



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica,
Cartográfica y Topográfica

Modelos Digitales de Elevación (DEM) en Emergencias.
Una propuesta fotogramétrica de respuesta rápida.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Geomática y Geoinformación

AUTOR/A: Bautista Martinez, Lizzete

Tutor/a: Marqués Mateu, Ángel

Cotutor/a externo: Barbero García, Inés

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA GEODÉSICA
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA**



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**“MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN (DEM) EN
EMERGENCIAS. UNA PROPUESTA FOTOGRAMÉTRICA DE
RESPUESTA RÁPIDA”**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERIA GEOMÁTICA Y
GEOINFORMACIÓN**

Autor: Lizzete Bautista Martínez

Tutor: Ángel Marqués Mateu

Cotutora: Inés Barbero García

Septiembre 2025

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profunda gratitud hacia Dios y mis padres, Josefino Bautista Martínez y Marina Martínez, quienes me han apoyado incondicionalmente en este arduo camino. A pesar de la distancia que nos separa, siempre creyeron en mi visión de explorar nuevas experiencias profesionales y respaldaron cada uno de mis sueños.

Mi agradecimiento eterno también va dirigido a mi tutor, Ángel Marqués, director de la Escuela Técnica de Topografía, Cartografía y Geodesia. Desde mi llegada al máster, me brindó su apoyo incondicional, orientación constante y, sobre todo, confió en mí desde el primer momento.

Gracias a mi cotutora, cuya amplia experiencia en el ámbito de la fotogrametría fue clave para que pudiera comprender a fondo el uso de los softwares especializados.

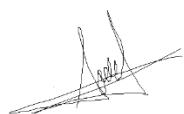
Agradezco de corazón a cada uno de mis compañeros y amigos, con quienes compartí noches de desvelo, esfuerzo y perseverancia, y con quienes hoy puedo ver reflejado el fruto de ese trabajo conjunto.

Gracias también a mis profesores, por su paciencia al resolver nuestras dudas y por hacer de cada clase una experiencia amena, enriquecedora y, muchas veces, divertida.

Un agradecimiento muy especial a mi Pareja Mathieu Aguera por acompañarme en este camino tan importante y finalmente gracias a mí por mi resiliencia, paciencia y determinación para alcanzar esta meta que, desde niña, soñé con cumplir.

COMPROMISO

"El presente documento ha sido realizado completamente por el firmante; no ha sido entregado como otro trabajo académico previo y todo el material tomado de otras fuentes ha sido convenientemente entrecomillado y citado su origen en el texto, así como referenciado en la bibliografía"



RESUMEN

El presente trabajo fin de máster (TFM) tiene como objetivo desarrollar una metodología práctica y eficiente para generar Modelos Digitales de Elevación (DEM) a partir de vuelos fotogramétricos con drones. Específicamente, pretende proporcionar una herramienta de respuesta rápida y precisa ante situaciones de emergencia como las que afectaron a la Comunidad Valenciana (España) tras la reciente Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) del 29 de octubre de 2024. En este tristemente famoso episodio, la riada generó una gran acumulación de sedimentos, escombros y alteraciones topográficas que dificultaron la evaluación precisa de las zonas afectadas y retrasaron la respuesta de las autoridades. A partir de esta problemática, el proyecto plantea cómo agilizar la obtención de información geoespacial crítica para la toma de decisiones tras un evento de este tipo. En particular, se propone el uso de la técnica DoD (DEM of Difference), comparando el Modelo Digital del Terreno (MDT) oficial del Instituto Geográfico Nacional (IGN), previo al evento catastrófico, con un DEM generado inmediatamente después del evento mediante un vuelo de dron. La velocidad de respuesta en este tipo de situaciones es un factor determinante en aspectos como la reducción de los impactos del evento, la priorización en tareas de búsqueda o la aceleración en la vuelta a la normalidad. En este contexto se plantea un caso de estudio basado en tres métodos de generación del DEM post-evento: (i) uso exclusivo de los metadatos (coordenadas GNSS y datos IMU) del dron, sin necesidad de puntos de control en tierra, lo que permite procesar el modelo de manera casi inmediata, (ii) uso de puntos de control en tierra (GCPs), obtenidos mediante instrumentación GNSS que garantizaría la máxima precisión y (iii) uso de puntos de control aproximados con coordenadas extraídas de conjuntos de datos geoespaciales previamente existentes (ortofotos y nubes de puntos LiDAR del PNOA) para transferir la georreferenciación al modelo generado con el software fotogramétrico. Los DEM generados con estos tres métodos se comparan con el MDT oficial del IGN con un objetivo doble. En primer lugar, para la aplicación del método DoD en las zonas afectadas, donde se espera una variación del relieve importante debido a procesos de erosión o deposición de sedimentos. Las zonas con mayor valor DoD permitirían determinar áreas preferentes para tareas de búsqueda en la post-emergencia. En segundo lugar, las zonas donde no haya habido cambios permiten realizar cálculos de la calidad de los DEM generados en los tres casos descritos anteriormente. El TFM permite así determinar cuál sería el método que presenta la mejor combinación precisión/rapidez para generar cartografía DoD de manera eficaz en situaciones de emergencia, en las cuales existen limitaciones físicas y logísticas para la realización de tareas rutinarias en fotogrametría como la toma de puntos de control. El procesamiento fotogramétrico de las imágenes y la generación de modelos se realizó mediante el software Agisoft Metashape. herramientas desarrolladas de apoyo a la generación de puntos de apoyo aproximados se integraron en una caja de

herramientas desarrollada en el entorno de trabajo de ArcGIS Pro-2.6 de ESRI. Estos dos sistemas son bien conocidos en la comunidad Geomática y aseguran resultados fiables y replicables. El resultado de este trabajo proporciona una herramienta que contribuye a mejorar la gestión de emergencias mediante la aplicación de tecnologías geomáticas, aportando una herramienta valiosa para la toma de decisiones en situaciones críticas.

Palabras clave: DEM | DEM of Difference | Fotogrametria | SIG | Emergencias.

ABSTRACT

This Master's thesis (TFM) aims to develop a practical and efficient methodology to generate Digital Elevation Models (DEM) from photogrammetric flights with drones. Specifically, it aims to provide a tool for rapid and accurate response to emergency situations such as those that affected the Valencian Community (Spain) after the recent Isolated High Level Depression (DANA) of October 29, 2024. In this infamous episode, the flood generated a large accumulation of sediment, debris and topographic alterations that made it difficult to accurately assess the affected areas and delayed the response of the authorities. Based on this problem, the project proposes how to speed up the collection of critical geospatial information for decision making after an event of this type. In particular, the use of the DoD (DEM of Difference) technique is proposed, comparing the official Digital Terrain Model (DTM) of the National Geographic Institute (IGN), prior to the catastrophic event, with a DEM generated immediately after the event by means of a drone flight. The speed of response in this type of situations is a determining factor in aspects such as the reduction of the impacts of the event, the prioritization in search tasks or the acceleration in the return to normality. In this context, a case study based on three methods of post-event DEM generation is proposed: (i) exclusive use of the metadata (GNSS coordinates and IMU data) from the drone, without the need for ground control points, which allows processing the model almost immediately, (ii) use of ground control points (GCPs), obtained by GNSS instrumentation that would guarantee maximum accuracy and (iii) use of approximate control points with coordinates extracted from previously existing geospatial datasets (orthophotos and PNOA LiDAR point clouds) to transfer the georeferencing to the model generated with the photogrammetric software. The DEMs generated with these three methods are compared with the official DTM of the IGN with a double objective. Firstly, for the application of the DoD method in the affected areas, where a significant relief variation is expected due to erosion or sediment deposition processes. The areas with higher DoD values would allow the determination of preferential areas for post-emergency search tasks. Secondly, the areas where no changes have occurred allow the quality of the DEMs generated in the three cases described above to be calculated. The TFM thus allows to determine which method presents the best combination of accuracy/rapidity to generate DoD mapping efficiently in emergency situations, in which there are physical and logistical limitations to perform routine photogrammetric tasks such as taking control points. Photogrammetric image processing and model generation was performed using Agisoft Metashape software. On the other hand, the routines to support the generation of approximate support points were integrated into a toolbox developed in ESRI's ArcGIS Pro 2.6 working environment. These two systems are well known in the Geomatics community and ensure reliable and replicable results. The result of this work provides a tool that contributes to improve emergency management through the application of geomatics technologies, providing a valuable tool for decision making in critical situations.

“Modelos Digitales de Elevación (DEM) en Emergencias. Una propuesta fotogramétrica de respuesta rápida”

Keywords: **DEM | DEM of Difference | Fotogrametry | SIG | Emergency.**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Imagen captada durante la DANA que afectó a la Comunidad Valenciana el 29 de octubre de 2024 (CNN en español, 2024).	3
Figura 2: MDS de la zona de trabajo del TFM (Fuente: elaboración propia)	7
Figura 3: Recorrido de Dron sobre la zona de interés (Fuente: elaboración propia).	9
Figura 4: Dron DJI Mavic 3E (DJI, 2023)	15
Figura 5: Imagen de GNSS TRIMBLE R12 (Trimble, 2022).	16
Figura 6: Equipo Leica Zeno FLX100 (Leica Geosystems, 2021).	17
Figura 7: Archivo MDT02-ETRS89-HU30-0721-3-COB2.TIF con la zona de estudio marcada en el norte (IGN, 2021).	19
Figura 8: Archivo PNOA_MA_OF_ETRS89_HU30_h25_0721_3 con la zona de estudio marcada en el norte (IGN, 2015-2021).	20
Figura 9: Mapa zona de estudio (Fuente: elaboración propia).	21
Figura 10: Ruta del vuelo fotogramétrico (Fuente: elaboración propia).	22
Figura 11: Metadatos de Fotogramas (Fuente: elaboración propia).	22
Figura 12: Configuración: alineación de los fotogramas (Fuente: elaboración propia).	24
Figura 13: Calibración de la cámara: a) Coeficientes de calibración, b) Distorsión radial (Fuente: elaboración propia).	24
Figura 14: Parámetros de configuración para nube de puntos (Fuente: elaboración propia)	25
Figura 15: Nivel de confianza de nube de puntos (Fuente: elaboración propia).	26
Figura 16: Aplicación de filtro de índice de confianza mayor a 3 (Fuente: elaboración propia).	27
Figura 17: a) Parámetros de clasificación de nube de puntos. B) Clasificación de nube de puntos por la clase Ground (Fuente: elaboración propia).	27
Figura 18: Configuración para obtención de un MDT (Fuente: elaboración propia).	28
Figura 19: Configuración de parámetros para exportar un MDT (Fuente: elaboración propia).	29
Figura 20: Metadatos del Fotograma 400 (Fuente: elaboración propia).	30
Figura 21: MDS Y MDT generados con el Método I sin GCPs (Fuente: elaboración propia).	31
Figura 22: Configuración Importación de los puntos (Fuente: elaboración propia).	32
Figura 23: Marcado Manual sobre fotogramas (Fuente: elaboración propia).	33
Figura 24: Ubicaciones de GCP y estimaciones de error (Fuente: elaboración propia).	33
Figura 25: Generación del MDT con GCPs (Fuente: elaboración propia).	34
Figura 26: Generación del MDT con GCPs semiautomático (Fuente: elaboración propia).	36
Figura 27: Extracción por máscara de la zona de estudio (Fuente: elaboración propia).	38
Figura 28: Herramienta de Calculadora ráster	39
Figura 29: Resultado de la aplicación de la técnica DoD sobre la ortoimagen de la zona de estudio (Fuente: elaboración propia).	40
Figura 30: Interfaz gráfica de usuario de la caja de herramientas PyNOA (Fuente: elaboración propia).	41
Figura 31: configuración de Carpetas.	42
Figura 32: Trayectoria con los centros de proyección de los fotogramas del vuelo con el fotograma 0446 cuyo centro esta dibujado en color amarillo (Fuente: elaboración propia).	44
Figura 33: Reclasificación después de aplicar la técnica DOD en los métodos I, I Y III (Fuente: elaboración propia)	48

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Características y Fuentes de Datos Geoespaciales Utilizados (Fuente: elaboración propia).</i>	18
<i>Tabla 2: Fichero con coordenadas de puntos GCPS (Fuente: Elaboración propia).</i>	23
<i>Tabla 3: Error medio de ubicación de la cámara (Fuente: elaboración propia).</i>	30
<i>Tabla 4: Coordenadas UTM de los puntos de apoyo (GCPs) (Fuente: elaboración propia).</i>	32
<i>Tabla 5: Puntos de control RMSE (Fuente: elaboración propia).</i>	34
<i>Tabla 6: Error total de los Puntos de apoyo GCPS (Fuente: elaboración propia).</i>	34
<i>Tabla 7: Error total de los puntos de apoyo GCPS (Fuente: elaboración propia).</i>	36
<i>Tabla 8: Validación altimétrica de los MDT mediante 26 puntos GNSS de control: valores observados, estimados y residuos (Fuente: elaboración propia).</i>	45
<i>Tabla 9: Estadísticos de la evaluación altimétrica de los Métodos I, II y III (Fuente: elaboración propia).</i>	46
<i>Tabla 10: Valores de erosión derivados de la diferencia de modelos digitales del terreno (DoD) (Fuente: elaboración propia).</i>	47
<i>Tabla 11: Valores de acumulación derivados de la diferencia de modelos digitales del terreno (DoD) (Fuente: elaboración propia).</i>	48

INDICE GENERAL

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.JUSTIFICACIÓN Y RELEVANCIA DEL ESTUDIO.....	2
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.3. ESTRUCTURA DEL TFM	4
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. EMERGENCIAS Y DESASTRES NATURALES.....	6
2.2. MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN Y SUS APLICACIONES EN GEOMÁTICA.	7
2.3. AVANCES EN FOTOGRAMETRÍA CON DRONES EN EMERGENCIAS.	9
2.4. LA TÉCNICA DEM OF DIFFERENCE (DOD),	10
2.5. INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES EN LA GESTIÓN DE CRISIS	12
2.6. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....	13
CAPITULO 3. METODOLOGIA	15
3.1. INSTRUMENTOS Y SOFTWARE UTILIZADOS	15
3.1.1. DJI MAVIC 3E (ENTERPRISE)	15
3.1.2. GNSS TRIMBLE R12	15
3.1.3. RECEPTOR LEICA ZENO FLX100	16
3.1.4. AGISOFT METASHAPE PROFESSIONAL	17
3.1.5. ARGIS PRO 2.5.0.....	17
3.2. FUENTES DE DATOS GEOESPACIALES	17
3.2.1. MODELO DIGITAL DEL TERRENO MDT02 (PNOA-LIDAR).....	18
3.2.2. ORTOFOTOGRAFIA PNOA.....	19
3.2.2. NUBE DE PUNTOS LIDAR PNOA	20
3.3. RECOLECCION DE DATOS DE CAMPO.....	21
3.3.1. ZONA DE ESTUDIO.....	21
3.3.2. VUELO FOTOGRAMETRICO	22
3.4. PROCESO FOTOGRAMETRICO	23
3.4.1 ALINEACION DE FOTOGRAFIAS	23
3.4.2 CALIBRACION DE CAMARA	24
3.4.3 NUBE DE PUNTOS.....	25
3.4.4 LIMPIEZA DE NUBE LA DE PUNTOS	26
3.4.5 CLASIFICACION DE NUBE DE PUNTOS.....	27
3.4.6 CREACIÓN DEL MDT	28
3.5. METODO I: USO EXCLUSIVO DE METADATOS DEL DRON (GNSS e IMU)	29

3.5.1 GEOREFERENCIACIÓN.....	29
3.5.2 GENERACION DEL MDT SIN GCPs.....	30
3.6. METODO II USO DE PUNTOS DE CONTROL EN TIERRA (GCPs)	31
3.6.1 GEOREFERENCIACION CON GCPs	32
3.6.2 GENERACION DEL MDT CON GCPs.....	34
3.7. METODO III USO DE PUNTOS DE CONTROL APROXIMADOS A PARTIR DE DATOS GEOESPACIALES EXISTENTES	35
3.7.1 GEPREFERENCIACION CON METODO SEMIAUTOMATICO.....	35
3.7.2 GENERACION DEL MDT CON METODO SEMIAUTOMATICO	36
3.8. EVALUACION DE LA CALIDAD	37
3.9. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DEM OF DIFFERENCE (DOD)	38
3.10. CREACION DE UNA CAJA DE HERRAMIENTAS.....	41
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1. PRESICIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO	45
4.2. RESULTADOS DE LA TECNICA DOD	47
CAPITULO 5. CONCLUSIONES	49
5.1. CONCLUSIONES	49
5.2.FUTURAS LINEAS DE DESARROLLO	50
BIBLIOGRAFIA	52
ANEXOS	56

LISTA DE ACRÓNIMOS

- **Check Point** – Punto de control (punto independiente utilizado para validar la precisión del modelo)
- **CNIG** – Centro Nacional de Información Geográfica
- **DANA** – Depresión Aislada en Niveles Altos
- **DEM** – *Digital Elevation Model* / Modelo Digital de Elevación
- **DoD** – *DEM of Difference* / Diferencia de Modelos Digitales de Elevación
- **EPSG** – *European Petroleum Survey Group* / Código estándar de sistemas de referencia de coordenadas
- **ETRS89** – *European Terrestrial Reference System 1989* / Sistema de referencia geodésico oficial en Europa
- **EXIF** – *Exchangeable Image File Format* / Metadatos de imágenes (información de cámara, posición, etc.)
- **GCP** – *Ground Control Point* / Punto de apoyo (punto utilizado para georreferenciar el modelo)
- **GNSS** – *Global Navigation Satellite System* / Sistema Global de Navegación por Satélite
- **IGN** – Instituto Geográfico Nacional (España)
- **IMU** – *Inertial Measurement Unit* / Unidad de Medición Inercial
- **LiDAR** – *Light Detection and Ranging* / Tecnología láser aerotransportada para obtener modelos de alta resolución
- **MDT/DTM** – Modelo Digital del Terreno
- **MDS/DSM** – Modelo Digital de Superficie
- **PNOA** – Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (España)
- **RMSE** – *Root Mean Square Error* / Error Cuadrático Medio
- **RMSE** – Root Mean Square Emr
- **SFM** – Structure For Motion
- **TFM** – Trabajo final de máster
- **UAV** – *Unmanned Aerial Vehicle* / Vehículo Aéreo No Tripulado (dron)
- **UTM** – *Universal Transverse Mercator* / Proyección cartográfica

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

“Cuando el terreno donde habitamos cambia, también cambia la vida”

Los desastres naturales constituyen una amenaza creciente para las sociedades modernas. En las últimas décadas, el aumento de la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos —como inundaciones, tormentas o riadas— ha intensificado la necesidad de mejorar los sistemas de prevención y respuesta ante emergencias. Estos eventos suelen generar alteraciones significativas en el terreno, dificultando tanto la evaluación de los daños como la planificación de las actuaciones de emergencia.

El 29 de octubre de 2024, la Comunidad Valenciana se vio gravemente afectada por una Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA), que provocó lluvias torrenciales y un aumento repentino del caudal de numerosos cauces. Este evento causó la acumulación masiva de sedimentos, lodo y escombros en zonas urbanas y rurales, lo que alteró significativamente la topografía de diversas áreas. La falta de información geoespacial precisa y actualizada durante las primeras horas tras el suceso dificultó la toma de decisiones por parte de las autoridades, ralentizando las tareas de búsqueda, rescate y recuperación.

Este tipo de situaciones evidencia la necesidad de herramientas que permitan generar, en un corto plazo de tiempo, información cartográfica precisa que refleje los cambios del terreno. La información geoespacial, en especial los Modelos Digitales de Elevación (DEM), juega un papel fundamental en la evaluación post-evento, ya que permite identificar zonas afectadas, priorizar intervenciones y reducir los tiempos de respuesta.

El presente trabajo fin de máster (TFM) plantea una metodología de respuesta rápida basada en vuelos fotogramétricos con drones para generar DEMs inmediatamente después de un evento catastrófico. Estos modelos se comparan con los datos previos disponibles —en este caso, el Modelo Digital del Terreno (MDT) del Instituto Geográfico Nacional (IGN)— mediante la técnica conocida como DEM of Difference (DoD). Esta técnica permite detectar alteraciones significativas en la morfología del terreno, como acumulaciones de sedimentos o erosiones, lo que facilita la localización de áreas críticas que requieren intervención inmediata.

La elección de esta metodología responde no solo a criterios de precisión, sino también de eficiencia operativa, ya que durante una emergencia puede ser inviable realizar levantamientos topográficos tradicionales o colocar puntos de control en tierra. Por ello, el trabajo evalúa tres métodos distintos de generación de DEM post-evento,

con el objetivo de determinar cuál ofrece el mejor equilibrio entre precisión y velocidad de ejecución.

Cabe señalar que, a lo largo de este trabajo, se adoptará la siguiente convención terminológica: el término punto de apoyo se empleará para referirse a los *Ground Control Points (GCPs)* en inglés, que son los utilizados para georreferenciar y ajustar el modelo fotogramétrico. En cambio, el término punto de control se usará para designar los *Check Points*, empleados exclusivamente con fines de validación de precisión y no incluidos en el ajuste del modelo. Esta aclaración resulta necesaria para evitar ambigüedades en la traducción y asegurar la correcta interpretación de los resultados

Este Trabajo Fin de Máster se enmarca en el ámbito de la Ingeniería Geomática aplicada a la gestión de emergencias, aportando una solución concreta y viable a una necesidad real observada durante un evento reciente. A través de esta propuesta, pretende contribuir a mejorar la capacidad de respuesta ante desastres, utilizando herramientas geomáticas avanzadas para apoyar la toma de decisiones en situaciones críticas.

1.1. JUSTIFICACIÓN Y RELEVANCIA DEL ESTUDIO.

La gestión eficaz de emergencias depende, en gran medida, de la disponibilidad de información precisa y oportuna. Sin embargo, en muchos escenarios reales, como ocurrió durante la DANA de octubre de 2024 en la Comunidad Valenciana, los métodos convencionales de evaluación del terreno no ofrecen una respuesta lo suficientemente rápida. Las técnicas tradicionales, como los levantamientos topográficos con equipos GNSS o la colocación de puntos de apoyo (GCPs), requieren tiempo, personal y condiciones de acceso que, en un entorno de crisis, no siempre están disponibles.

En este contexto, la fotogrametría con drones se presenta como una alternativa eficaz, flexible y de rápida implementación. Su capacidad para generar Modelos Digitales de Elevación (DEM) a partir de imágenes aéreas en cuestión de horas desde la realización del vuelo fotogramétrico permite actualizar la información geoespacial de forma inmediata. No obstante, la precisión de los modelos obtenidos puede variar significativamente en función del método de georreferenciación utilizado. Por ello, resulta fundamental evaluar diferentes enfoques que permitan optimizar el balance entre rapidez operativa y precisión geométrica.

Este Trabajo Fin de Máster propone una metodología comparativa entre tres métodos distintos de generación de DEM post-evento:

1. Uso exclusivo de los metadatos del dron (GNSS e IMU).

2. Uso de puntos de apoyo en el terreno (GCPs) obtenidos con equipos GNSS de calidad geodésica.
3. Uso de puntos de apoyo aproximados extraídos de fuentes geoespaciales oficiales (ortofotos, nubes de puntos LiDAR).

Además, se aplica la técnica DoD para analizar los cambios topográficos significativos y validar la calidad de los modelos generados. Esta doble finalidad —detección de alteraciones del terreno y validación de precisión— permite cubrir tanto los aspectos prácticos de la emergencia como los requisitos técnicos del análisis geoespacial.

