55s
Time for 3D Textured Mesh Generation	35m:35s

Results



Number of Processed Clusters	2
Number of Generated Tiles	4
Number of 3D Densified Points	71280421
Average Density (per m ³)	9841.93

DSM, Orthomosaic and Index Details



Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (0.645 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp

Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Raster DTM	Generated: yes Merge Tiles: yes
DTMResolution	5 x GSD (0.645 [cm/pixel])
Time for DSM Generation	12m:52s
Time for Orthomosaic Generation	58m:16s
Time for DTM Generation	08m:31s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s