La relevancia de este estudio radica en su aplicación directa en escenarios reales, ofreciendo una herramienta geomática que mejora la capacidad de respuesta ante emergencias. Al centrarse en soluciones viables en condiciones operativas adversas, este trabajo se alinea con la orientación profesional del máster, respondiendo a una necesidad tangible del sector y aportando beneficios concretos para la sociedad.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general de este TFM es desarrollar una metodología práctica y eficiente para generar Modelos Digitales de Elevación (DEM) a partir de vuelos fotogramétricos con drones, con el fin de proporcionar una herramienta de respuesta rápida y precisa en situaciones de emergencia, específicamente para evaluar los cambios topográficos causados por eventos catastróficos como la DANA del 29 de octubre de 2024 en la Comunidad Valenciana. (Figura 1).



Figura 1: Imagen captada durante la DANA que afectó a la Comunidad Valenciana el 29 de octubre de 2024 (CNN en español, 2024).

Para alcanzar este objetivo general, se definen los siguientes objetivos específicos, formulados como resultados a lograr y comenzando con un verbo en infinitivo, tal como lo establece la guía de estilo:

- Evaluar la viabilidad y precisión de diferentes métodos de generación de DEM post-evento (uso exclusivo de metadatos del dron; uso de puntos de control en tierra con instrumentación GNSS; y uso de puntos de control aproximados con datos geoespaciales existentes) utilizando vuelos fotogramétricos con drones.
- Aplicar la técnica DEM of Difference (DoD) para identificar y cuantificar los cambios topográficos (erosión y deposición de sedimentos) en zonas afectadas por eventos catastróficos.
- Determinar el método óptimo de generación de DEM que ofrezca la mejor combinación de precisión y rapidez para la cartografía DoD en contextos de emergencia con limitaciones operativas.
- Desarrollar una caja de herramientas geoespacial para agilizar las rutinas de apoyo a la generación de puntos de apoyo aproximados en un entorno GIS profesional (ArcGIS Pro).
- Contribuir a la mejora de la gestión de emergencias mediante la provisión de una herramienta geomática valiosa para la toma de decisiones rápidas y precisas en situaciones críticas.

Este planteamiento metodológico no solo pretende cubrir los aspectos técnicos de la generación de cartografía post-evento, sino también facilitar su implementación en el ámbito operativo, maximizando su aplicabilidad y valor estratégico en situaciones de emergencia.

1.3. ESTRUCTURA DEL TFM

La presente investigación se organiza en cinco capítulos principales, además de la bibliografía y anexos, con el fin de guiar al lector desde el contexto general hasta las conclusiones y aportaciones finales:

Capítulo 1. Introducción. Presenta el contexto en el que se enmarca el estudio, destacando la relevancia de la investigación frente a los desastres naturales recientes. Se incluye la justificación del trabajo, los objetivos generales y específicos, así como la explicación de la estructura de la tesis.

Capítulo 2. Marco teórico. Revisa el estado del arte relacionado con emergencias y desastres naturales, el papel de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) en geomática, los avances de la fotogrametría con drones aplicada a emergencias, la técnica DEM of Difference (DoD) y la integración de tecnologías geoespaciales en la gestión de crisis. Este capítulo sienta las bases conceptuales y metodológicas para el desarrollo del TFM.

Capítulo 3. Metodología. Detalla los equipos, software y fuentes de datos empleados, así como la zona de estudio y la planificación del vuelo fotogramétrico. Se describe el proceso fotogramétrico completo y se desarrollan los tres métodos comparativos de generación de MDT (con metadatos GNSS/IMU, con GCPs y con puntos de apoyo aproximados). También se expone la aplicación de la técnica DoD, la evaluación de la calidad y la creación de una caja de herramientas en ArcGIS Pro para optimizar el flujo de trabajo.

Capítulo 4. Resultados y discusión. Presenta los resultados obtenidos con cada uno de los métodos, comparando su desempeño en términos de precisión y rapidez. Se analizan los cambios detectados en el terreno mediante el DoD y se discute la viabilidad de cada enfoque en contextos de emergencia.

Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras. Resume los principales hallazgos de la investigación, destacando las aportaciones metodológicas y prácticas. Asimismo, se señalan las limitaciones encontradas y se proponen líneas de investigación futura orientadas a mejorar la integración de drones y geomática en la gestión de emergencias.

Finalmente, se incluye la bibliografía empleada a lo largo del trabajo y los anexos, donde se recopila información complementaria como reportes técnicos de software, capturas de procesos y otros materiales de apoyo.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. EMERGENCIAS Y DESASTRES NATURALES

Los desastres naturales en los últimos años se han catalogado como una serie de eventos extremos debido a procesos naturales que causan daños significativos al medio ambiente, personas, bienes y a todo el entorno que nos rodea. La oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), ha definido un “desastre” como "una interrupción grave del funcionamiento de una comunidad o sociedad que causa pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales que exceden la capacidad de la comunidad afectada para hacerles frente utilizando sus propios recursos" (UNDRR, 2017).

La diferencia entre emergencia, desastre y catástrofe es una forma muy común de clasificar la respuesta ante eventos extremos causados por procesos naturales, cuando se tiene una emergencia es necesario la atención inmediata para evitar que el evento escale a un desastre puesto que esto significa una amenaza inminente para la seguridad, la salud, la propiedad o el medio el ambiente, y esto requiere una acción rápida y coordinada para mitigar sus efectos. El desastre requiere asistencia externa, ya sea de niveles superiores de gobierno o de diferentes organizaciones. Por su parte una catástrofe es un desastre extremo que causa un daño masivo o una interrupción tan severa que la respuesta ante esta situación colapsa, volviendo inoperativos a la infraestructura y los sistemas existentes; las pérdidas son tan grandes que recuperarse ante este tipo de eventos es muy difícil y toma un tiempo prolongado, a menudo requiere movimientos de recursos y ayuda nacional e internacional (Alexander, 2000).

Es probable que haya aumentado la frecuencia e intensidad de estos eventos a nivel mundial, en parte debido a los efectos del cambio climático, inducido por el ser humano, los registros indican que la cantidad mundial de ciclones tropicales con más intensidad (categorías de 3 a 5) ha aumentado en las últimas cuatro décadas. Con cada grado que aumenta el calentamiento global, los extremos siguen notándose. Un ejemplo de esta situación ejemplo es por cada 0,5°C de aumento al calentamiento global provoca aumentos cada vez más notorios en la intensidad y en la frecuencia de los casos de calor extremo, y las precipitaciones intensas, así como las sequías en regiones agrícolas y ecológicas (Cutter et al., 2008; IPCC, 2021).

La información geoespacial obtenida a partir de tecnologías como lo son los sistemas de información geográfica (SIG) y la teledetección, específicamente representada en productos como modelos digitales de elevación (DEM), imágenes satelitales, ortofotos y mapas temáticos, son un pilar fundamental para la gestión de desastres

naturales teniendo en cuenta las fases de gestión de riesgo, prevención, preparación, respuesta y recuperación (Goodchild, 2006).

2.2. MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN Y SUS APLICACIONES EN GEOMÁTICA.

Los Modelos Digitales de Elevación (DEM) son representaciones tridimensionales de la superficie terrestre generadas mediante técnicas de adquisición remota y procesamiento geomático. Estas representaciones numéricas permiten analizar la morfología del terreno y modelar fenómenos geoespaciales con un alto grado de precisión. Existen distintos tipos de modelos, entre los que destacan el Modelo Digital de Superficie (MDS), que incluye la elevación de todos los elementos presentes sobre el terreno (como vegetación, edificaciones o infraestructuras), y el Modelo Digital del Terreno (MDT), que representa exclusivamente la topografía del suelo, excluyendo dichos objetos (Gómez & Aguilar, 2020). La figura 2 muestra un MDS de la zona de estudio donde se aprecian claramente edificaciones y vegetación.

La utilidad de los DEMs abarca una amplia gama de aplicaciones. En el ámbito de la ingeniería civil, se utilizan para el diseño de infraestructuras, análisis de visibilidad, cálculo de volúmenes de corte y relleno o simulaciones hidrológicas. En las ciencias de la Tierra, permiten estudiar procesos geomorfológicos, evaluar riesgos naturales o analizar cuencas hidrográficas. También son fundamentales en cartografía, planificación territorial, defensa, agricultura de precisión y, especialmente en este trabajo, en la gestión y evaluación de desastres naturales (Aguilar et al., 2013; Turner et al., 2014).

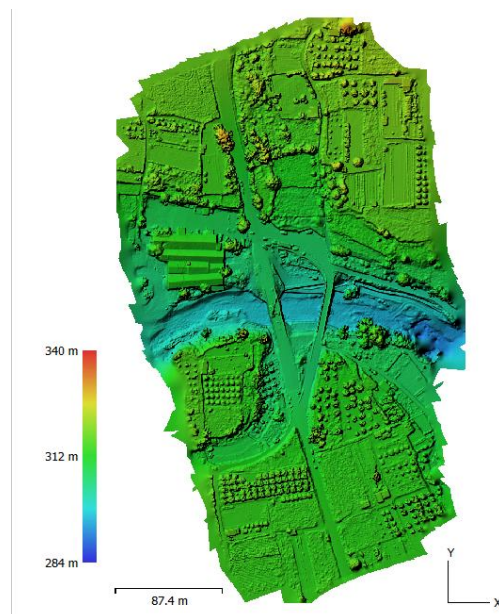


Figura 2: MDS de la zona de trabajo del TFM (Fuente: elaboración propia)

A lo largo del tiempo, los métodos para generar DEMs han evolucionado desde técnicas tradicionales hasta tecnologías de adquisición remota de alta resolución. Inicialmente, se obtenían mediante levantamientos topográficos con estaciones totales o receptores GNSS, o por fotogrametría clásica, utilizando imágenes aéreas estéreo para calcular elevaciones mediante correlación. También se recurría a la digitalización de curvas de nivel a partir de mapas topográficos en papel, interpolando después valores de elevación. Sin embargo, en las últimas décadas, tecnologías como el LiDAR (Light Detection And Ranging), especialmente en plataformas aerotransportadas, han permitido obtener nubes de puntos tridimensionales con precisión submétrica, a partir de las cuales se derivan tanto MDT como MDS de alta calidad (Sithole & Vosselman, 2004; Hodgson & Bresnahan, 2004).

En el contexto español, el Instituto Geográfico Nacional (IGN) es una fuente clave de datos geoespaciales oficiales. A través del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), se ofrece cobertura nacional periódica con ortofotos de alta resolución (25–50 cm), datos LiDAR con densidades superiores a 0.5 puntos/m² y Modelos Digitales del Terreno (MDT) con una resolución de 2×2 metros. Estos datos se actualizan cada tres a seis años, dependiendo del producto, y alcanzan una precisión vertical inferior a 20 cm (RMSEz < 0.20 m), lo cual los convierte en una referencia de alta fiabilidad para estudios geoespaciales (IGN-PNOA, 2022).

Para este TFM, el MDT del IGN se emplea como modelo base pre-evento frente al cual se comparan los modelos generados mediante vuelos con drones. Esta comparación es crítica, ya que permite identificar y cuantificar alteraciones topográficas debidas al evento bajo estudio mediante la técnica DEM of Difference (DoD). La existencia de una base de datos oficial, fiable y estandarizada como el MDT del IGN garantiza la validez de los resultados obtenidos, siempre que se tomen precauciones metodológicas frente a las diferencias de resolución, proyecciones o errores sistemáticos entre modelos.

Sin embargo, es importante considerar que los DEM generados por drones suelen tener una resolución mucho mayor (de nivel submétrico), lo que introduce desafíos técnicos cuando se comparan con modelos oficiales de malla más gruesa. La aplicación del método DoD implica una operación de resta celda a celda entre modelos de diferente precisión, y los errores espaciales y verticales deben ser gestionados adecuadamente mediante técnicas de remuestreo, propagación de errores y validación cruzada (Lane et al., 2003). Estos aspectos metodológicos serán abordados más adelante en este trabajo.

2.3. AVANCES EN FOTOGRAMETRÍA CON DRONES EN EMERGENCIAS.

La fotogrametría ha experimentado una gran transformación en la última década, impulsada por el avance de las tecnologías no tripuladas y la miniaturización de sensores. Tradicionalmente realizada desde plataformas aéreas tripuladas (aviones o helicópteros), esta técnica ha migrado hacia sistemas basados en vehículos aéreos no tripulados (UAV o drones), que ofrecen una solución más accesible, ágil y económica para la generación de modelos tridimensionales del terreno (Colomina & Molina, 2014).

Los drones permiten la captura sistemática de imágenes superpuestas desde distintos ángulos, que posteriormente son procesadas mediante software especializado para generar nubes de puntos, ortomosaicos y DEM de alta resolución (ver Figura 3). Esta metodología ha tenido una importante relevancia como una herramienta clave en contextos donde se requiere una respuesta rápida, como en emergencias naturales o situaciones post-desastre (Nex & Remondino, 2014).

En el marco de la gestión de emergencias, los UAV presentan ventajas significativas frente a métodos tradicionales. La rapidez en la recolección de datos permite obtener información geoespacial en cuestión de horas, frente a los días o semanas que pueden requerir otras metodologías. Además, reducen el riesgo para el personal, ya que evitan la exposición directa a entornos peligrosos o de difícil acceso. La alta resolución de los datos generados, su adaptabilidad a cualquier tipo de terreno y su capacidad para cubrir áreas amplias en poco tiempo convierten a los drones en una herramienta idónea para la evaluación de daños y la planificación de acciones de recuperación (Gonçalves & Henriques, 2015).

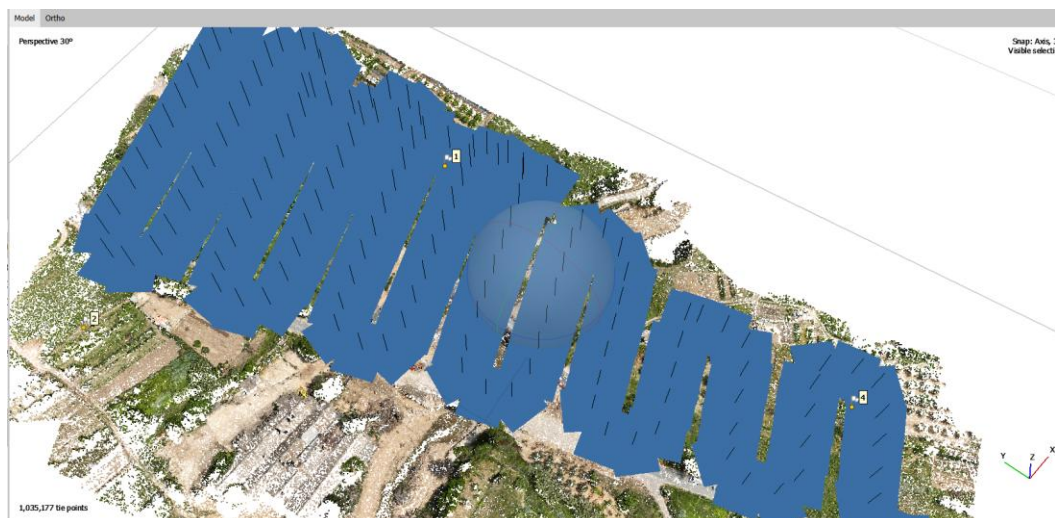


Figura 3: Recorrido de Dron sobre la zona de interés (Fuente: elaboración propia).

Este Trabajo Fin de Máster compara tres métodos alternativos para la generación del DEM post-evento, cada uno con distintas implicaciones en términos de precisión, velocidad de adquisición y requisitos logísticos:

- **Método I:** Uso exclusivo de metadatos del dron (GNSS e IMU). Este enfoque prescinde del uso de puntos de apoyo en tierra (GCPs), permitiendo generar modelos con gran rapidez directamente a partir de la información registrada por los sensores embarcados. Sin embargo, la precisión geométrica puede verse limitada por la calidad del receptor GNSS y del sistema de navegación inercial (IMU) integrado en el dron. En drones comerciales, la precisión horizontal puede oscilar entre 30 cm y varios metros, dependiendo del entorno, las condiciones de vuelo y la calidad del equipo (Turner et al., 2014).
- **Método II:** Uso de puntos de control en tierra (GCPs). Esta metodología garantiza la máxima precisión geométrica al anclar el modelo a coordenadas de alta exactitud obtenidas mediante receptores GNSS de calidad geodésica. No obstante, requiere trabajo de campo previo, lo cual puede ser inviable en contextos de emergencia debido a limitaciones de tiempo, acceso o seguridad (James et al., 2017).
- **Método III:** Uso de puntos de control aproximados a partir de datos geoespaciales existentes. Algunos estudios han validado el uso de datos LiDAR pre-existentes como fuente de puntos de apoyo (“LiDAR-derived control points”) para modelado fotogramétrico, sin necesidad de levantamiento de campo, lo cual resulta especialmente útil en contextos de emergencia (Habib et al., 2010). Otros trabajos han demostrado que las nubes de puntos LiDAR pueden servir como control eficaz en procesos fotogramétricos con drones (Wang et al., 2015). Asimismo, plataformas como ArcGIS Pro ofrecen funcionalidades para georreferenciar imágenes mediante capas base oficiales, como ortofotos o modelos digitales del terreno, lo que permite explorar flujos de trabajo sin puntos de apoyo en campo (Geospatial Training Services, 2023).

2.4. LA TÉCNICA DEM OF DIFFERENCE (DOD),

El análisis mediante Modelos Digitales de Elevación Diferenciales, más conocido como DoD, ha ganado una gran importancia como una herramienta clave en la detección y cuantificación de cambios topográficos a lo largo del tiempo. Su fundamento es relativamente sencillo: consiste en restar, celda por celda, las elevaciones de dos DEM generados en fechas distintas, permitiendo así identificar áreas de erosión, deposición o desplazamiento del terreno (Wheaton et al., 2010; James et al., 2012).

Este enfoque ha sido ampliamente aplicado en estudios de geomorfología fluvial, dinámica de laderas, volcanismo, y seguimiento de impactos por eventos extremos. La

técnica resulta especialmente útil cuando se requiere una cuantificación espacialmente distribuida de los volúmenes modificados, como sedimentos movilizados por avenidas torrenciales o aludes (Lane et al., 2003).

Sin embargo, la precisión de los resultados del DoD está directamente condicionada por la calidad de los DEM utilizados. Uno de los principales desafíos metodológicos es la propagación de errores, ya que los errores inherentes a cada DEM no se cancelan en la resta, sino que pueden acumularse y afectar significativamente la interpretación de los resultados (Brasington et al., 2003). Además, estos errores no suelen estar distribuidos de manera uniforme, sino que pueden estar espacialmente correlacionados, lo que complica su modelización estadística.

Para abordar estas limitaciones, diversos autores han propuesto técnicas de umbral estadístico para distinguir cambios reales del ruido del modelo. Entre ellas destaca el cálculo del nivel mínimo detectable de cambio (minimum level of detection, minLoD), que establece un umbral a partir del RMSE combinado de los dos modelos comparados (Wheaton et al., 2010). Estas metodologías han permitido transformar el DoD en una herramienta científicamente robusta para el análisis de cambios del terreno.

Más allá de su uso en investigaciones científicas, el DoD también ha comenzado a emplearse en contextos de gestión de emergencias, especialmente en la evaluación post-desastre. Algunos trabajos recientes han explorado su potencial para **priorizar** zonas de intervención, basándose en la magnitud de los cambios topográficos detectados tras eventos como inundaciones o deslizamientos (Lucieer et al., 2014; Clapuyt et al., 2016).

En este tipo de aplicaciones, las zonas con mayores valores absolutos en los modelos DoD pueden interpretarse como áreas de deposición masiva o excavación intensa, lo que permite orientar la planificación de tareas de rescate, limpieza o reconstrucción. Este enfoque representa una transición del análisis geomorfológico tradicional hacia una herramienta de inteligencia operativa al servicio de la respuesta a desastres.

Asimismo, el DoD también puede utilizarse como método de evaluación de calidad de los DEM generados, cuando se aplica en áreas donde no se espera que haya habido cambios entre dos fechas. La diferencia entre modelos en zonas estables puede interpretarse como una medida indirecta del error de los modelos, siempre que se maneje adecuadamente la incertidumbre asociada (James et al., 2017).

Por tanto, al emplear esta técnica, es indispensable considerar aspectos como:

- La resolución y origen de cada DEM (por ejemplo, diferencias entre modelos LiDAR oficiales y modelos fotogramétricos derivados de drones).
- Las condiciones de captura, que pueden introducir sesgos sistemáticos.

- La propagación de errores, especialmente al combinar fuentes heterogéneas.

La correcta gestión de estas fuentes de incertidumbre, a través de umbrales de detección y análisis de errores, es clave para asegurar que las diferencias detectadas sean significativas desde un punto de vista geomático y operativo.

2.5. INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES EN LA GESTIÓN DE CRISIS

En las últimas décadas, las tecnologías geoespaciales se han convertido en una herramienta esencial para la gestión del territorio, especialmente en situaciones de emergencia. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten organizar, analizar y visualizar datos georreferenciados, facilitando la toma de decisiones en contextos críticos. Su capacidad para integrar fuentes diversas —como imágenes satelitales, modelos digitales de elevación (DEM), ortofotos o datos LIDAR— ha hecho de estas plataformas un pilar en la respuesta, planificación y recuperación ante desastres (Goodchild & Glennon, 2010; Cutter, 2003).

Dentro del ecosistema de herramientas SIG, ArcGIS Pro es una de las plataformas más utilizadas en entornos profesionales y académicos. Su capacidad para trabajar en entornos 2D, y 3D, procesar grandes volúmenes de datos ráster y vectoriales, y automatizar flujos de trabajo mediante ModelBuilder o programación en lenguaje Python, la convierten en una solución versátil para el análisis geoespacial aplicado a emergencias (Esri, 2022).

La respuesta rápida es un factor determinante en la gestión de crisis. Una toma de decisiones eficiente y basada en datos puede marcar la diferencia entre minimizar daños o agravar una situación. En este contexto, los vehículos aéreos no tripulados (UAV o drones) han ganado protagonismo como herramienta de captura de información inmediata. Al proporcionar datos topográficos y visuales en tiempo casi real, permiten una evaluación rápida del terreno afectado, especialmente en zonas inaccesibles o peligrosas para el personal técnico (Gomez & Purdie, 2016).

Diversas investigaciones han destacado el potencial de integrar los datos capturados con drones en entornos SIG para construir sistemas operativos de gestión de crisis. Esta integración permite no solo visualizar el estado del terreno tras un evento extremo, sino también generar modelos de análisis, como mapas de acumulación de sedimentos, zonas de riesgo o rutas óptimas para búsqueda y rescate (Zhou et al., 2018; Tiede et al., 2016).

Por otra parte, la posibilidad de combinar datos oficiales preexistentes, como el MDT del Instituto Geográfico Nacional (IGN) o los productos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), con datos fotogramétricos recientes generados por drones, plantea un enfoque multifuente y multiresolución que enriquece la conciencia situacional. Esta convergencia es clave en estrategias de respuesta basada en evidencia, ya que permite detectar alteraciones topográficas relevantes, incluso en entornos complejos.

Además, la tendencia actual en la comunidad geomática apunta hacia el desarrollo de herramientas específicas de apoyo dentro del entorno SIG. Estas herramientas no solo agilizan tareas como la generación de puntos de control o la corrección geométrica, sino que también acercan la tecnología a usuarios no expertos, mejorando su adopción en contextos operativos reales. El desarrollo de rutinas personalizadas o cajas de herramientas, basadas en datos disponibles y procesos estandarizados, representa una contribución significativa a la eficiencia y repetibilidad de los análisis en emergencias.

En este sentido, la gestión efectiva de datos geoespaciales requiere también abordar aspectos como la interoperabilidad entre formatos y plataformas, así como el cumplimiento de normas de calidad y estandarización. La integración fluida de información geoespacial proveniente de diversas fuentes —satélite, dron, SIG, sensores en tiempo real— es uno de los retos centrales en la evolución hacia sistemas inteligentes de respuesta a emergencias (De Albuquerque et al., 2015).

2.6. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Este TFM se alinea con varios objetivos de desarrollo sostenible (ODS) a través de algunas metas específicas listadas a continuación:

9. Industria, Innovación e Infraestructura. Desarrollar infraestructuras resilientes y promover la industrialización inclusiva y sostenible.

9.a Facilitar el desarrollo de infraestructuras sostenibles en países en desarrollo.

11. Ciudades y Comunidades Sostenibles. Hacer que las ciudades y comunidades sean sostenibles y resilientes, con acceso a vivienda y servicios básicos.

11.5 Reducir significativamente el número de personas afectadas por desastres, incluidos desastres relacionados con el cambio climático.

13. Acción por el Clima. Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos en todo el planeta.

13.1 Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales.

13.2 Integrar las medidas contra el cambio climático en las políticas y estrategias nacionales.

13.3 Mejorar la educación, sensibilización y capacidad humana e institucional sobre la mitigación, adaptación y alerta temprana al cambio climático.

13.a Implementar los compromisos asumidos por los países desarrollados en el Acuerdo de París.

13.b Promover mecanismos para elevar la capacidad de planificación y gestión climática en los países en desarrollo, especialmente los más vulnerables.

CAPITULO 3. METODOLOGIA

3.1. INSTRUMENTOS Y SOFTWARE UTILIZADOS

3.1.1. DJI MAVIC 3E (ENTERPRISE)

El DJI Mavic 3E (Figura 4) es un dron multirrotor plegable y compacto, diseñado para aplicaciones profesionales como cartografía, topografía e inspección. Está equipado con una cámara de 20 MP con sensor 4/3 CMOS y obturador mecánico, lo que permite capturas sin distorsiones en las imágenes y mejora la precisión en la georreferenciación. Cuenta con un sistema de navegación GNSS y módulo RTK que permite posicionamiento centimétrico, además de sensores omnidireccionales y tecnología AirSense para evitar colisiones. Su autonomía alcanza los 45 minutos, puede alcanzar hasta 75.6 km/h, y se opera mediante un control remoto con pantalla integrada, sistema Android, conectividad Wi-Fi y software de planificación DJI Pilot 2, permitiendo misiones automatizadas de alta precisión (DJI, 2023).



Figura 4: Dron DJI Mavic 3E (DJI,2023)

3.1.2. GNSS TRIMBLE R12

El Trimble R12 (Figura 5) es un receptor GNSS multiconstelación de alto rendimiento, diseñado para aplicaciones topográficas, geodésicas y de ingeniería que requieren precisión centimétrica incluso en entornos con obstrucciones como áreas urbanas densas o boscosas. Incorpora la tecnología Trimble ProPoint™, que mejora la disponibilidad y calidad de las señales GNSS frente a métodos RTK tradicionales, y la tecnología TIP™ (Tilt Compensation), que permite realizar mediciones con el bastón inclinado sin perder precisión, gracias a una unidad inercial integrada. El dispositivo admite señales de GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou y QZSS, con hasta 672 canales,

y ofrece una precisión de ± 8 mm en horizontal y ± 15 mm en vertical. Además, cuenta con conectividad Bluetooth, Wi-Fi, USB y puerto serie, 6 GB de memoria interna, y una batería con autonomía de hasta 9 horas. Su compatibilidad con software como Trimble Access y Trimble Business Center, junto con su resistencia certificada IP67, lo convierten en una solución robusta y eficiente para trabajos de campo exigentes (Trimble, 2022).



Figura 5: Imagen de GNSS TRIMBLE R12 (Trimble, 2022).

3.1.3. RECEPTOR LEICA ZENO FLX100

El Leica Zeno FLX100 (Figura 6) es un receptor GNSS portátil y ligero, diseñado para recolectar datos espaciales de alta precisión desde dispositivos móviles. Compatible con constelaciones GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou y QZSS, permite alcanzar precisión submétrica o centimétrica al conectarse a servicios RTK. Se vincula vía Bluetooth con smartphones o tablets y se integra con aplicaciones como Zeno Mobile y Collector for ArcGIS. Ofrece hasta 10 horas de autonomía, cuenta con certificación IP67 contra polvo y agua, y es ideal para tareas de recolección SIG en campo, catastro, gestión ambiental y servicios públicos (Leica Geosystems, 2021).

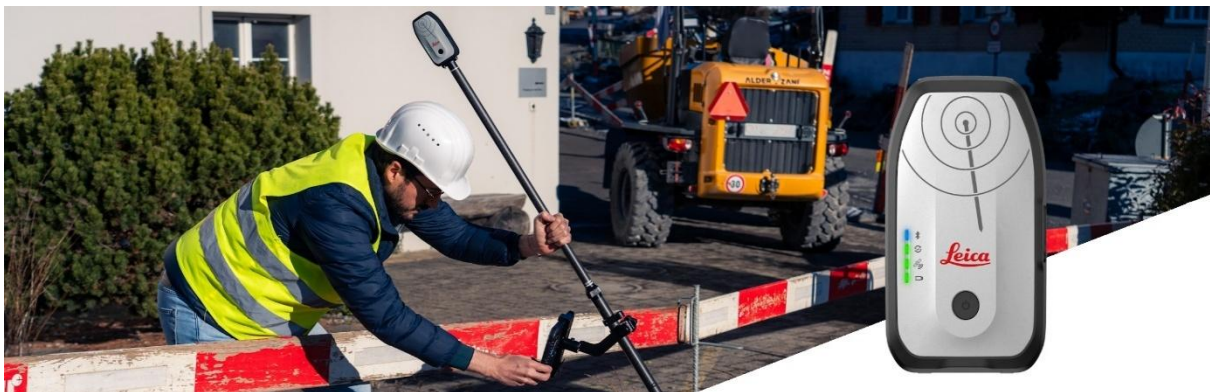


Figura 6: Equipo Leica Zeno FLX100 (Leica Geosystems, 2021).

3.1.4. AGISOFT METASHAPE PROFESSIONAL

Agisoft Metashape Professional es un software especializado en fotogrametría que permite reconstrucción 3D precisa a partir de imágenes o escaneos láser. La versión 2.1.3 permite procesar datos multiespectrales, térmicos y RGB, generar modelos 3D, ortomosaicos, nubes de puntos y modelos digitales del terreno (DTM/DSM), además de integrarse con datos GNSS para georreferenciación precisa. Soporta flujos de trabajo automatizados mediante programación en lenguaje Python y procesamiento acelerado por GPU. Su versatilidad lo hace adecuado para aplicaciones en cartografía, arqueología, minería, topografía y gestión del territorio (Agisoft, 2023).

3.1.5. ARGIS PRO 2.5.0

ArcGIS Pro 2.5, lanzado en febrero de 2020 por ESRI (Environmental Systems Research Institute), es una aplicación profesional de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que combina visualización, análisis, modelado y gestión de datos geoespaciales en 2D y 3D dentro de una interfaz moderna y unificada. Como evolución de ArcMap, incorpora edición avanzada de datos espaciales —incluyendo topología, georreferenciación y redes—, automatización de flujos de trabajo con Python (ArcPy) y ModelBuilder, más de 900 herramientas de análisis y geoprocesamiento, integración con ArcGIS Online y Enterprise para compartir y publicar mapas en la nube, compatibilidad con múltiples formatos y bases de datos geoespaciales, y opciones de exportación como impresión, informes, animaciones y publicación web, todo optimizado para aprovechar CPU y GPU en el rendimiento y renderizado (Esri, 2020).

3.2. FUENTES DE DATOS GEOESPACIALES

En el presente TFM se han utilizado algunos conjuntos de datos proporcionados por organismos oficiales (Tabla 1). Estos datos se utilizan para (i) definir el estado del terreno previo al evento cuyo efecto se determinará usando la técnica DoD y (ii) extraer puntos de apoyo aproximados.

El estado posterior al evento se determina mediante fotogrametría tal y como se describe en los Apartados 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7.

Tabla 1: Características y Fuentes de Datos Geoespaciales Utilizados (Fuente: elaboración propia).

Dato Geoespacial	Procedencia	Fecha de Adquisición	Resolución/Paso de Malla	Precisión	Rol en el TFM
MDT oficial del IGN “MDT02-ETRS89-HU30-0721-3-COB2.tif”	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	segunda cobertura (2015–2021)	2×2	(RMSEz/RMSE X,Y) < 0.20m, <30m	Línea base para la aplicación de la técnica DoD.
Ortofotografía PNOA PNOA_MA_OF_ETRS89_HU30_h25_0721_3	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	segunda cobertura (2015–2021)	25/50cm	RMSE X,Y ≤ 0.50m (para 25cm)	Fuente para la extracción de puntos de control aproximados.
Nube de puntos LiDAR PNOA	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	segunda cobertura (2015–2021)	0.5 puntos/m ² (densidad media)	RMSEz < 0.20m	Fuente para la extracción de puntos de control aproximados.

3.2.1. MODELO DIGITAL DEL TERRENO MDT02 (PNOA-LIDAR)

El MDT de la zona de estudio está disponible en el archivo MDT02-ETRS89-HU30-0721-3-COB2.TIF (Figura 7), obtenido del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea – LiDAR (PNOA-LiDAR), correspondiente a la segunda cobertura (2015–2021). El modelo presenta una resolución espacial de 2×2m, referenciado en el sistema ETRS89/UTM y con altitudes ortométricas derivadas del geoide EGM08. Según las especificaciones técnicas del PNOA-LiDAR, la precisión altimétrica estándar es de $RMSE\ Z \leq 0,25\ m$, mientras que la precisión planimétrica estimada es de $RMSE\ X,Y \leq 0,50\ m$. Estos datos fueron proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional de España (IGN) y se obtuvieron a través del Centro de Descargas del CNIG (IGN, 2021).



Figura 7: Archivo MDT02-ETRS89-HU30-0721-3-COB2.TIF con la zona de estudio marcada en el norte (IGN,2021).

3.2.2. ORTOFOTOGRAFIA PNOA

La ortofotografía constituye un producto cartográfico obtenido a partir de fotografías aéreas corregidas geométricamente para eliminar los efectos de inclinación de la cámara y las distorsiones del terreno. A diferencia de una imagen aérea convencional, la ortofoto presenta propiedades métricas, lo que permite realizar mediciones precisas de distancias, superficies y localizaciones en coordenadas reales.

En el caso de España, las ortofotografías empleadas en este Trabajo Fin de Máster provienen del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), coordinado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). El PNOA constituye una de las principales iniciativas del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT) y tiene como objetivo la generación sistemática de ortofotos digitales de alta resolución que cubren la totalidad del territorio español.

Las ortofotografías del PNOA se actualizan periódicamente, con una frecuencia de entre 2 y 3 años según la zona, y se distribuyen en formatos ráster georreferenciados (habitualmente GeoTIFF o ECW). Su resolución espacial estándar es de 25 cm/píxel, si bien en determinadas áreas se alcanza hasta 15 cm/píxel, con una precisión planimétrica mejor o igual a $\pm 0,5$ m. Estas ortofotografías están georreferenciadas al sistema oficial de referencia en España, ETRS89 (EPSG:25830, proyección UTM huso 30N), lo que garantiza su compatibilidad con otros datos geoespaciales oficiales (IGN 2024).

En el contexto de este TFM, la ortofotografía PNOA (Figura 8) cumple como una fuente de puntos de apoyo aproximados permitiendo la transferencia de coordenadas de referencia a modelos fotogramétricos generados con drones, sin necesidad de realizar un levantamiento topográfico de campo. Además, constituye una capa base

cartográfica oficial, lo que asegura la coherencia con otros productos geoespaciales del IGN, como el MDT02 derivado de LiDAR. En definitiva, la ortofotografía PNOA aporta un soporte para garantizar la calidad geométrica y la fiabilidad del análisis realizado.

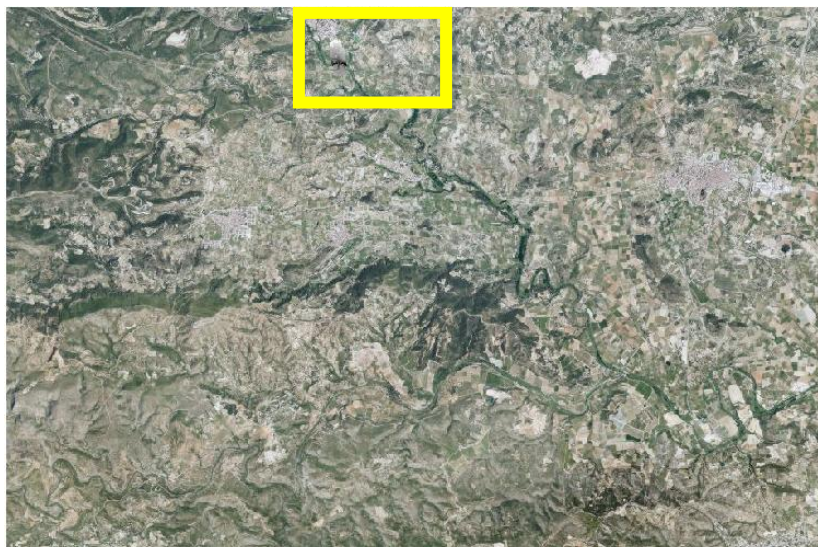


Figura 8: Archivo PNOA_MA_OF_ETRS89_HU30_h25_0721_3 con la zona de estudio marcada en el norte (IGN, 2015-2021).

3.2.2. NUBE DE PUNTOS LiDAR PNOA

El **LiDAR (Light Detection and Ranging)** es una tecnología de teledetección activa que emplea pulsos láser para medir distancias desde una plataforma aérea, generando un conjunto masivo de puntos tridimensionales conocido como nube de puntos. Estos puntos recogen información precisa de la superficie terrestre y de los objetos presentes en ella (vegetación, edificaciones, infraestructuras), lo que permite derivar productos cartográficos como Modelos Digitales del Terreno (MDT) y Modelos Digitales de Superficie (MDS) de alta resolución.

En España, los datos LiDAR son proporcionados por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA-LiDAR), coordinado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT). El proyecto se inició en 2008 y ha desarrollado varias coberturas sucesivas de todo el territorio nacional. En este TFM se ha utilizado la segunda cobertura LiDAR (2015–2021), descargada en formato .las a través del Centro de Descargas del CNIG, correspondiente al área de estudio seleccionada.

Las características técnicas de esta cobertura incluyen una densidad media de 0,5 puntos/m², con coordenadas de cada punto referidas al sistema oficial ETRS89 (EPSG:25830, UTM huso 30N) y altitudes ortométricas referidas al EGM08-REDNAP.

La precisión vertical declarada es de $RMSE_z < 0,20$ m, lo que convierte este producto en una fuente altamente fiable para la generación de modelos de referencia.

Dentro de este TFM, la nube de puntos LiDAR PNOA cumple un papel esencial como fuente de puntos de apoyo aproximados, ya que permite extraer coordenadas planimétricas (X, Y) y, de manera muy relevante, altimétricas (Z). Esta capacidad resulta clave en contextos de emergencia, donde la realización de un levantamiento de campo puede ser inviable por limitaciones de tiempo, recursos o seguridad.

3.3. RECOLECCION DE DATOS DE CAMPO

3.3.1. ZONA DE ESTUDIO

El levantamiento de la zona de estudio (Figura 9) consistió en un vuelo fotogramétrico (ver Apartado 3.3.2) realizado por la empresa PAVASAL para la restauración de la carretera CV-35 a su paso por el Río Buñol. La autora del presente TFM participó en dicho levantamiento mientras realizaba prácticas de empresa en PAVASAL.

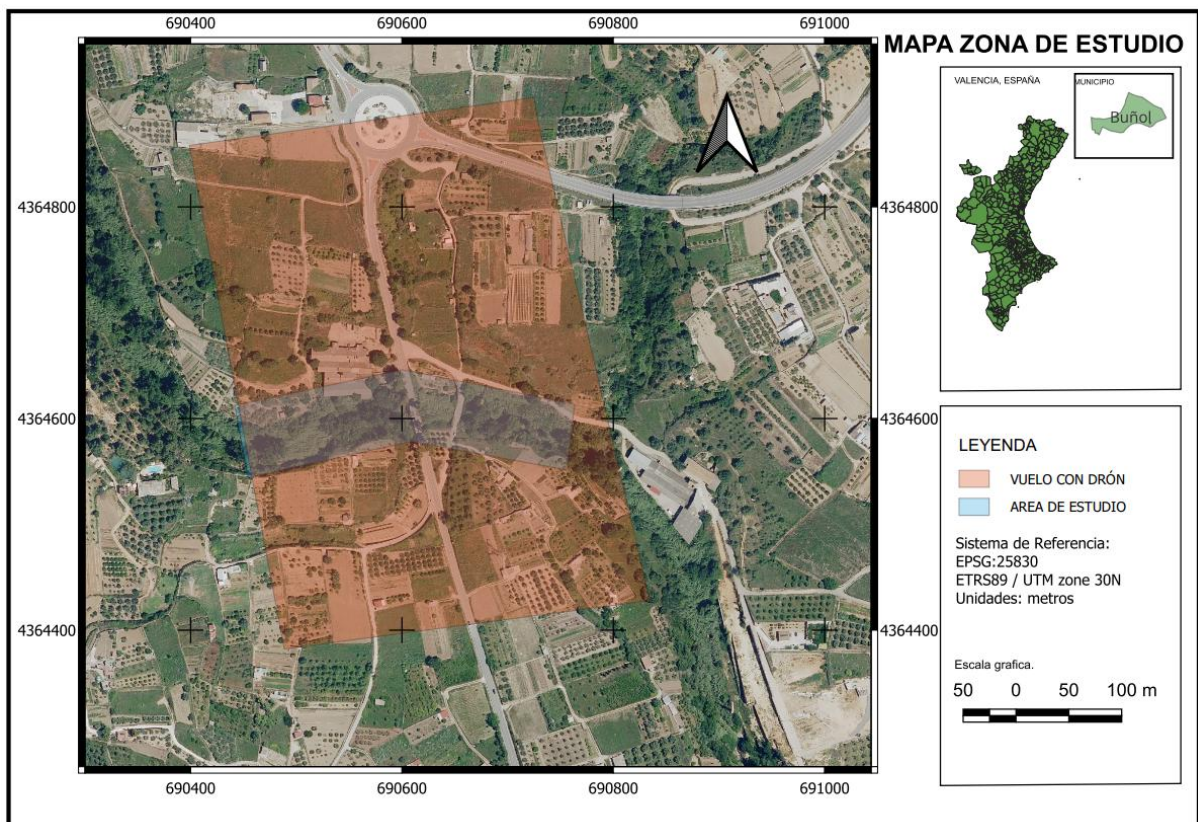


Figura 9: Mapa zona de estudio (Fuente: elaboración propia).

3.3.2. VUELO FOTOGRAMETRICO

La adquisición de datos se realizó mediante un vuelo fotogramétrico utilizando un dron DJI Mavic 3E (Enterprise), equipo que ya ha sido descrito en la Sección 3.1.1. El vuelo se planificó a una altura de 50 m sobre el terreno, con un solape longitudinal y transversal del 60%, garantizando la superposición necesaria para el posterior procesamiento mediante la técnica Structure from Motion (SfM). En la Figura 10 podemos observar la ruta del vuelo fotogramétrico en el entorno de trabajo de Agisoft Metashape.

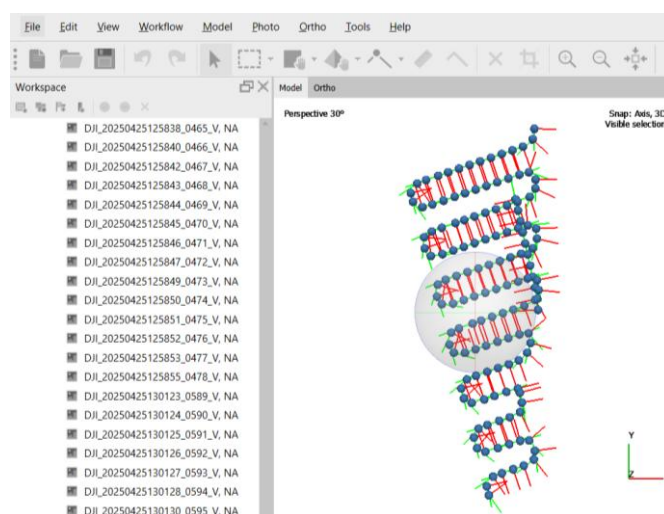


Figura 10: Ruta del vuelo fotogramétrico (Fuente: elaboración propia).

Las imágenes capturadas contienen metadatos GNSS e IMU, esenciales para los procesos de georreferenciación. Las especificaciones técnicas de las imágenes se muestran en la Figura 11:

DJI_20250425125601_0351_V	
Property	Value
Frame 1	
Path	C:/TRABAJO_FIN_MASTER/FOTOS/Buñol Orto/DJI_...
Resolution	5280x3956
Colors	3 bands, uint8
Date & time	2025:04:25 12:56:01
Model	M3E
Focal length	12.29
F-stop	F/2.8
ISO	100
Shutter	1/2000
35mm focal	24

Figura 11: Metadatos de Fotogramas (Fuente: elaboración propia).

En total, se obtuvieron 150 imágenes en formato JPEG, que cubren un área aproximada de 450 m de ancho por 260 m de largo. Este conjunto de datos constituye la base común para los tres métodos de generación de Modelos Digitales del Terreno (MDT) post_eventos desarrollados en este trabajo.

Asimismo, se tomaron 4 puntos de apoyo (Tabla 2) con la finalidad de desarrollar el Método II: Que requiere el uso de puntos de control en tierra (GCPs). Los puntos de apoyo se tomaron con el receptor Leica Zeno FLX100 descrito en la Sección 3.1.3.

Tabla 2: Fichero con coordenadas de puntos GCPs (Fuente: Elaboración propia).

Número	Latitud	Longitud	Altitud	X	Y	Z
0001	39.4106406	-0.78496476	368.476	690699.495	4364688.33	317.410
0002	39.4113435	-0.78689850	367.738	690531.083	4364762.26	316.663
0003	39.4084951	-0.78656083	365.242	690567.915	4364446.82	314.173
0004	39.4086008	-0.78490436	364.634	690710.256	4364462.05	313.572

3.4. PROCESO FOTOGRAMETRICO

El procesamiento de los datos se llevó a cabo en el software Agisoft Metashape Profesional (versión 1.7), siguiendo un flujo de trabajo estándar de fotogrametría con la técnica Structure-from-Motion (SfM) para la reconstrucción tridimensional (Eltner & Sofia, 2020). Esta técnica permite estimar la geometría 3D a partir de múltiples imágenes 2D superpuestas, combinando algoritmos de correlación y ajuste fotogramétrico.

A partir del conjunto de 250 imágenes obtenidas durante el vuelo fotogramétrico, se seleccionaron cuidadosamente 150 imágenes correspondientes exclusivamente al área de estudio delimitada. Esta depuración tuvo como objetivo optimizar el rendimiento del software, reduciendo el tiempo de cálculo sin comprometer la cobertura necesaria para la reconstrucción tridimensional.

3.4.1 ALINEACION DE FOTOGRAFIAS

La alineación de imágenes se ejecutó con los siguientes parámetros: precisión Alta, un límite de 40.000 puntos clave y sin restricción de puntos de enlace, para maximizar las coincidencias entre imágenes y mejorar la geometría inicial. Se activó la preselección genérica y por referencia para optimizar el emparejamiento y reducir tiempos de procesamiento.

Esta fase permitió obtener una nube de puntos dispersa (*Sparse Point Cloud*) como se aprecia en la Figura 12. La nube de puntos dispersa representa la geometría general del área y constituye la base para los pasos posteriores de densificación y modelado.

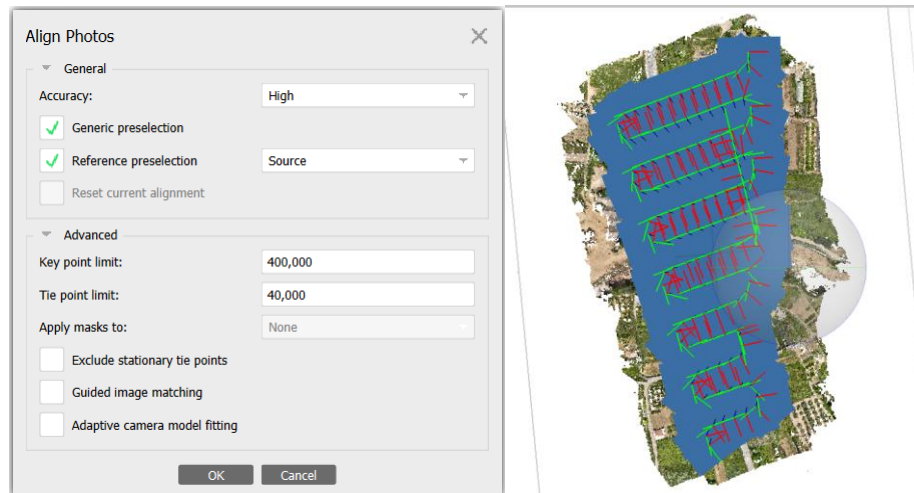


Figura 12: Configuración: alineación de los fotogramas (Fuente: elaboración propia).

3.4.2 CALIBRACION DE CAMARA

Una vez finalizada la alineación, se realizó la calibración interna de la cámara, activando todos los parámetros relevantes: distorsión radial (k_1 – k_4), distorsión tangencial (p_1 – p_2), desplazamientos principales (c_x , c_y) y coeficientes afines (b_1 – b_2). Este ajuste permite corregir imperfecciones ópticas y mejorar la correspondencia geométrica entre imágenes.

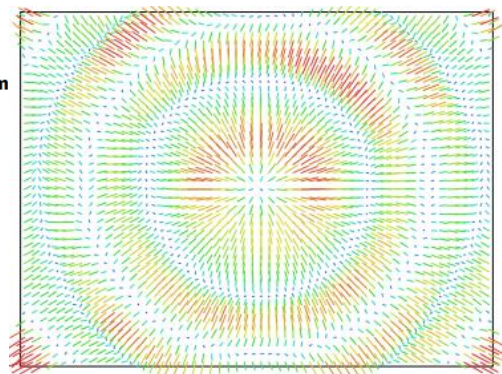
Posteriormente, mediante la herramienta “Optimize Cameras”, se refinaron simultáneamente los parámetros de cámara y la geometría del bloque fotogramétrico, reduciendo el error de proyección y aumentando la precisión general del modelo (ver Figura 13).

M3E (12.29mm)

140 images, precalibrated

Type Resolution Focal Length Pixel Size
Frame 5280 x 3956 12.29 mm 3.36 x 3.36 μ m

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3622.46	1.7	1.00	-0.96	-0.23	-0.95	0.62	-0.95	0.92	0.08
Cx	9.542	0.044		1.00	0.23	0.92	-0.60	0.91	-0.92	-0.08
Cy	-8.91205	0.011			1.00	0.23	-0.15	0.22	-0.22	-0.38
K1	-0.110684	0.00011				1.00	-0.71	0.89	-0.95	-0.11
K2	0.00946692	2.8e-05					1.00	-0.77	0.62	0.07
K3	-0.0189485	5.5e-05						1.00	-0.85	-0.07
P1	-0.000115254	1.6e-06							1.00	0.10
P2	-0.000114215	4.3e-07								1.00



a)

b)

Figura 13: Calibración de la cámara: a) Coeficientes de calibración, b) Distorsión radial (Fuente: elaboración propia).

3.4.3 NUBE DE PUNTOS

A partir de la nube de puntos dispersa, se procedió a generar la nube de puntos densa (Dense Point Cloud), que constituye una representación tridimensional de alta resolución del área de estudio. Este proceso en Agisoft Metashape se basa en la estimación de la profundidad para cada píxel de las imágenes alineadas, calculando para cada cámara un mapa de profundidad que posteriormente se fusiona para obtener un único modelo denso.

La generación de la nube densa se configuró en Quality: High con el fin de maximizar el detalle geométrico sin comprometer en exceso los tiempos de procesamiento. Se estableció el parámetro Depth Filtering: Aggressive para eliminar correspondencias erróneas o puntos espurios generados en áreas con vegetación densa o superficies de baja textura. Además, se activaron las opciones Calculate Point Colors y Calculate Point Confidence para incorporar información cromática y un índice de fiabilidad de cada punto, lo que facilita etapas posteriores de clasificación y filtrado.

En la Figura 14 se puede apreciar el cuadro de diálogo con todos los parámetros de configuración para crear la nube de puntos.

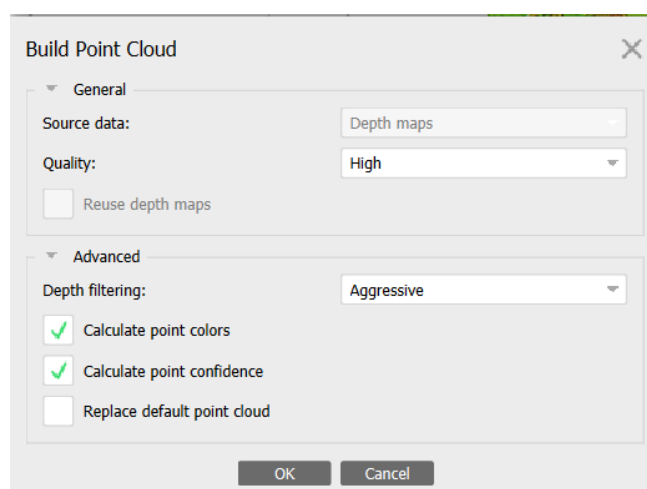


Figura 14: Parámetros de configuración para nube de puntos (Fuente: elaboración propia).

Para la creación del MDE mediante la opción de nube de puntos densa, es esencial verificar la calidad de los datos obtenidos, para ello es fundamental verificar el nivel de confianza de todos los puntos para asegurar que son datos fiables y con precisión para obtener el mejor modelo. Por ello se deben eliminar los puntos con una baja fiabilidad y mantener solo los puntos que sean aptos para la construcción del MDE.

En la Figura 15 Se puede apreciar las características del nivel de confianza que resulta de nuestra nube de puntos.

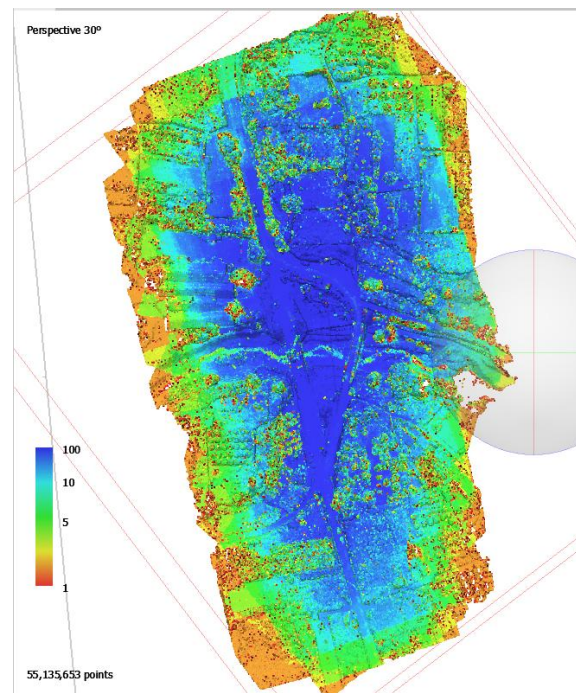


Figura 15: Nivel de confianza de nube de puntos (Fuente: elaboración propia).

La figura 15 también muestra que en la zona de interés para la aplicación de la técnica DoD los niveles de confianza de los puntos reconstruidos es en general alta lo cual nos indica la necesidad de realizar un filtro de confianza con el objetivo de mejorar la calidad del MDT final. Esta etapa permite evaluar la fiabilidad de cada punto reconstruido y descartar aquellos que presentan un nivel de confianza bajo, los cuales suelen corresponder a errores de correlación, ruido o interferencias en la reconstrucción fotogramétrica

3.4.4 LIMPIEZA DE NUBE LA DE PUNTOS

La limpieza de la nube de puntos requiere aplicar un proceso de filtrado. En este caso se aplica el índice de confianza en Agisoft Metashape que es un parámetro utilizado para evaluar la calidad tanto de los puntos generados como de las mediciones asociadas a la cámara. Este índice representa la probabilidad de que un punto o una medición sean correctos y se expresa en una escala que va de 0 a 100, donde valores cercanos a 100 indican un alto nivel de fiabilidad y valores próximos a 0 reflejan una baja confianza en la reconstrucción. En la Figura 16 se observa el índice de confianza aplicado a la nube de puntos densa.

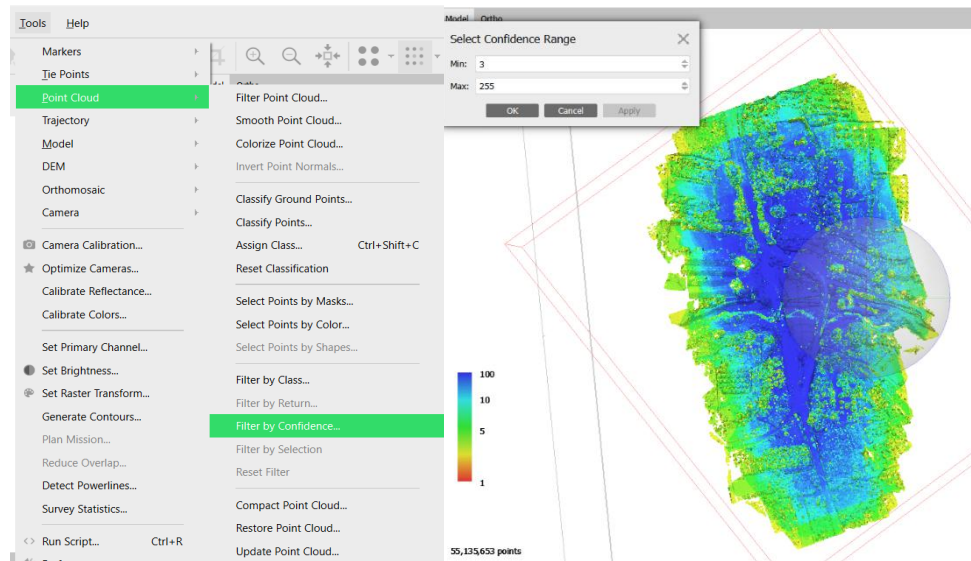


Figura 16: Aplicación de filtro de índice de confianza mayor a 3 (Fuente: elaboración propia).

3.4.5 CLASIFICACION DE NUBE DE PUNTOS

Tras generar la nube de puntos densa, se realizó su clasificación automática mediante la herramienta *Classify Ground Points* de Metashape, con el objetivo de diferenciar el terreno de otros elementos como vegetación densa, edificaciones y estructuras artificiales. La zona de estudio presentaba una cobertura vegetal considerable, por lo que este paso fue esencial para asegurar que el MDT posterior representara únicamente la superficie del terreno desnudo. La figura 17 contiene los parámetros utilizados para una buena clasificación y el resultado de la clasificación en la nube de puntos.



Figura 17: a) Parámetros de clasificación de nube de puntos. B) Clasificación de nube de puntos por la clase Ground (Fuente: elaboración propia).

3.4.6 CREACIÓN DEL MDT

Una vez clasificada la nube de puntos densa, se procedió a la generación del Modelo Digital del Terreno (MDT). En Agisoft Metashape, esta etapa consiste en interpolar los puntos clasificados como *ground* (terreno) para crear una superficie continua que represente el relieve desnudo, excluyendo elementos como vegetación, edificaciones u otras estructuras.

En la Figura 18 se observa la configuración para obtener un modelo digital de terreno.

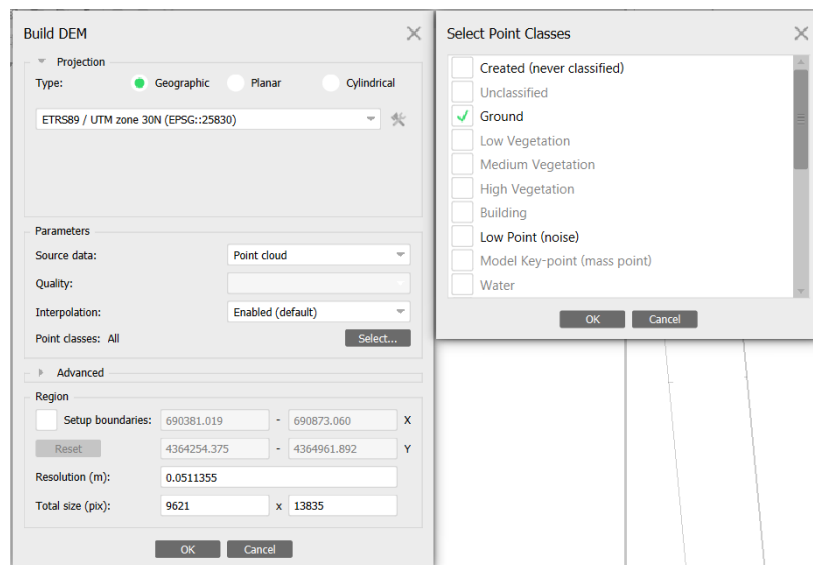


Figura 18: Configuración para obtención de un MDT (Fuente: elaboración propia).

Un aspecto crítico antes de generar el MDT es la definición del tamaño de celda (*cell size*) y la extensión (*extent*) del conjunto de datos ráster. Puesto que el objetivo posterior es realizar un análisis DoD (DEM of Difference) frente al MDT oficial pre-evento del IGN, es fundamental que ambos modelos estén debidamente alineados para garantizar la perfecta superposición de las celdas y evitar sesgos o errores derivados del remuestreo que sería necesario para compatibilizar los dos DEM.

El MDT oficial del IGN, obtenido del PNOA LiDAR, presenta una malla regular de 2x2 metros; por ello, en la ventana de configuración de *Build DEM* se definió este valor como resolución de salida para el modelo generado. Asimismo, se asignó una extensión con coordenadas múltiplos de 2m, esta homogeneidad en el tamaño de celda y extensión asegura que la resta píxel a píxel en el análisis DoD se base en superficies equivalentes y que cualquier diferencia detectada responda a cambios reales en la topografía, y no a variaciones en el muestreo espacial. En la Figura 19 Se observa los parámetros de configuración para la exportación del MDT.

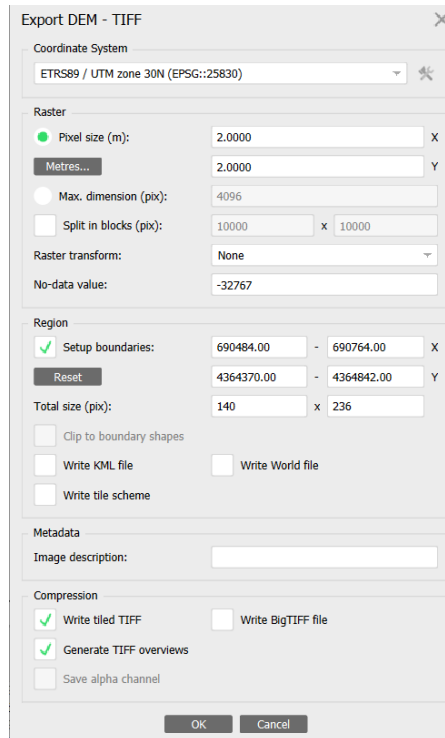


Figura 19: Configuración de parámetros para exportar un MDT (Fuente: elaboración propia).

3.5. METODO I: USO EXCLUSIVO DE METADATOS DEL DRON (GNSS e IMU)

Este procedimiento busca generar un Modelo Digital del Terreno (MDT) post-evento empleando exclusivamente los metadatos de posicionamiento y orientación proporcionados por los sensores GNSS e IMU integrados en el dron DJI Mavic 3E. Al no incluir puntos de apoyo en tierra (GCPs), el flujo de trabajo se optimiza en tiempo, lo que es especialmente relevante en escenarios de respuesta rápida ante emergencias.

3.5.1 GEOREFERENCIACIÓN

La georeferenciación inicial se realizó a partir de las coordenadas GNSS datos inerciales registrados automáticamente en los metadatos EXIF y XMP de cada imagen durante el vuelo. Esta información se obtiene internamente desde el software fotogramétrico para realizar el proceso, aunque el usuario no tiene acceso a la misma. Sin embargo, es posible acceder a los metadatos mediante otros mecanismos, por ejemplo, usando la función `GetImageEXIFProperties()` del módulo `arcpy`.

La Figura 20 muestra los metadatos (incluyendo coordenadas y parámetros inerciales) de uno de los fotogramas del vuelo que se utilizan en la caja de herramientas de ArcGIS Pro (Apartado 3.10). Estos datos se utilizan para asistir al usuario en la obtención de puntos de apoyo aproximados.

```
import arcpy

exif = arcpy.GetImageEXIFProperties(r"C:\TRABAJO_FIN_MASTER\FOTOS\Bañol Orto\DJII_202504251242_033_250425Bañol\DJII_20250425125712_0400_V.JPG")
print(exif)

[-0.785741222222222, 39.4099047777777, 457.505, {'width': 5280, 'height': 3956, 'planes': 3, 'EXIF_KIND': 'IMAGE', 'EXIF_BAND_COUNT': 3,
'EXIF_HAS_TABLE': False, 'EXIF_HAS_XFORM': False, 'EXIF_DateTimeOriginal': '2025:04:25 12:57:12', 'EXIF_FocalLength': 12.29,
'EXIF_FocalLengthIn35mmFilm': 24.0, 'EXIF_PixelXDimension': 5280, 'EXIF_PixelYDimension': 3956, 'EXIF_Model': 'M3E', 'EXIF_Make': 'DJI',
'EXIF_Orientation': '1', 'XMP:rd:about': 'DJI Meta Data', 'XMP:xmlns:tiff': 'http://ns.adobe.com/tiff/1.0/', 'XMP:xmlns:exif':
'http://ns.adobe.com/exif/1.0/', 'XMP:xmlns:xmp': 'http://ns.adobe.com/xap/1.0/', 'XMP:xmlns:xmpMM': 'http://ns.adobe.com/xap/1.0/mm/',
'XMP:xmlns:dc': 'http://purl.org/dc/elements/1.1/', 'XMP:xmlns:crs': 'http://ns.adobe.com/camera-raw-settings/1.0/', 'XMP:xmlns:drone-dji':
'http://www.dji.com/drone-dji/1.0/', 'XMP:xmlns:GPano': 'http://ns.google.com/photos/1.0/panorama/', 'XMP:xmlns:camera':
'http://pix4d.com/camera/1.0/', 'XMP:xmp:ModifyDate': '2025-04-25T12:57:12+02:00', 'XMP:xmp:CreateDate': '2025-04-25T12:57:12+02:00', 'XMP:tiff:Make':
'DJI', 'XMP:tiff:Model': 'M3E', 'XMP:dc:format': 'image/jpeg', 'XMP:drone-dji:Version': '1.6', 'XMP:drone-dji:ImageSource': 'WideCamera', 'XMP:drone-
dji:GpsStatus': 'RTK', 'XMP:drone-dji:AltitudeType': 'RtkAlt', 'XMP:drone-dji:GpsLatitude': '+39.409904779', 'XMP:drone-dji:GpsLongitude':
'-0.785741241', 'XMP:drone-dji:AbsoluteAltitude': '+457.505', 'XMP:drone-dji:RelativeAltitude': '+69.988', 'XMP:drone-dji:GimbalRollDegree': '+0.00',
'XMP:drone-dji:GimbalYawDegree': '+71.20', 'XMP:drone-dji:GimbalPitchDegree': '-89.90', 'XMP:drone-dji:FlightRollDegree': '+3.80', 'XMP:drone-
dji:FlightYawDegree': '+70.90', 'XMP:drone-dji:FlightPitchDegree': '-9.20', 'XMP:drone-dji:FlightXSpeed': '3.2', 'XMP:drone-dji:FlightYSpeed': '9.4',
'XMP:drone-dji:FlightZSpeed': '0.0', 'XMP:drone-dji:CamReverse': '0', 'XMP:drone-dji:GimbalReverse': '0', 'XMP:drone-dji:SelfData': '', 'XMP:drone-
dji:RtkFlag': '50', 'XMP:drone-dji:RtkStdLon': '0.01285', 'XMP:drone-dji:RtkStdLat': '0.01378', 'XMP:drone-dji:RtkStdHgt': '0.02718', 'XMP:drone-
dji:RtkDiffAge': '1.00000', 'XMP:drone-dji:SurveyingMode': '1', 'XMP:drone-dji:DewarpFlag': '0', 'XMP:drone-dji:DewarpData':
'2022-06-08;3713.290000000000,3713.290000000000,7.020000000000,-8.720000000000,-0.112575240000,0.014874430000,-0.000085720000,0.00000100000,-0.02706
410000', 'XMP:drone-dji:CalibratedFocalLength': '3725.151611', 'XMP:drone-dji:CalibratedOpticalCenterX': '2640.000000', 'XMP:drone-
dji:CalibratedOpticalCenterY': '1978.000000', 'XMP:drone-dji:UTCAExposure': '2025-04-25T10:57:32.799545', 'XMP:drone-dji:ShutterType': 'Mechanical',
'XMP:drone-dji:ShutterCount': '13137', 'XMP:drone-dji:FocusDistance': '15371', 'XMP:drone-dji:CameraSerialNumber': '4930LC14AB0LZ5', 'XMP:drone-
dji:DroneModel': 'M3E', 'XMP:drone-dji:DroneSerialNumber': '1581F5FHC248800E7JZ4', 'XMP:drone-dji:LRFStatus': 'Normal', 'XMP:drone-
dji:LRFTargetDistance': '0.000', 'XMP:drone-dji:LRFTargetLon': '0.000000', 'XMP:drone-dji:LRFTargetLat': '0.000000', 'XMP:drone-dji:LRFTargetAlt':
'0.000', 'XMP:drone-dji:LRFTargetAbsAlt': '0.000', 'XMP:drone-dji:PictureQuality': '90', 'XMP:crs:Version': '7.0', 'XMP:crs:HasSettings': 'False',
'XMP:crs:HasCrop': 'False', 'XMP:crs:AlreadyApplied': 'False'}}]
```

Figura 20: Metadatos del Fotograma 400 (Fuente: elaboración propia).

Estos parámetros, en combinación con la calibración de las cámaras, sirvieron para establecer la georreferenciación inicial. Los metadatos EXIF Y XMP proporcionan coordenadas geográficas en el sistema de referencia WGS84 (EPSG:4326). Es importante señalar que para mantener la coherencia entre sistemas de coordenadas es necesario realizar un cambio de proyección en el entorno de trabajo de Agisoft Metashape. Este cálculo está implementado en la herramienta “convert” dentro de la sección Reference. Lógicamente, este proceso no modifica la posición de los puntos, sino que convierte las coordenadas geográficas WGS84 originales registradas al sistema de referencia definido para el proyecto, en este caso EPSG:25830 – ETRS89 / UTM zona 30N. La precisión alcanzada en esta etapa se resume en la Tabla 3, que presenta el error medio de ubicación de las cámaras calculado tras la optimización.

Tabla 3: Error medio de ubicación de la cámara (Fuente: elaboración propia).

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
4.03334	3.29726	39.5171	5.20958	39.859

3.5.2 GENERACION DEL MDT SIN GCPs

El MDT generado constituye el modelo post-evento correspondiente al Método I, caracterizado por estar georreferenciado únicamente mediante los metadatos GNSS e IMU del dron, sin utilización de puntos de control en tierra (GCPs). Este modelo servirá como entrada para el análisis DoD, permitiendo evaluar los cambios

topográficos respecto al MDT oficial pre-evento del IGN. En la Figura 21 se muestran los MDS y MDT generados mediante este primer método.

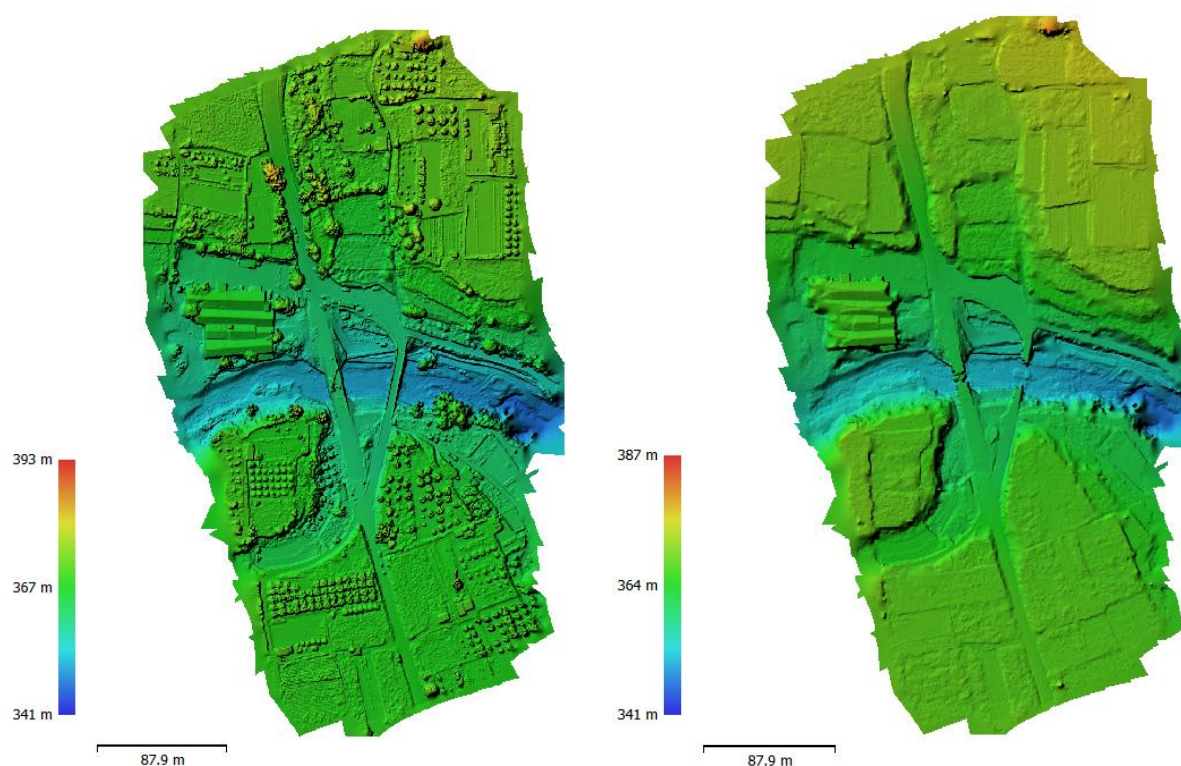


Figura 21: MDS Y MDT generados con el Método I sin GCPs (Fuente: elaboración propia).

3.6. METODO II USO DE PUNTOS DE CONTROL EN TIERRA (GCPs)

En este método se sigue el mismo flujo inicial descrito en el apartado 3.4 PROCESO FOTOGRAMETRICO carga y selección de imágenes, alineación fotogramétrica, calibración de cámara y generación de nube de puntos dispersa. La diferencia principal radica en la fase de georreferenciación, ya que en lugar de depender exclusivamente de los metadatos GNSS e IMU del dron, se emplearon puntos de control en tierra (GCPs) medidos con un GNSS diferencial de alta precisión Leica Zeno FLX100.

En la tabla 4 se presentan las coordenadas UTM en el sistema EPSG:25830 de los GCPs utilizados en el área de estudio.

Tabla 4: Coordenadas UTM de los puntos de apoyo (GCPs) (Fuente: elaboración propia).

ID	X	Y	Z
0001	690699.495	4364688.33	317.410
0002	690531.083	4364762.26	316.663
0003	690567.915	4364446.82	314.173
0004	690710.256	4364462.05	313.572

3.6.1 GEOREFERENCIACION CON GCPs

Los puntos de apoyo fueron distribuidos a lo largo del área de estudio para garantizar una cobertura homogénea y optimizar la precisión geométrica del modelo. Cada punto fue medido con el receptor Leica Zeno FLX100 en modo RTK, obteniendo precisiones centimétricas en los tres ejes (X, Y, Z).

En Agisoft Metashape, las coordenadas de los GCPs fueron importadas en formato CSV a través del panel *Reference* tal como se muestra en la Figura 22.

Import CSV

Coordinate System: ETRS89 / UTM zone 30N (EPSG::25830)

Rotation angles: Omega, Phi, Kappa

Ignore labels: ☐ Threshold (m): 0.1

Delimiter: ☒ Tab ☐ Semicolon ☒ Comma ☐ Space ☐ Other: Combine consecutive delimiters: ☐

Columns:

Label: 1 Accuracy ☐ Rotation ☐ Accuracy

Easting: 2 8 Omega: 5 9

Northing: 3 8 Phi: 6 9

Altitude: 4 8 Kappa: 7 9

Enabled flag: 10

Start import at row: 2 Items: All

First 20 lines preview:

	Label	Easting	Northing	Altitude
1	ID	X	Y	Z
2	1	690699.495	4364688.334	317.41
3	2	690531.083	4364762.264	316.663
4	3	690567.915	4364446.819	314.173
5	4	690710.256	4364462.052	313.572

OK Cancel

Figura 22: Configuración Importación de los puntos (Fuente: elaboración propia).

Posteriormente, se realizó el marcado manual de cada punto en las imágenes, hasta que todos quedaron correctamente identificados. Las marcas se indican en verde en la interfaz del software (Figura 23).



Figura 23: Marcado Manual sobre fotogramas (Fuente: elaboración propia).

Una vez vinculados, se ejecutó la herramienta Optimize Cameras, que recalcula simultáneamente los parámetros de cámara y las posiciones de las imágenes, ajustando el bloque fotogramétrico a las coordenadas de referencia. El reporte generado por Agisoft Metashape mostró un error de reproyección muy inferior al obtenido en el Método I, lo que evidencia la mejora en la precisión global del modelo.

En la Figura 24 podemos ver que el error Z se representa mediante el color de la elipse, mientras que Los errores X, Y se representan mediante la forma de la elipse. Las ubicaciones estimadas de los GCP se marcan con un punto o una cruz, y en la Tabla 5 se muestran el RMSE para los 4 puntos.

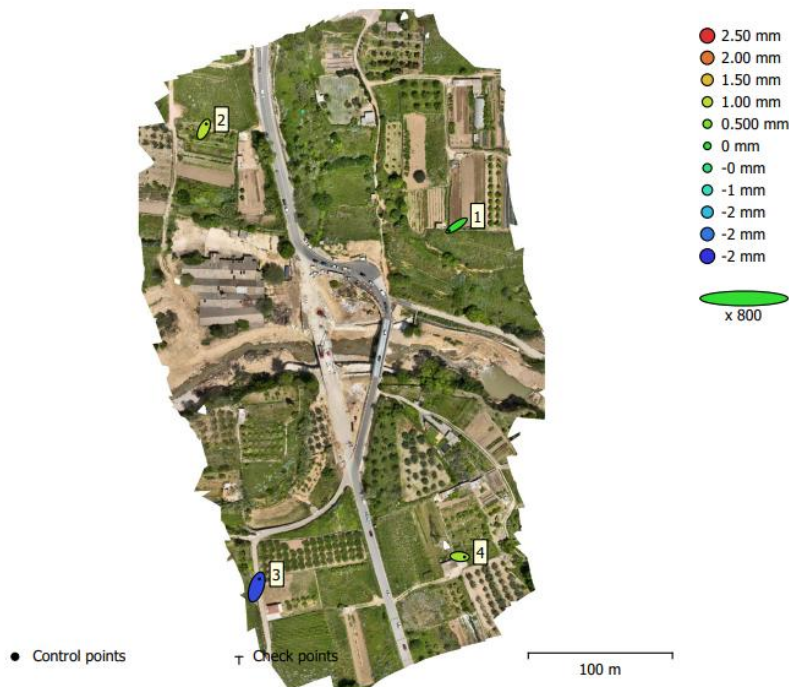


Figura 24: Ubicaciones de GCP y estimaciones de error (Fuente: elaboración propia).

Tabla 5: Puntos de control RMSE (Fuente: elaboración propia).

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
4	0.834756	0.94665	0.132447	1.26213	1.26906

El reporte generado con Agisoft Metashape incluye los distintos errores obtenidos después de la optimización de las cámaras (Tabla 6). Se puede apreciar un muy buen resultado, en comparación con el MÉTODO I.

Tabla 6: Error total de los Puntos de apoyo GCPS (Fuente: elaboración propia).

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
1	-1.28494	-0.86442	0.00249139	1.54864	9.798 (23)
2	0.44612	0.92728	0.0977083	1.03364	1.227 (9)
3	0.483529	1.40485	-0.232507	1.50382	3.969 (1)
4	0.838681	-0.0624304	0.0809718	0.84489	0.979 (9)
Total	0.834756	0.94665	0.132447	1.26906	7.313

3.6.2 GENERACION DEL MDT CON GCPs

Tras la georreferenciación, se continuó con el mismo flujo fotogramétrico explicado en el Apartado 3.4: generación de nube de puntos densa, filtrado y clasificación para extraer únicamente los puntos de terreno, y finalmente la interpolación para crear el MDT.

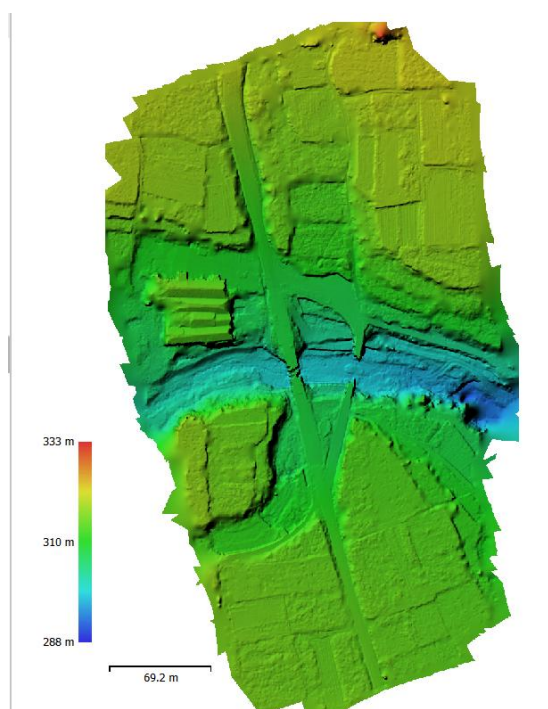


Figura 25: Generación del MDT con GCPs (Fuente: elaboración propia).

El producto final corresponde al MDT post-evento con GCPs, caracterizado por una georreferenciación precisa a nivel centimétrico. Este modelo constituye una referencia de alta fiabilidad para la comparación mediante la técnica DEM of Difference (DoD) con el MDT oficial del IGN(Figura 25).

3.7. METODO III USO DE PUNTOS DE CONTROL APROXIMADOS A PARTIR DE DATOS GEOESPACIALES EXISTENTES

Este método plantea una alternativa intermedia entre el uso exclusivo de metadatos del dron (Método I) y la utilización de puntos de control en tierra medidos en campo (Método II). La principal diferencia radica en la georreferenciación, ya que se emplearon puntos de control aproximados obtenidos de fuentes oficiales (MDT LiDAR PNOA y ortofotografías del IGN), en lugar de GCPs medidos con instrumentación GNSS.

De esta forma, se busca reducir el tiempo y los recursos necesarios en situaciones de emergencia, evitando el trabajo de campo y aprovechando la información geoespacial ya existente,

3.7.1 GEPREFERENCIACION CON METODO SEMIAUTOMATICO.

Los puntos aproximados fueron obtenidos previamente con la ayuda de una caja de herramientas desarrollada en ArcGIS Pro (ver apartado 3.10). Una vez extraídas sus coordenadas en el sistema de referencia ETRS89 / UTM zona 30N (EPSG:25830), se importaron en formato CSV al panel *Reference* de Agisoft Metashape tal y como se muestra en el proceso de la Sección 3.6.1.

El procedimiento de asignación consistió en marcar manualmente cada punto en las imágenes correspondientes, de manera análoga al proceso seguido con los GCPs del Método II. La diferencia fundamental radica en que la precisión de estos puntos no es centimétrica, sino dependiente de la resolución del MDT y ortofotografía utilizados como base.

Posteriormente, se ejecutó la herramienta *Optimize Cameras*, lo que permitió ajustar el bloque fotogramétrico a las nuevas coordenadas aproximadas y reducir el error medio de reproyección. En la Tabla 7 se muestran los valores de error obtenidos, comparables a los reportes anteriores.

Tabla 7: Error total de los puntos de apoyo GCPS (Fuente: elaboración propia).

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
1	-5.97804	-7.78871	-0.617993	9.83783	8.229 (10)
2	2.1964	7.75539	0.527047	8.07763	2.929 (8)
3	1.94472	-4.08005	-0.394242	4.53698	4.055 (3)
4	1.83591	4.11454	0.677737	4.55624	1.775 (9)
Total	3.45375	6.21262	0.564457	7.13047	5.239

3.7.2 GENERACION DEL MDT CON METODO SEMIAUTOMATICO

Tras la georreferenciación, se continuó con el mismo flujo que en los métodos anteriores: densificación de la nube de puntos, clasificación de terreno y generación del MDT. El modelo obtenido conserva la ventaja de haber sido georreferenciado a partir de información oficial existente, sin necesidad de levantamientos de campo, lo cual representa una metodología viable para escenarios donde la rapidez es prioritaria.

En la Figura 26 se muestra el MDT post-evento correspondiente al Método III. Este MDT será posteriormente empleado en la técnica DoD presentado en el Apartado 3.9.

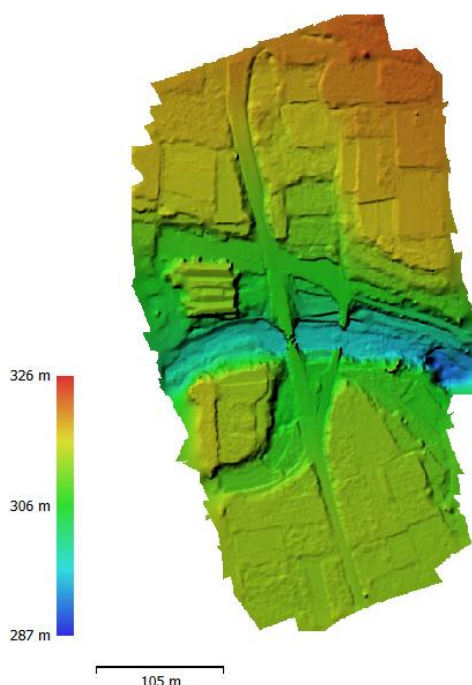


Figura 26: Generación del MDT con GCPs semiautomático (Fuente: elaboración propia).

3.8. EVALUACION DE LA CALIDAD

La técnica SfM (Structure from Motion) se puede interpretar como una evolución de la fotogrametría hacia la fusión con ciertos procedimientos propios de la visión por computador (Hartley and Mundy, 1993). Ambas disciplinas siguieron caminos paralelos hasta hace pocas décadas y actualmente se ha acuñado el término photogrammetric computer vision (Förstner and Wrobel, 2018).

Una de las diferencias fundamentales entre ambas disciplinas es la calidad métrica de los productos derivados, siendo más determinante en el caso de la fotogrametría donde el estudio de errores forma parte de la propia disciplina (Schertz, 1974; Wolf, Dewitt and Wilkinson, 2014). Aunque las fuentes de error propias de la fotogrametría se modelicen con el software de procesamiento de imágenes (ver Sección 3.4) el resultado final siempre contendrá algún tipo de indeterminación en forma de error accidental que hay que determinar para conocer la calidad del producto derivado. En este TFM el producto generado consiste en un conjunto de modelos digitales de elevaciones que se utilizan como datos de entrada en la técnica DoD para la determinación de zonas de erosión y deposición de sedimentos.

Un procedimiento habitual para determinar la precisión altimétrica de un DEM consiste en calcular el error medio cuadrático (RMSE) a partir de las coordenadas XYZ de un conjunto de puntos de control. Estos puntos de control deben ser de la máxima calidad geométrica y constituyen la verdad terreno contra la cual se desea comparar el DEM. El sistema de referencia de los puntos de control debe coincidir con el sistema de referencia del DEM; si no es así debe estar bien documentado para poder hacer las transformaciones pertinentes y conseguir así una alineación correcta entre los dos conjuntos de datos.

El algoritmo para el cálculo del RMSE es muy simple y consiste en iterar sobre cada punto de control. En cada punto se extrae la coordenada Z del DEM mediante la superposición del punto sobre la celda correspondiente. Al final de la iteración tendremos n parejas de valores Z_{GNSS} y Z_{DEM} que permiten calcular los valores residuales haciendo la resta de las dos coordenadas Z. A partir de los residuos se pueden calcular diversos estadísticos, entre ellos los errores medios cuadráticos según la fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{DEMi} - Z_{GNSSi})^2}{n}}$$

En este TFM se realizó un levantamiento GNSS, independiente del levantamiento de los puntos de apoyo, en el que se tomaron 30 puntos repartidos por la zona de estudio. La Sección 4.1 contiene los resultados y la discusión de los errores medios cuadráticos de los tres DEM generados.

3.9. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DEM OF DIFFERENCE (DOD)

La comparación de Modelos Digitales del Terreno (MDT) constituye una de las técnicas más empleadas para la detección y cuantificación de cambios geomorfológicos en el tiempo. Esta metodología, conocida como *DEM of Difference* (DoD), se basa en la resta celda a celda de dos modelos digitales, permitiendo identificar zonas de erosión (valores negativos), deposición (valores positivos) y zonas sin cambios significativos (valores próximos a cero) (Wheaton et al., 2010; Williams, 2012).

En este trabajo, la aplicación de la técnica DoD se realizó utilizando ArcGIS Pro, mediante la operación de resta entre los MDT post-evento (obtenidos por los métodos M I, M II y M III) y el MDT oficial del Instituto Geográfico Nacional (IGN) correspondiente al estado pre-evento. El resultado de la técnica DoD permite identificar las áreas donde se produjeron modificaciones del relieve en relación con la superficie previa al evento.

El procedimiento seguido consistió en verificar que los MDT empleados presentaran la misma extensión espacial, resolución y sistema de referencia, con el fin de garantizar la comparabilidad celda a celda. Para ello, fue necesario recortar el MDT pre-DANA (MDT02IGN) al área de estudio correspondiente, que coincide con la zona resultante de los tres métodos de generación. Como referencia espacial para el recorte se utilizó el MDT 2×2, obtenido a partir del primer método aplicado.

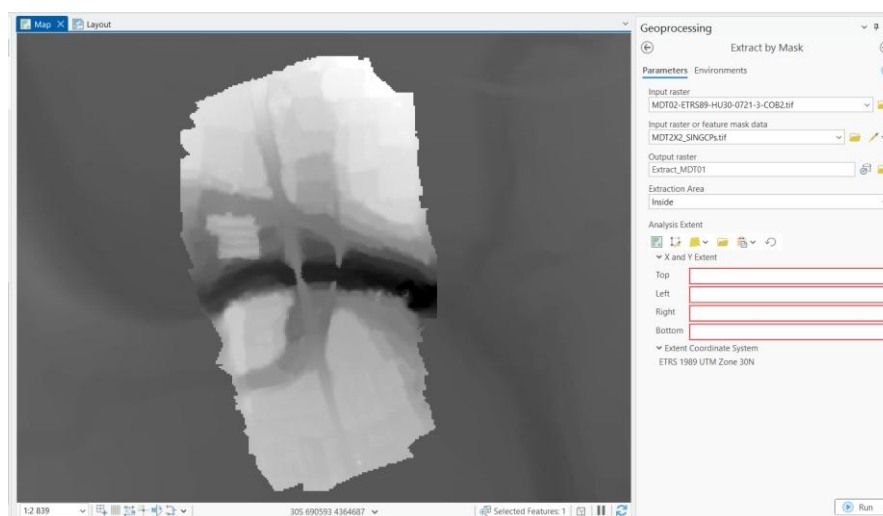


Figura 27: Extracción por máscara de la zona de estudio (Fuente: elaboración propia).

Posteriormente, en ArcGIS Pro se comprobó que ambos archivos ráster TIFF compartieran el mismo sistema de referencia y alineación de celdas, asegurando así la correcta superposición y la validez de la operación de resta necesaria para aplicar la técnica DoD (Figura 27).

A continuación, se procedió a aplicar la resta de las dos imágenes ráster mediante la herramienta Raster Calculator (Figura 28).

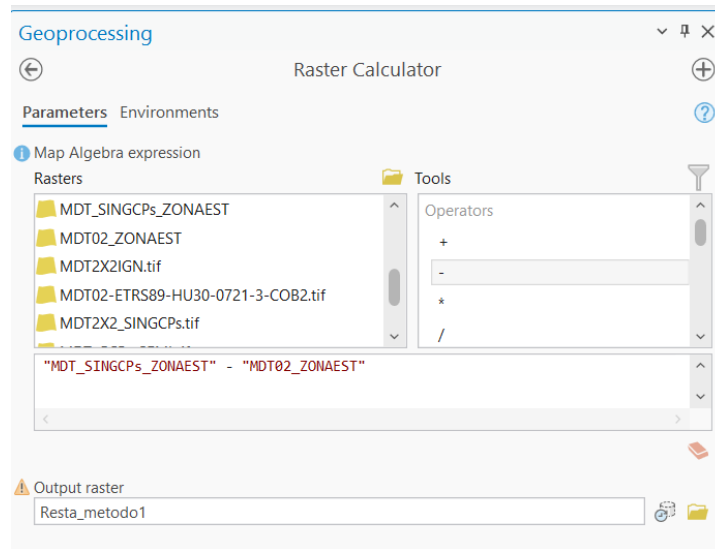


Figura 28: Herramienta de Calculadora ráster

Por último, se generó un mapa ráster de diferencias (DoD), en el cual los valores negativos corresponden a zonas de erosión (pérdida de material), mientras que los valores positivos representan zonas de deposición (acumulación de material). La Figura 29 contiene los resultados obtenidos al aplicar la técnica DoD a cada uno de los métodos empleados.

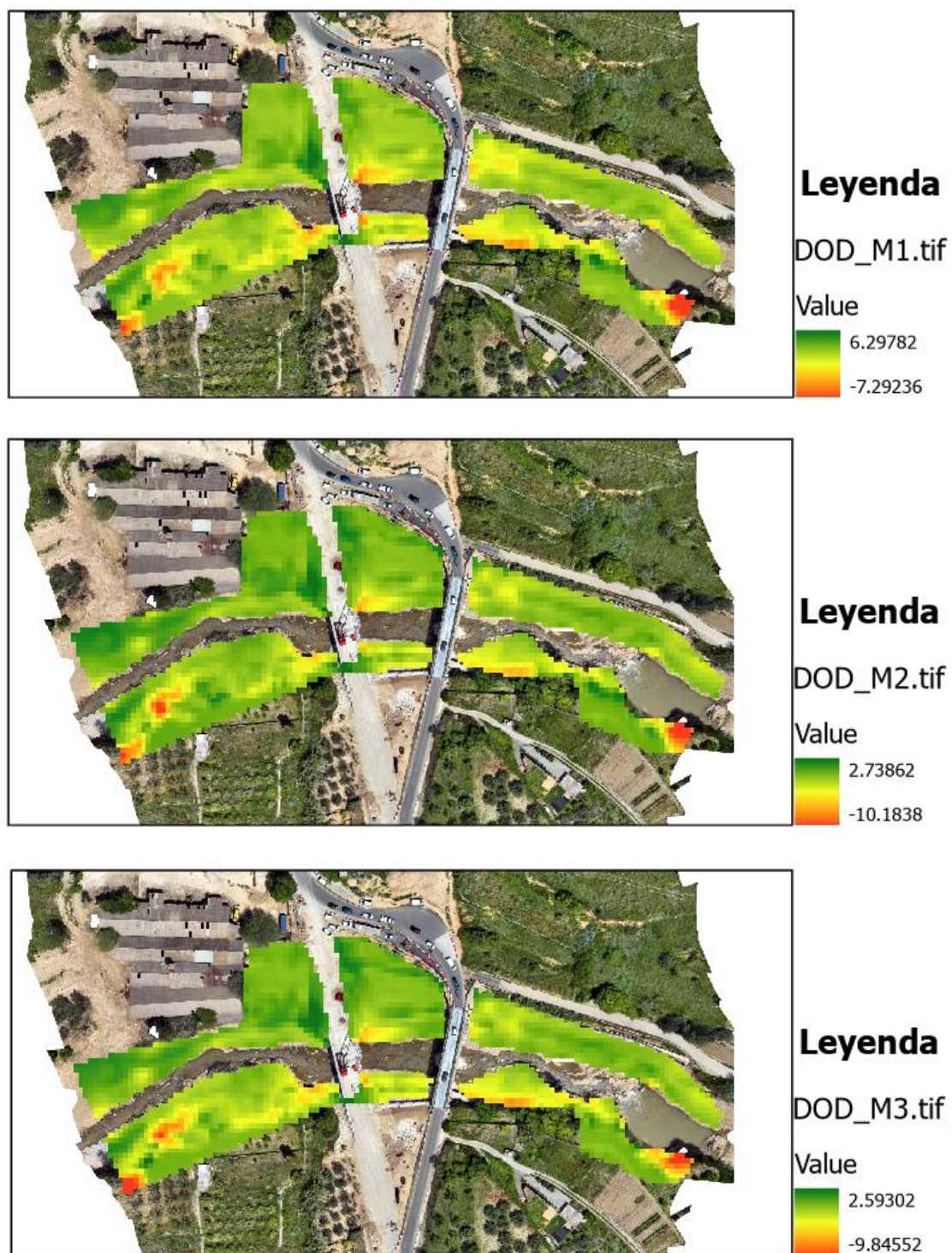


Figura 29: Resultado de la aplicación de la técnica DoD sobre la ortoimagen de la zona de estudio (Fuente: elaboración propia).

3.10. CREACION DE UNA CAJA DE HERRAMIENTAS

Los entornos de trabajo SIG proporcionan herramientas de geoprocesamiento que cubren las necesidades de un amplio espectro de usuarios. Estos mismos entornos también incorporan mecanismos específicos para la automatización de tareas o el desarrollo de procedimientos avanzados no disponibles por defecto. En este proyecto se ha utilizado ArcGIS Pro 2.5 que integra un intérprete del lenguaje de programación Python 3 y un mecanismo de desarrollo de cajas de herramientas (Zandbergen, 2020). El intérprete del lenguaje permite el acceso a un módulo desarrollado por Esri, denominado arcpy, que facilita las llamadas desde el código Python a las herramientas de geoprocesamiento disponibles desde los menús de la aplicación. En este proyecto se ha desarrollado una caja de herramientas específica llamado PYNOA para acelerar la obtención del modelo digital del terreno en el denominado Método III. La funcionalidad se centra específicamente en la gestión de datos auxiliares (ortofotos PNOA y nubes de puntos LiDAR) y en el cálculo del error de un DEM a partir de una nube de puntos de control.

La Figura 30 muestra la interfaz de la caja de herramientas que está diseñada para que el usuario siga una secuencia de operaciones sencilla e intuitiva. El usuario es responsable de recolectar y organizar varios conjuntos de datos en diferentes carpetas que serán parte de la configuración básica de las diferentes funcionalidades de la caja de herramientas. El usuario también debe crear dos mapas denominados “PNOA” y “FLIGHT” donde se visualizarán las ortoimágenes PNOA y los fotogramas del vuelo.

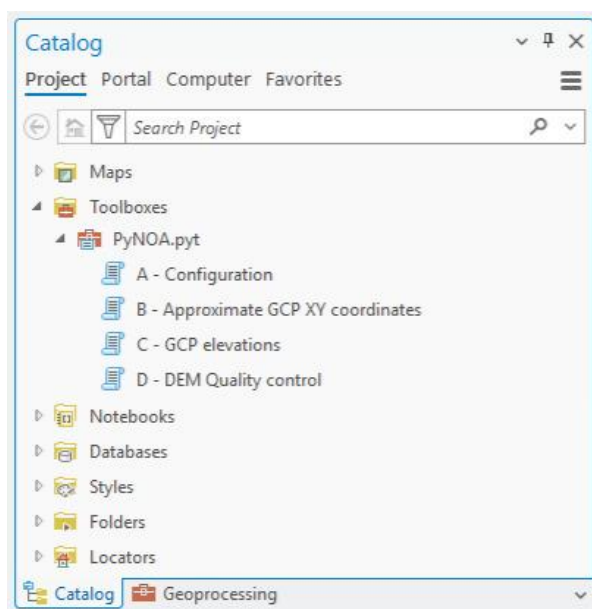


Figura 30: Interfaz gráfica de usuario de la caja de herramientas PyNOA (Fuente: elaboración propia).

Las funcionalidades se han diseñado de modo que el usuario simplemente debe ejecutar las herramientas en orden. En este punto es conveniente recordar que un objetivo primordial de la caja de herramientas es facilitar la obtención de coordenadas de puntos de apoyo sin necesidad de hacer trabajo de campo. En este TFM, dichos puntos se denominan puntos de apoyo aproximados.

La secuencia incluye los siguientes pasos:

- A. Configuración. En esta herramienta se definen dos carpetas, la primera de ellas debe contener dos tipos de datos del PNOA: ortoimágenes y nubes de puntos LiDAR. La segunda carpeta contiene datos del vuelo como los fotogramas u ortoimágenes creadas a partir de los fotogramas. También se define un tercer conjunto de datos consistente en un fichero Shapefile de puntos donde se almacenarán los puntos de apoyo aproximados. Si el fichero de puntos no está en la tabla de contenidos del mapa PNOA, la herramienta lo añadirá.

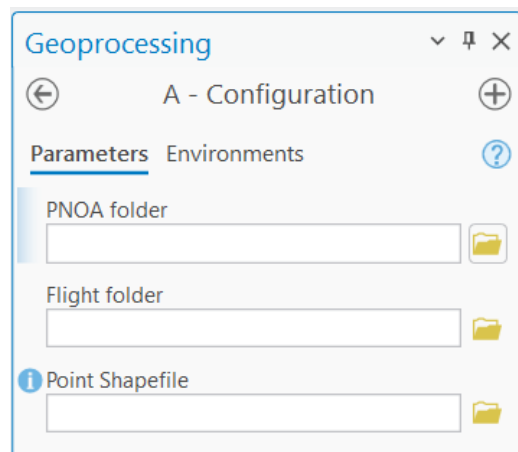


Figura 31: configuración de Carpetas.

Una vez completada la configuración (Figura 31), el usuario debe cargar una ortoimagen en el mapa PNOA. Esta imagen será la referencia para obtener las coordenadas planimétricas del futuro punto de apoyo. El mapa FLIGHT puede estar vacío.

- B. Coordenadas aproximadas PNOA. Esta herramienta no tiene ningún parámetro configurable sustituye simplemente una ayuda visual para elegir puntos bien definidos en los fotogramas del vuelo. El usuario simplemente debe ampliar y desplazar la imagen hasta un potencial punto de apoyo que visualmente esté bien definido. El punto tentativo debe estar aproximadamente en el centro del mapa. A continuación, se ejecuta la herramienta con el botón RUN y en el mapa FLIGHT se visualiza el fotograma del vuelo cuyo centro sea el más cercano a las coordenadas del centro del mapa PNOA (Figura 32).

Una vez ejecutada la Herramienta B el usuario puede visualizar alternativamente los dos mapas, PNOA y FLIGHT, para asegurar que el punto de apoyo tentativo se visualiza correctamente en el fotograma del vuelo. Así, se garantiza la correcta localización del punto de apoyo en el entorno de trabajo del software fotogramétrico. Si el punto es adecuado, el usuario editará la capa de puntos definida en la Herramienta A e insertará un nuevo punto sobre la ortoimagen PNOA. En este preciso momento se definen las coordenadas planimétricas del punto de apoyo aproximado por la posición del punto aproximado.

- C. Altura de los puntos de apoyo. Una vez digitalizados los puntos de apoyo, se creará un fichero CSV con el listado de puntos de apoyo. En cada registro se incluyen las coordenadas XYZ y el fotograma donde aparece el punto. Las coordenadas XY son conocidas por el propio posicionamiento del punto sobre la ortoimagen PNOA tal y como se ha descrito en la herramienta B. La coordenada Z se obtiene mediante interpolación en el conjunto de datos LiDAR correspondiente.

Los ficheros LiDAR del CNIG se organizan en cuadrículas de 2×2 km en el sistema de coordenadas UTM EPSG:25830. La extensión de cada cuadrícula está definida por valores enteros múltiplos de 2 km, de modo que dadas las coordenadas XY de cualquier punto localizado en territorio español es inmediato saber cuál es su correspondiente conjunto de datos LiDAR. Esta funcionalidad está implementada en la caja de herramientas PyNOA mediante la función `get_lidar_filename()` de modo que el usuario no debe especificar el nombre del fichero de datos correspondiente. Es importante recordar que la existencia de los conjuntos de datos LiDAR en la carpeta de datos (especificada previamente con la Herramienta A) es responsabilidad del usuario que. Si el fichero no existe, la Herramienta C muestra un mensaje de error al usuario quien deberá añadir el fichero a la carpeta.

En este punto el usuario dispone de una tabla de puntos de apoyo con la que podrá incorporarlos al proyecto correspondiente en el entorno de trabajo del software fotogramétrico (Apartado 3.6.1). La obtención de este conjunto de puntos en coordenadas oficiales tanto planimétricamente como altimétricamente es un objetivo fundamental de este TFM y el modelo digital del terreno obtenido con este conjunto de puntos (Método III) se comparará con los modelos obtenidos sin ningún tipo de puntos de apoyo (Método I) y con puntos de apoyo obtenidos con equipamiento GNSS geodésico (Metodo II).

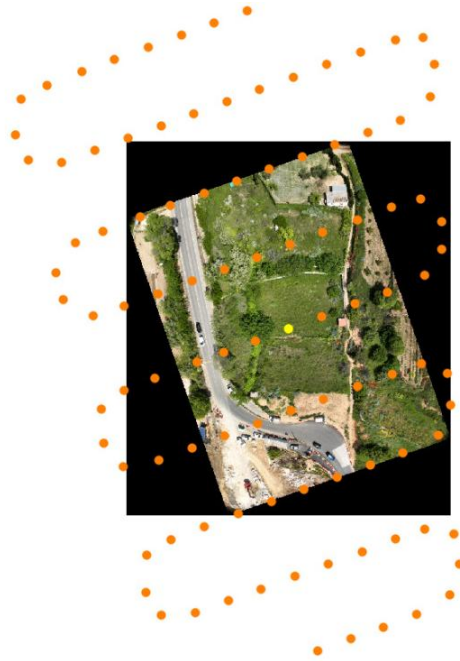


Figura 32: Trayectoria con los centros de proyección de los fotogramas del vuelo con el fotograma 0446 cuyo centro está dibujado en color amarillo (Fuente: elaboración propia)

- D. Control de calidad. Esta herramienta permite crear un informe de la calidad altimétrica de un DEM basado en un conjunto de puntos de control. El usuario especifica tres parámetros (i) el fichero ráster que contiene el modelo digital del terreno, (ii) el fichero CSV con las coordenadas de los puntos de control y (iii) el fichero CSV donde se almacenará el informe del error medio cuadrático. El correcto funcionamiento de esta herramienta requiere que el fichero de coordenadas tenga una cabecera con los nombres de campo en el primer registro. En dicha cabecera debe haber dos campos denominados “X” e “Y”, o en su defecto “Long” y “Lat”, para poder extraer los valores numéricos de las coordenadas que se utilizan en el cálculo.

A nivel de programación cada herramienta se define con una clase Python que contiene seis métodos: **__init__()**, **getParameterInfo()**, **isLicensed()**, **updateParameters()**, **updateMessages()** y **execute()**, siendo todos ellos métodos de instancia. Los métodos que requieren mayor código escrito por el programador son **getParameterInfo()** donde se leen los parámetros desde la interfaz gráfica de la herramienta y **execute()** que contiene el código relevante de la herramienta. Además de las clases correspondientes a las herramientas, se ha creado otra clase adicional **Config()** para compartir información entre herramientas. El primer uso de PyNOA requiere su carga mediante el menú “**Insert > Toolbox > Add Toolbox**”, a partir de ahí aparecerá en el panel de cajas de herramientas de los nuevos proyectos.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PRESIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

La evaluación de la precisión altimétrica de los tres MDT generados se realizó a partir de un levantamiento de GNSS de 26 puntos de validación distribuidos en la zona de estudio. A partir de estos datos se calcularon tres estadísticos principales: el error medio cuadrático (RMSE), que refleja la precisión global; el error medio (ME), que indica el sesgo sistemático o tendencia del modelo a sobrestimar o subestimar la altitud; y la desviación estándar (SD), que mide la dispersión de los errores respecto a la media.

Tabla 8: Validación altimétrica de los MDT mediante 26 puntos GNSS de control: valores observados, estimados y residuos (Fuente: elaboración propia).

POINT ID	MÉTODO I			MÉTODO II			MÉTODO III		
	Z GNSS	Z DEM	RESIDUO	Z GNSS	Z DEM	RESIDUO	Z GNSS	Z DEM	RESIDUO
3	367.445	371.519	4.074	316.375	317.646	1.271	316.375	317.289	0.914
4	361.643	364.906	3.263	310.573	311.097	0.524	310.573	311.075	0.502
5	356.047	359.262	3.215	304.977	305.124	0.147	304.977	305.176	0.199
6	354.382	357.316	2.934	303.312	303.379	0.067	303.312	303.740	0.428
7	366.377	370.131	3.754	315.307	316.233	0.926	315.307	316.160	0.853
8	366.384	370.131	3.747	315.314	316.233	0.919	315.314	316.160	0.846
10	369.715	373.475	3.760	318.645	319.504	0.859	318.645	320.123	1.478
11	368.116	371.958	3.842	317.046	318.046	1.000	317.046	317.967	0.921
12	369.730	373.737	4.007	318.660	319.873	1.213	318.660	319.871	1.211
13	369.162	372.610	3.448	318.092	318.799	0.707	318.092	318.975	0.883
14	367.263	370.337	3.074	316.193	316.489	0.296	316.193	316.812	0.619
15	367.182	369.059	1.877	316.112	315.641	0.471	316.112	316.503	0.391
16	365.330	369.019	3.689	314.260	315.015	0.755	314.260	315.213	0.953
17	358.409	360.630	2.221	307.339	306.659	0.680	307.339	307.071	0.268
18	358.808	361.538	2.730	307.738	307.511	0.227	307.738	307.749	0.011
19	358.361	361.358	2.997	307.291	307.304	0.013	307.291	307.600	0.309
20	360.080	363.989	3.909	309.010	310.136	1.126	309.010	310.164	1.154
21	361.362	365.262	3.900	310.292	311.148	0.856	310.292	311.160	0.868
22	362.921	367.078	4.157	311.851	312.936	1.085	311.851	312.886	1.035
23	363.144	367.438	4.294	312.104	313.306	1.202	312.104	313.144	1.040
24	363.738	367.816	4.078	312.668	313.763	1.095	312.668	313.629	0.961
25	363.362	368.171	4.809	312.322	313.935	1.613	312.322	313.636	1.314
26	364.162	368.798	4.636	313.122	314.524	1.402	313.122	314.173	1.051
27	364.555	367.924	3.369	313.485	313.938	0.453	313.485	313.959	0.474
28	360.452	363.798	3.346	309.382	309.723	0.341	309.382	309.775	0.393
29	366.458	367.765	1.307	315.388	313.194	2.194	315.388	313.539	1.849

Tabla 9: Estadísticos de la evaluación altimétrica de los Métodos I, II y III (Fuente: elaboración propia).

	RMSE [m]	ME [m]	SD [m]
MÉTODO I	3.567	3.478	0.806
MÉTODO II	0.966	0.825	0.512
MÉTODO III	0.908	0.805	0.429

Los resultados de la evaluación de la precisión (Tabla 9) muestran diferencias significativas entre los tres métodos aplicados. El Método I, basado exclusivamente en la orientación de fotografías con los metadatos GNSS/IMU del dron DJI Mavic 3E, presentó un RMSE de 3.567 m, mientras que los Métodos II y III, en los que se utilizaron puntos de apoyo, presentan valores de RMSE de 0.966 m y 0.908 m respectivamente.

Estos resultados evidencian que, a pesar de usar un equipo avanzado y ampliamente utilizado en múltiples aplicaciones de ingeniería geomática y otras disciplinas más o menos afines (DJI Mavic 3E), la ausencia de puntos de control genera errores altimétricos considerables que lo convierten en el método menos fiable para un análisis cuantitativo de cambios topográficos. Por el contrario, los Métodos II y III, ambos basados en la orientación mediante puntos de apoyo en el terreno (GCPs) proporcionaron resultados claramente mejores, con valores de RMSE casi 4 veces inferiores. Este hecho confirma la importancia de disponer de puntos de apoyo para el proceso fotogramétrico.

Un resultado sorprendente de este TFM es que el Método II fue superado en términos de RMSE por el Método III. Es importante recordar que el Método II requiere una salida a campo para realizar el levantamiento GNSS, mientras que el Método III permite obtener las coordenadas de los puntos de apoyo aproximados en laboratorio, con el consiguiente ahorro de tiempo y recursos. La lógica y la práctica profesional hacen que este resultado sea ciertamente contraintuitivo, aunque más allá de esta cuestión lo relevante es poder determinar si el Método III es comparable al Método II en situaciones de respuesta rápida desde el punto de vista de la precisión geométrica.

La respuesta según estos resultados es afirmativa, de modo que el Método III tiene un interés práctico y operativo en contextos de emergencias donde no es posible desplegar efectivos para realizar el trabajo de campo y constituye una alternativa válida y eficiente.

4.2. RESULTADOS DE LA TECNICA DOD

La técnica *DEM of Difference (DoD)* permitió cuantificar las zonas de erosión y acumulación derivadas de la comparación entre el MDT pre-evento (IGN) y los tres MDT post-evento generados en este trabajo (Métodos I, II y III). Para distinguir entre erosión, acumulación o zonas neutras se aplicó un umbral definido mediante la composición cuadrática de los RMSE de los modelos implicados, lo que asegura que únicamente se consideren cambios significativos por encima del nivel mínimo detectable.

En cuanto a los resultados numéricos de erosión y acumulación existen claras diferencias entre el Método I y los Métodos II y III (Figura 33 y Tablas 10 y 11). El primer método caracteriza el tramo fluvial mayoritariamente como una zona donde predomina la situación estable, es decir, no hay valores de erosión o acumulación relevantes. En cambio, según los resultados de los otros dos métodos, el tramo es claramente erosivo, con más de la mitad de la superficie afectada por erosión y con alturas máximas de erosión en torno a los 10 metros.

Las imágenes aéreas de la zona de estudio disponibles en el repositorio del CNIG muestran el cauce del río totalmente cubierto por vegetación antes del 29 de octubre de 2024, mientras que los fotogramas del vuelo muestran terreno desnudo alrededor del curso de agua. Es evidente que en dicho tramo hubo una avenida devastadora, lo cual encaja bien con los resultados de los Métodos II y III.

El volumen de material obtenido por los Métodos II y III se ha cuantificado en más de 10000 m³. Si consideramos una densidad del material de 1.5 g/cm³ (correspondiente a un suelo de textura franco-arcillosa) este valor se traduce en un movimiento de sedimentos de 15000 Tm en un tramo de apenas 250 metros de longitud. Estos números muestran de manera clara la enorme magnitud en el movimiento de sedimentos que tuvo lugar durante la DANA del 29/10/2024 y que desgraciadamente causaron pérdidas humanas y materiales aguas abajo en la cuenca del Río Magro.

Tabla 10: *Valores de erosión derivados de la diferencia de modelos digitales del terreno (DoD) (Fuente: elaboración propia).*

	Altura Máxima [m]	Superficie [m ²]	Superficie [%]	Volumen [m ³]
Método I	-7.29	68	0.75	-355.84
Método II	-10.18	6304	68.79	-13107.51
Método III	-9.85	4756	52.66	-10035.08

Tabla 11: Valores de acumulación derivados de la diferencia de modelos digitales del terreno (DoD) (Fuente: elaboración propia).

	Altura Máxima [m]	Superficie [m ²]	Superficie [%]	Volumen [m ³]
Método I	6.30	184	2.02	777.25
Método II	2.74	56	0.61	84.84
Método III	2.59	116	1.28	175.13

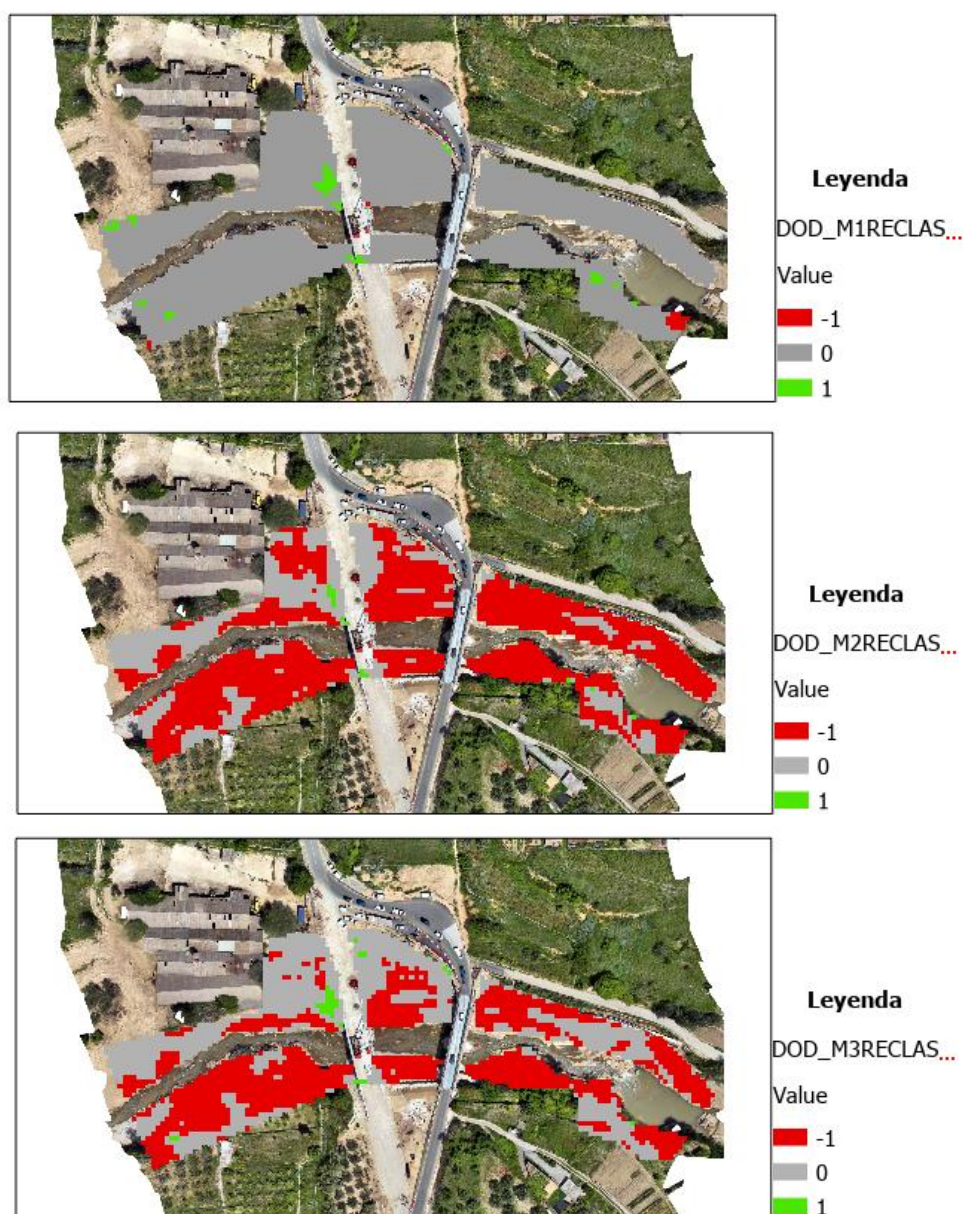


Figura 33: Reclasificación después de aplicar la técnica DOD en los métodos I, II Y III (Fuente: elaboración propia)

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES

El presente Trabajo Fin de Máster ha tenido como propósito desarrollar y validar una prueba de concepto orientada a la generación de Modelos Digitales del Terreno (MDT) post-evento, empleando diferentes metodologías de georreferenciación y evaluando la precisión de los resultados obtenidos. La propuesta parte de la premisa de que, en un escenario de emergencia, la rapidez con la que se obtiene información geoespacial precisa resulta determinante para la planificación y ejecución de medidas de respuesta. En este sentido, la investigación ha demostrado que la fotogrametría con dron, combinada con fuentes de datos disponibles y técnicas de análisis diferencial, constituye una alternativa viable para cubrir dicha necesidad.

Los resultados han puesto de manifiesto que el uso exclusivo de los metadatos GNSS e IMU del dron (Método I) permite generar un MDT de manera ágil, aunque con un nivel de error que lo limita en contextos donde se requiere una precisión centimétrica. Si bien puede tener utilidad en tareas de carácter exploratorio o preliminar, este enfoque no ofrece la fiabilidad necesaria para la cuantificación detallada de procesos erosivos y deposicionales. En contraste, la incorporación de puntos de control en tierra (Método II) se consolidó como la estrategia más precisa, confirmando que los GCPs continúan siendo fundamentales cuando se busca garantizar una alta calidad geométrica. No obstante, esta metodología implica mayores requerimientos logísticos y tiempos de ejecución, lo que puede resultar inviable en escenarios donde el acceso al terreno se encuentra restringido o donde prima la inmediatez.

Una alternativa intermedia la ofrece el Método III, basado en la utilización de puntos de control aproximados obtenidos a partir de datos geoespaciales existentes. Los resultados derivados de este procedimiento han mostrado un equilibrio notable entre rapidez y precisión, lo que lo convierte en una opción de gran interés en contextos de emergencia, especialmente cuando la recolección de GCPs en campo no es factible. Aunque no alcanza el nivel de exactitud del Método II, sí proporciona resultados suficientemente robustos como para emplearse en la detección de cambios significativos en la morfología del terreno.

En cuanto a la aplicación de la técnica DEM of Difference (DoD), los análisis realizados han confirmado su utilidad para identificar y cuantificar zonas de erosión y acumulación de sedimentos. La introducción de un umbral mínimo detectable de cambio, calculado a partir de la composición cuadrática de errores, resultó fundamental para discriminar el ruido inherente al proceso fotogramétrico y garantizar que las variaciones detectadas correspondieran a transformaciones reales del relieve.

Este aspecto refuerza la importancia de integrar un análisis riguroso de calidad como parte inseparable del flujo metodológico.

Cabe señalar que los resultados deben interpretarse dentro de las limitaciones propias de una prueba de concepto. El estudio se circunscribe a un área reducida y a un único evento, por lo que no pretende ofrecer conclusiones generalizables a todos los escenarios posibles. Asimismo, factores como la densidad de la vegetación, las condiciones atmosféricas durante el vuelo, la resolución de los datos de referencia y las características del terreno influyen de manera directa en la precisión de los productos obtenidos.

A pesar de estas limitaciones, la investigación confirma el potencial de la fotogrametría con dron como herramienta de respuesta rápida en emergencias, aportando una metodología flexible que puede adaptarse a diferentes niveles de disponibilidad de datos y recursos. Se abre así la posibilidad de desarrollar flujos de trabajo más automatizados, integrados en una caja de herramientas operativa, que permitan implementar este tipo de análisis en tiempo casi real. Del mismo modo, resulta de interés ampliar la validación a diferentes áreas geográficas y tipos de eventos, así como explorar la integración de datos provenientes de otras plataformas, como satélites o sensores terrestres, para enriquecer la caracterización de los procesos observados.

En conclusión, la prueba de concepto realizada demuestra que es posible generar información cartográfica precisa en plazos reducidos mediante el uso de drones y metodologías adaptadas a las restricciones de un escenario de emergencia. Los tres métodos analizados ofrecen distintos niveles de compromiso entre rapidez y precisión, lo que proporciona flexibilidad para su aplicación en función de las condiciones del evento y de los recursos disponibles. Este trabajo, enmarcado en la disciplina de Ingeniería Geomática aplicada a la gestión de desastres, constituye un primer paso hacia el desarrollo de soluciones operativas que fortalezcan la capacidad de respuesta ante fenómenos naturales extremos.

5.2. FUTURAS LINEAS DE DESARROLLO

El presente TFM describe un procedimiento completamente funcional para el objetivo inicial del mismo: examinar varias aproximaciones a la generación rápida de modelos digitales del terreno con especial énfasis en la aplicación de la técnica DoD en la gestión de emergencias. El procedimiento incluye una herramienta específica que permite obtener coordenadas de puntos de apoyo sobre el terreno a partir de datos oficiales preexistentes en repositorios oficiales. Sin embargo, el desarrollo llevado a cabo en este TFM se puede extender en varios aspectos:

- DEM pre-evento. La técnica DoD requiere dos modelos digitales del terreno que en este trabajo se han denominado DEM pre-evento y DEM post-evento. El DEM pre-evento utilizado fue el Modelo Digital del Terreno MDT02 disponible en el repositorio del CNIG. El tamaño de celda del MDT02 es de 2×2 m que se podría mejorar utilizando un DEM de mayor resolución o en el caso ideal con otro DEM pre-evento realizado mediante vuelos específicos de vigilancia realizados con dron, al igual que el DEM post-evento.
- Integración SIG/Fotogrametría. Los dos sistemas software utilizados en el TFM (sistema de información geográfica y fotogrametría) permiten programación en lenguaje Python. Esto permitiría teóricamente lanzar el proceso fotogramétrico desde el entorno de trabajo SIG. Esta mejora no es trivial dado que algunas partes del proceso fotogramétrico requieren intervención del usuario, pero aun así se podría diseñar alguna rutina que asista parcialmente en alguna parte del proceso.
- Correspondencia de imágenes PNOA/Dron. La caja de herramientas PyNOA permite obtener coordenadas de puntos de apoyo que el usuario localiza en la ortoimágenes PNOA. Una adición interesante de esta herramienta sería obtener la localización de los puntos de apoyo en coordenadas imagen sobre los fotogramas del vuelo o bien sobre la ortofoto generada con el software de fotogrametría. Estas coordenadas imagen se podrían obtener mediante correspondencia de imágenes que es una técnica bien conocida en la práctica fotogramétrica y ya implementada en algunos módulos disponibles en el ecosistema del lenguaje Python.
- Desarrollo en código abierto. Este TFM se ha desarrollado con dos sistemas comerciales (ArcGIS Pro y Metashape) que requieren el pago de una licencia de uso. Existen alternativas para realizar el desarrollo con un enfoque FOSS (free and open source software), tanto para la parte SIG como para la parte SfM. El desarrollo de esta línea tampoco es trivial y requeriría planificar muy bien los recursos humanos, materiales y temporales necesarios.
- Una última extensión al presente proyecto sería la presentación del procedimiento desarrollado a las administraciones públicas, en particular la administración autonómica, que son en última instancia las responsables de gestionar recursos en situaciones de emergencia. Este punto excede los objetivos formativos de un TFM, aunque sería realmente gratificante contribuir al desarrollo de la sociedad y una resiliencia en situaciones de emergencia desde la Universidad Politécnica de Valencia y particularmente desde la ETSI Geodésica, Cartográfica y Topográfica.

BIBLIOGRAFIA

Agisoft LLC (2024). Agisoft Metashape Professional (Version 2.1.3 build 18946) [Computer software]. <https://www.agisoft.com/>

Aguilar, F. J., Mills, J. P. & Aguilar, M. A. (2013). Accuracy assessment of LiDAR-derived digital elevation models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.

Alexander, D. (2000). Confronting catastrophe: New perspectives on natural disasters. Oxford University Press.

B&H Photo (2023). DJI Mavic 3 Enterprise with Shield Basic. https://www.bhphotovideo.com/c/product/1730107-REG/dji_cp_zm_00000410_sb_mavic_3_enterprise_with.html

Brasington, J., Langham, J. & Rumsby, B. T. (2003). Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. Geomorphology, 53(3–4), 299–316. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00320-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00320-3)

Clapuyt, F., Vanacker, V., & Van Oost, K. (2016). Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion photogrammetry. Geomorphology, 260, 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.011>

Cloud City Drones. (2023). DJI RC Pro Enterprise Remote Controller. <https://cloudcitydrones.com/products/dji-rc-pro-enterprise-remote-controller>

Colomina, I. & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>

Cutter, S. L. (2003). GI Science, Disasters, and Emergency Management. Transactions in GIS, 7(4), 439–445. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00156>

Cutter, S. L., Boruff, B. J. & Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. Social Science Quarterly, 84(2), 242–261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>

De Albuquerque, J. P., Herfort, B., Eckle, M. & Zipf, A. (2015). A geographical approach for combining social media and authoritative data in flood mapping. Disasters, 39(1), 1–19. <https://doi.org/10.1111/disa.12076>

DJI (2023). Mavic 3 Enterprise Series - Specs. <https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs>

Esri (2020). ArcGIS Pro 2.5 [Computer software]. Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>

Förstner, W. & Wrobel, B. P. (Eds.). (2018). *Photogrammetric Computer Vision: Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction*. Springer, 816 pp.

Geospatial Training Services (2023). Georeferencing drone data in ArcGIS Pro using ground control points. <https://geospatialtraining.com/georeferencing-drone-data-in-arcgis-pro-using-ground-control-points/>

Gómez, J. A. & Aguilar, M. A. (2020). Modelos digitales de elevación: conceptos, métodos y aplicaciones. Universidad de Jaén.

Gonçalves, J. A. & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>

Goodchild, M. F. & Glennon, J. A. (2010). Crowdsourcing geographic information for disaster response: a research frontier. *International Journal of Digital Earth*, 3(3), 231–241. <https://doi.org/10.1080/17538941003759255>

Habib, A., Ghanma, M., Al-Ruzouq, R., & Kim, E. M. (2010). Photogrammetric and LIDAR data integration using the centroid of a rectangular roof as a control point. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(6), 699–707. <https://doi.org/10.14358/PERS.76.6.699>

Hartley, R. I. & Mundy, J. L. (1993). Relationship between photogrammetry and computer vision. *Proceedings SPIE 1944, Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision*, 92–105. <https://doi.org/10.1117/12.155818>

Hodgson, M. E. & Bresnahan, P. (2004). Accuracy of airborne LiDAR-derived elevation: Empirical assessment and error budget. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*.

Instituto Geográfico Nacional (IGN) - PNOA (2022). Plan Nacional de Ortofotografía Aérea – Instituto Geográfico Nacional. <https://pnoa.ign.es>

Instituto Geográfico Nacional (IGN) (2021). Especificaciones técnicas PNOA-LiDAR, segunda cobertura. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. <https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar/especificaciones-tecnicas>

Instituto Geográfico Nacional (IGN) (2024). Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). <https://pnoa.ign.es>

IPCC (2021). Climate change 2021: The physical science basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Stilla, U. & Heipke, C. (Eds.). (2015). *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. II-3/W4, pp. 195–202). PIA15+HRIGI15 – Joint ISPRS conference, Munich, Germany, 25–27 March 2015. Copernicus Publications. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-3-W4-195-2015>

James, M. R. Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S. & Niethammer, U. (2017). Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 6(1), 39–55. <https://doi.org/10.5194/gi-6-39-2017>

James, M. R., Robson, S. & Smith, M. W. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3). <https://doi.org/10.1029/2011JF002289>

James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., & Niethammer, U. (2017). 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: Precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(12), 1769–1788. <https://doi.org/10.1002/esp.4125>

Lane, S. N., Westaway, R. M. & Hicks, D. M. (2003). Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(3), 249–271. <https://doi.org/10.1002/esp.483>

Leica Geosystems (2023). Leica Zeno FLX100 Smart Antenna: Compact and flexible GNSS solution. <https://leica-geosystems.com/products/gis-collectors/smart-antennas/leica-zeno-flx100>

Lucieer, A., de Jong, S. M. & Turner, D. (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*, 38(1), 97–116. <https://doi.org/10.1177/0309133313515293>

Nex, F. & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>

Scherz, J. P. (1974). Errors in photogrammetry. *Photogrammetric Engineering*, 40(4), 493–500.

Sithole, G. & Vosselman, G. (2004). Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.

Tiede, D., Lang, S. & Hölbling, D. (2016). Fusing Earth observation and GIS for rapid mapping. In *Land Use and Land Cover Mapping in Europe* (pp. 333–346). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7969-3_20

Trimble Inc. (2020). Trimble R12 GNSS System: High-Performance GNSS Receiver for Surveying and Mapping. <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-r12>

Turner, D., Lucieer, A. & Watson, C. (2014). An automated technique for generating georectified mosaics from UAV-captured imagery. *Remote Sensing*, 6(9), 8792–8817. <https://doi.org/10.3390/rs6098792>

UNDRR (2017). Terminology on disaster risk reduction. <https://www.undrr.org/terminology>

Vertigo Drones (2023). DJI Mavic 3 Enterprise Series – Mavic 3E with Shield Basic. https://www.vertigodrones.com/DJI-Mavic-3-Enterprise-Series-Mavic-3E-with-Shield-Basic-CPEN00000410SB_p_2481.html

Wang, C., Glennie, C. L. & Oimoen, M. (2015). Integration of UAV-based photogrammetry and airborne LiDAR for 3D reconstruction and change detection in forested environments.

Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E. & Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2), 136–156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>

Wolf, P. R., Dewitt, P. A. & Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of Photogrammetry*. McGraw-Hill Education, 663 pp.

Zandbergen, P. A. (2020). *Python scripting for ArcGIS Pro*. Esri Press.

Zhou, G., Chen, Y. & Zhang, Y. (2018). Real-time 3D mapping for disaster response with drones. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.05.008>

ANEXOS

PRESUPUESTO

El proyecto se ha valorado económicamente considerando los recursos humanos, materiales y tecnológicos necesarios para su ejecución. Los precios unitarios se han estimado en base a tarifas habituales en el sector geomático, alquiler de equipos y licencias de software.

1. Costes de personal

Concepto	Nº horas	€/hora	Total (€)
Ingeniero en prácticas / junior (procesado fotogramétrico, análisis de resultados, redacción del informe)	120 h	20 €/h	2.400
Ingeniero senior (supervisión técnica y validación de resultados)	20 h	40 €/h	800
Subtotal personal			3.200

2. Costes de equipos (alquiler / amortización proporcional)

Equipo	Tiempo uso	Coste estimado	Total (€)
Dron DJI Mavic 3E Enterprise	2 días de vuelo	200 €/día	400
Receptor GNSS Leica Zeno FLX100	2 días	150 €/día	300
Receptor GNSS Trimble R12 (para validación)	2 días	200 €/día	400
Ordenador de procesado (estación gráfica)	1 mes	150 €/mes	150
Subtotal equipos			1.250

3. Costes de software

Software	Tiempo uso	Coste estimado	Total (€)
Agisoft Metashape Professional	1 mes	170 €/mes	170
ArcGIS Pro 2.5 (licencia temporal)	1 mes	150 €/mes	150
Subtotal software			320

4. Costes de datos

Los datos empleados del PNOA (IGN-CNIG) (MDT02, ortofotografía, nube LiDAR) son de acceso gratuito, por lo que no suponen un coste adicional.

5. Costes indirectos (10 %)

Concepto	% aplicado	Total (€)
Transporte, seguros e imprevistos	10 % de costes directos	477
Coste total estimado del proyecto: 5.247 €		

REPORTES DE PROCESAMIENTO DE DATOS EN AGISOFT METASHAPE

REPORTE AGISOFT METASHAPE SIN GCPS

Processing Report

17 June 2025



Survey Data

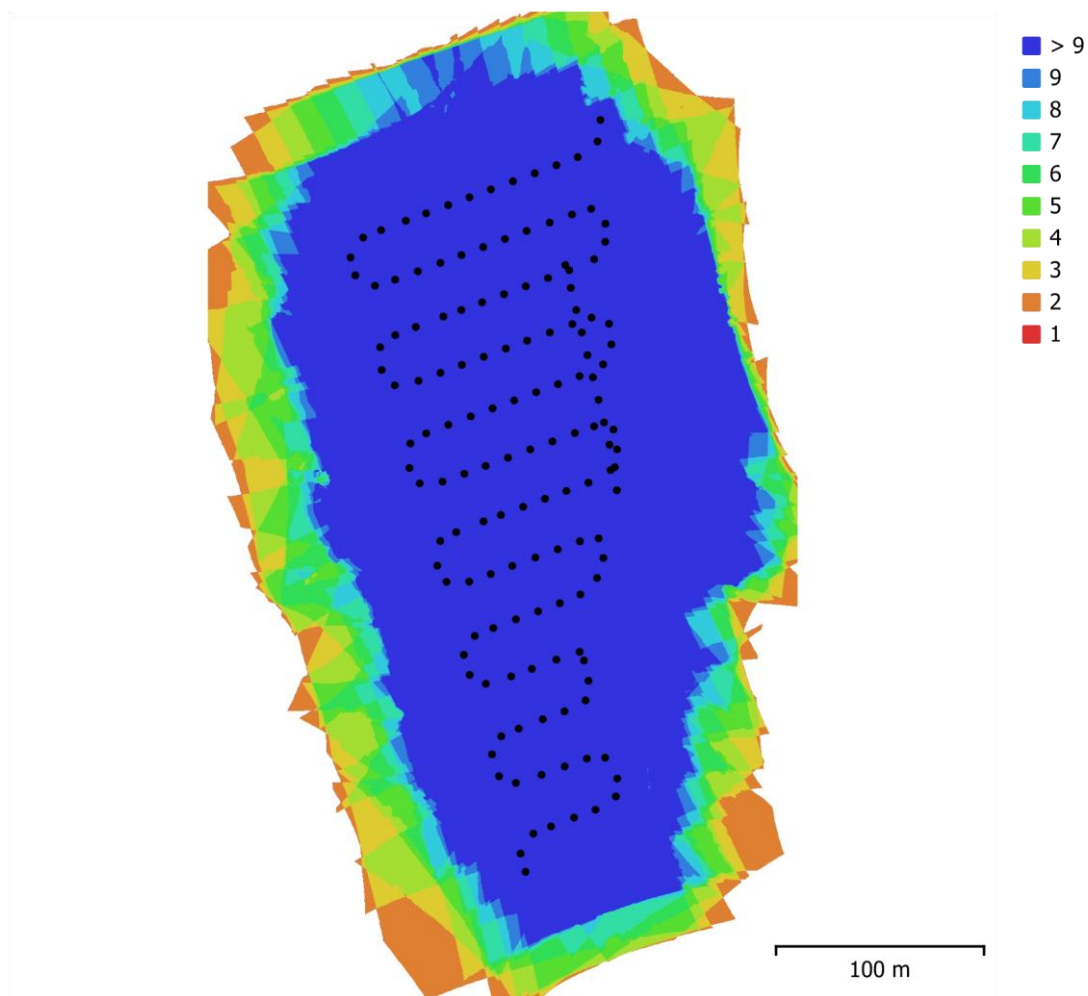


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	140	Camera stations:	140
Flying altitude:	96.4 m	Tie points:	1,034,664
Ground resolution:	2.56 cm/pix	Projections:	4,944,145
Coverage area:	0.103 km ²	Reprojection error:	1 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
M3E (12.29mm)	5280 x 3956	12.29 mm	3.36 x 3.36 μm	Yes

Table 1. Cameras.
Camera Calibration

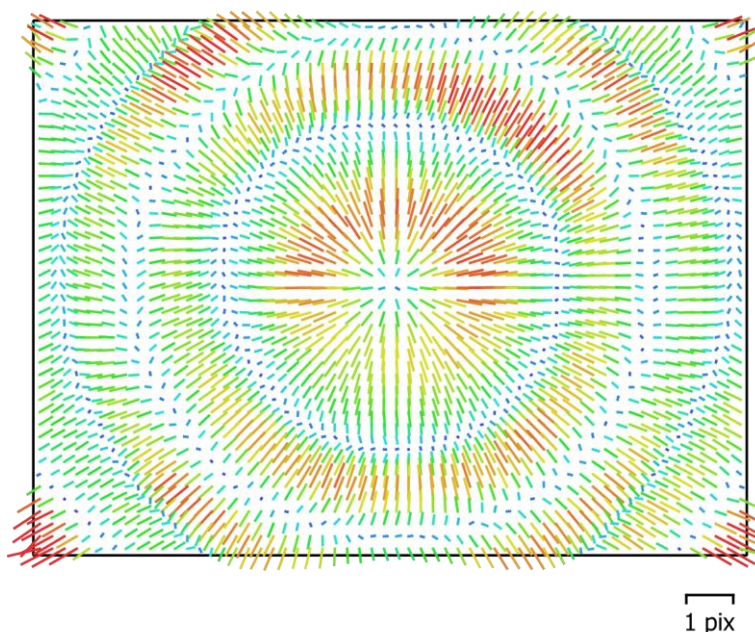


Fig. 2. Image residuals for M3E (12.29mm).

M3E (12.29mm)										
140 images, precalibrated										
Type	Resolution	Focal Length							Pixel Size	
Frame	5280 x 3956	12.29 mm							3.36 x 3.36 μm	
	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3622.46	1.7	1.00	-0.96	-0.23	-0.95	0.62	-0.95	0.92	0.08
Cx	9.542	0.044		1.00	0.23	0.92	-0.60	0.91	-0.92	-0.08
Cy	-8.91205	0.011			1.00	0.23	-0.15	0.22	-0.22	-0.38
K1	-0.110684	0.00011				1.00	-0.71	0.89	-0.95	-0.11
K2	0.00946692	2.8e-05					1.00	-0.77	0.62	0.07
K3	-0.0189485	5.5e-05						1.00	-0.85	-0.07
P1	-0.000115254	1.6e-06							1.00	0.10
P2	-0.000114215	4.3e-07								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.
Camera Locations

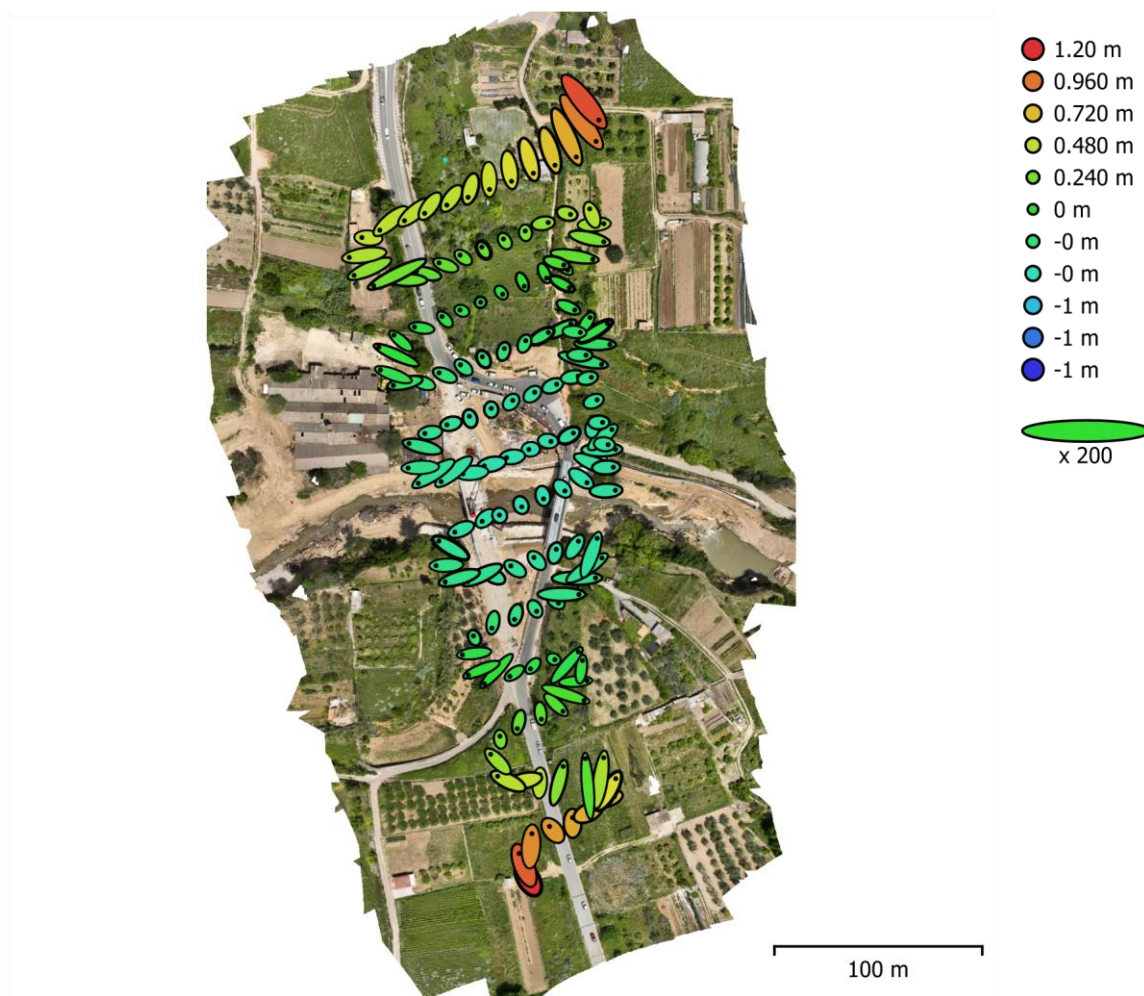


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
4.03334	3.29726	39.5171	5.20958	39.859

Table 3. Average camera location error.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.
Digital Elevation Model

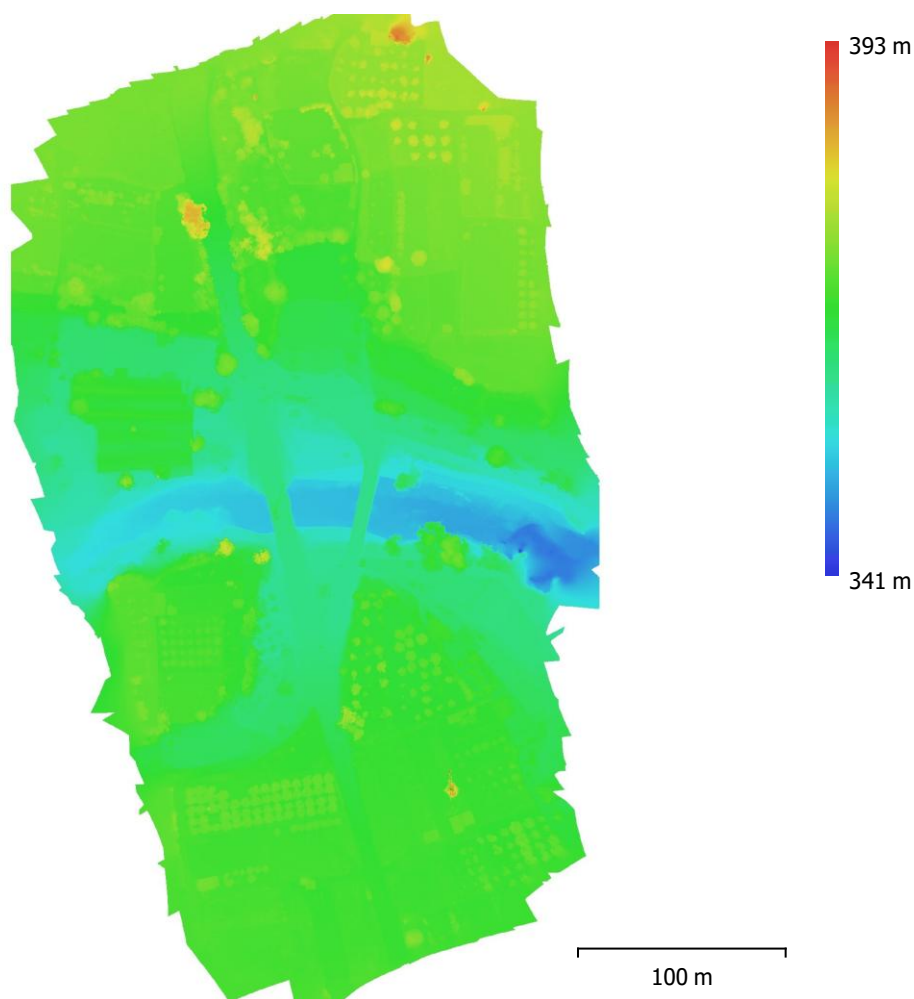


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 5.11 cm/pix

Point density: 382 points/m²

Processing Parameters

General

Images

140

Aligned images

140

Coordinate system

ETRS89 / UTM zone 30N
(EPSG::25830)

Rotation angles

Yaw, Pitch, Roll

Tie Points

Points

1,034,664 of 1,098,872

RMS reprojection error

0.226988 (1.00271 pix)

Max reprojection error

0.825241 (65.7841 pix)

Mean key point size

3.90701 pix

Point colors

3 bands, uint8

Key points

No

Average tie point multiplicity

5.27051

Alignment parameters

Accuracy

High

Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	400,000
Key point limit per Mpx	1,000
Tie point limit	40,000
Exclude stationary tie points	No
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	1 hours 23 minutes
Matching memory usage	3.25 GB
Alignment time	5 minutes 48 seconds
Alignment memory usage	879.95 MB
Optimization parameters	
Parameters	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Exclude corners	No
Optimization time	24 seconds
Date created	2025:06:05 17:10:41
Software version	2.1.3.18946
File size	115.22 MB
Depth Maps	
Count	140
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	1 hours 4 minutes
File size	1.20 GB
Point Cloud	
Points	55,135,653
Coordinate precision	1.28 cm
Point attributes	
Color	3 bands, uint8
Normal	
Confidence	1 - 67
Point classes	
Created (never classified)	55,135,653
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	1 hours 4 minutes
Point cloud generation parameters	
Source data	Depth maps
Processing time	2 hours 50 minutes
Date created	2025:06:05 23:47:27
Software version	2.1.3.18946

File size	792.50 MB
DEM	
Size	5,543 x 9,296
Resolution	5.11 cm/pix
Coordinate system	ETRS89 / UTM zone 30N
Reconstruction parameters	(EPSG::25830)
Source data	Point cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	34 seconds
Memory usage	321.77 MB
Date created	2025:06:05 23:50:05
Software version	2.1.3.18946
File size	141.93 MB
Orthomosaic	
Size	11,085 x 18,591
Resolution	2.56 cm/pix
Coordinate system	ETRS89 / UTM zone 30N
	(EPSG::25830)
Colors	3 bands, uint8
Orthophotos	1.53 GB
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
Processing time	4 minutes 37 seconds
Memory usage	1.85 GB
Date created	2025:06:05 23:54:45
Software version	2.1.3.18946
File size	1.76 GB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	2.1.3 build 18946
OS	Windows 64 bit
RAM	15.73 GB
CPU	12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12450H
GPU(s)	Intel(R) UHD Graphics

REPORT E AGISOFT METASHAPE CON CGPS

Processing Report

26 June 2025



Survey Data

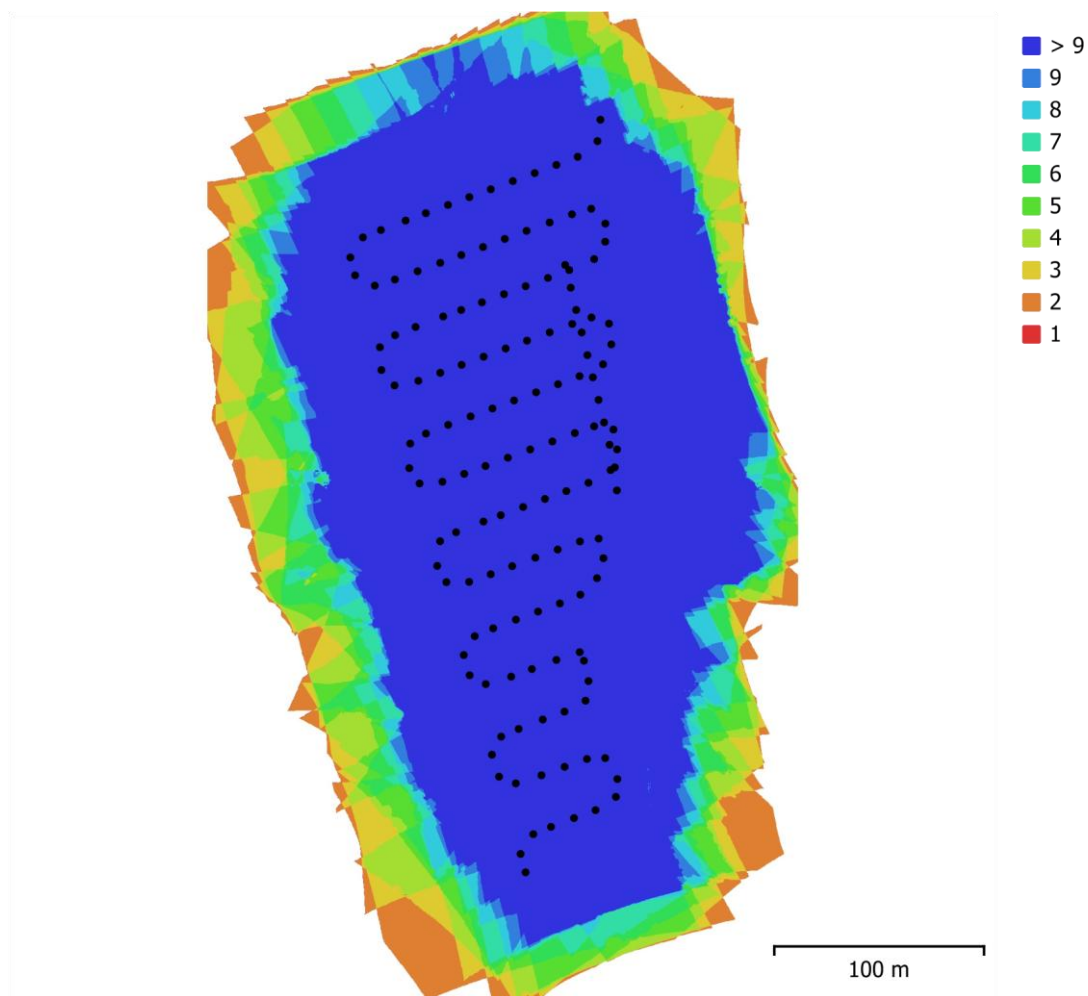


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	140	Camera stations:	140
Flying altitude:	98.5 m	Tie points:	1,035,177
Ground resolution:	2.54 cm/pix	Projections:	4,945,268
Coverage area:	0.101 km ²	Reprojection error:	1 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
M3E (12.29mm)	5280 x 3956	12.29 mm	3.36 x 3.36 μm	Yes

Table 1. Cameras.
Camera Calibration

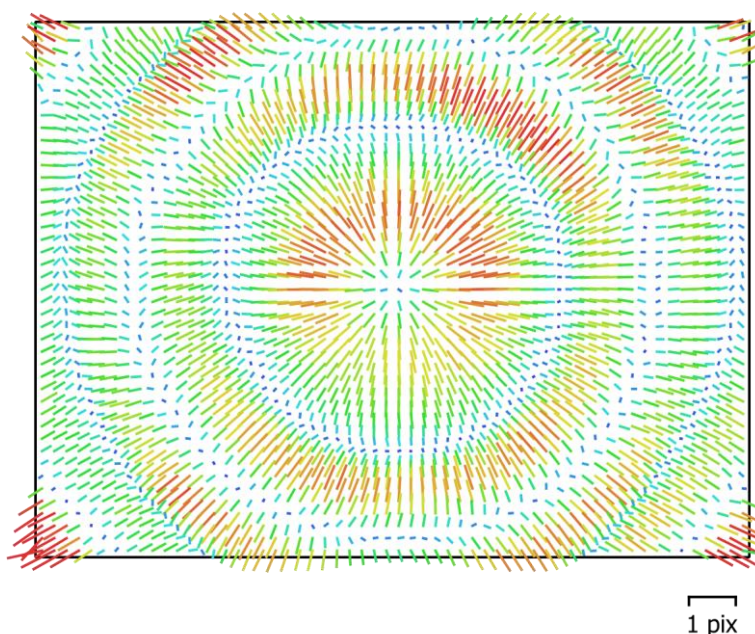


Fig. 2. Image residuals for M3E (12.29mm).

M3E (12.29mm)

140 images, precalibrated

Type Resolution

Focal Length

Pixel Size

Frame 5280 x 3956

12.29 mm

3.36 x 3.36
μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3739.83	1.6	1.00	-0.96	-0.22	-0.95	0.58	-0.95	0.92	0.10
Cx	6.54744	0.044		1.00	0.22	0.91	-0.55	0.90	-0.91	-0.10
Cy	-9.10918	0.012			1.00	0.22	-0.13	0.21	-0.21	-0.37
K1	-0.117218	0.00011				1.00	-0.68	0.88	-0.95	-0.12
K2	0.0106053	3.2e-05					1.00	-0.75	0.58	0.07
K3	-0.023118	6.3e-05						1.00	-0.84	-0.08
P1	-1.71088e-05	1.6e-06							1.00	0.11
P2	-0.000111824	4.5e-07								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

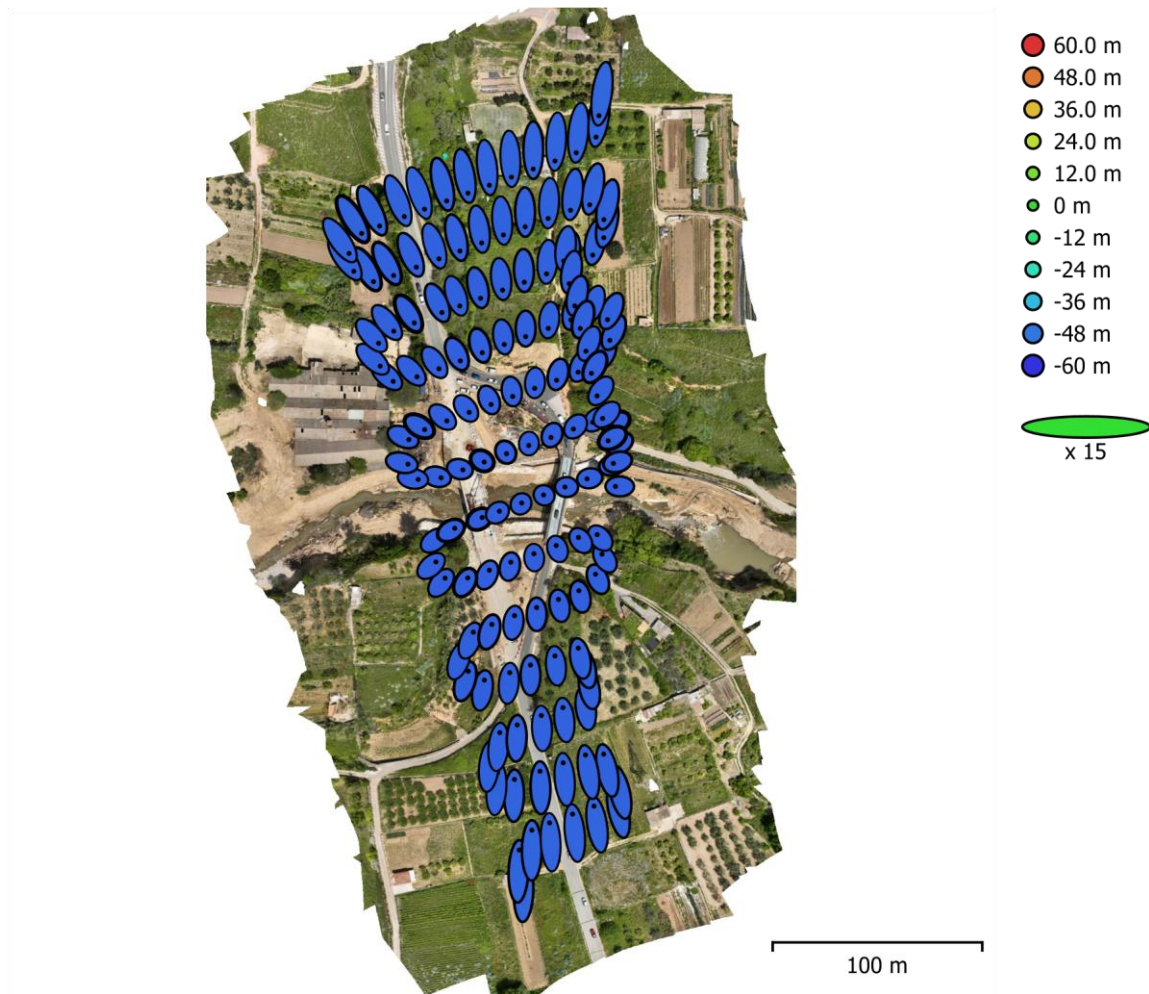


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
0.222973	0.70693	51.7637	0.741261	51.7691

Table 3. Average camera location error.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.
Ground Control Points

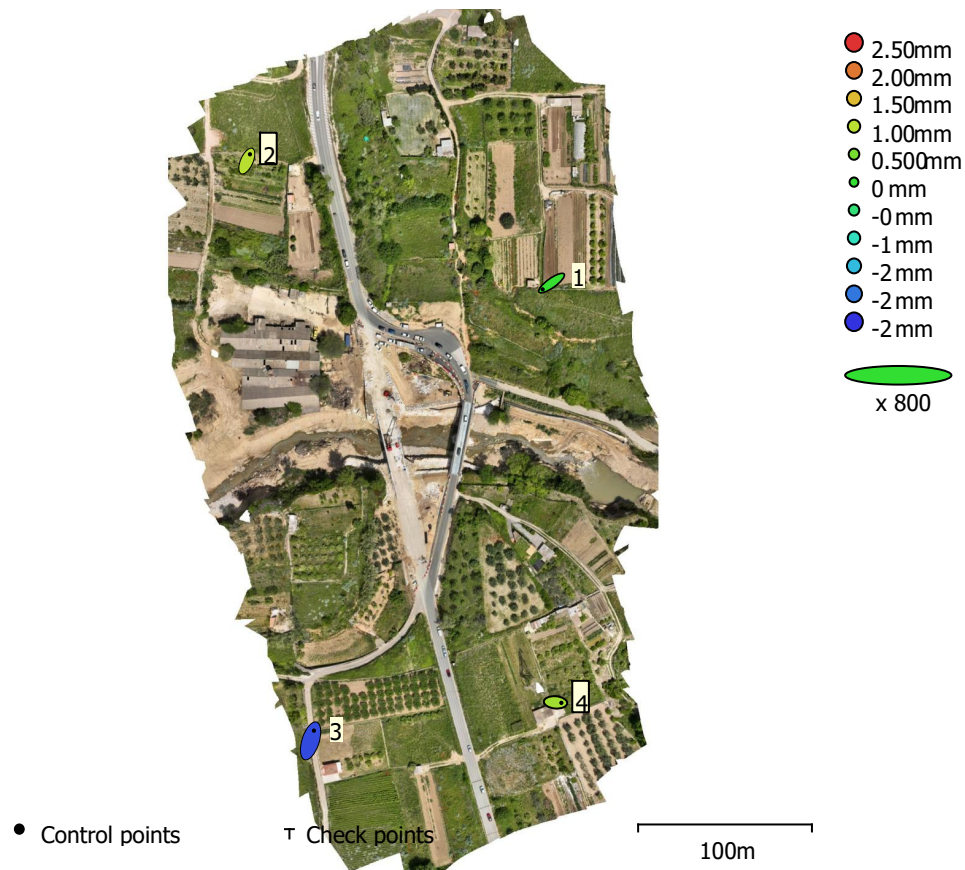


Fig. 4. GCP locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
4	0.834756	0.94665	0.132447	1.26213	1.26906

Table 4. Control points RMSE.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Table 5. Control points. X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
1	-1.28494	-0.86442	0.00249139	1.54864	9.798 (23)
2	0.44612	0.92728	0.0977083	1.03364	1.227 (9)
3	0.483529	1.40485	-0.232507	1.50382	3.969 (1)
4	0.838681	-0.0624304	0.0809718	0.84489	0.979 (9)
Total	0.834756	0.94665	0.132447	1.26906	7.313

Digital Elevation Model

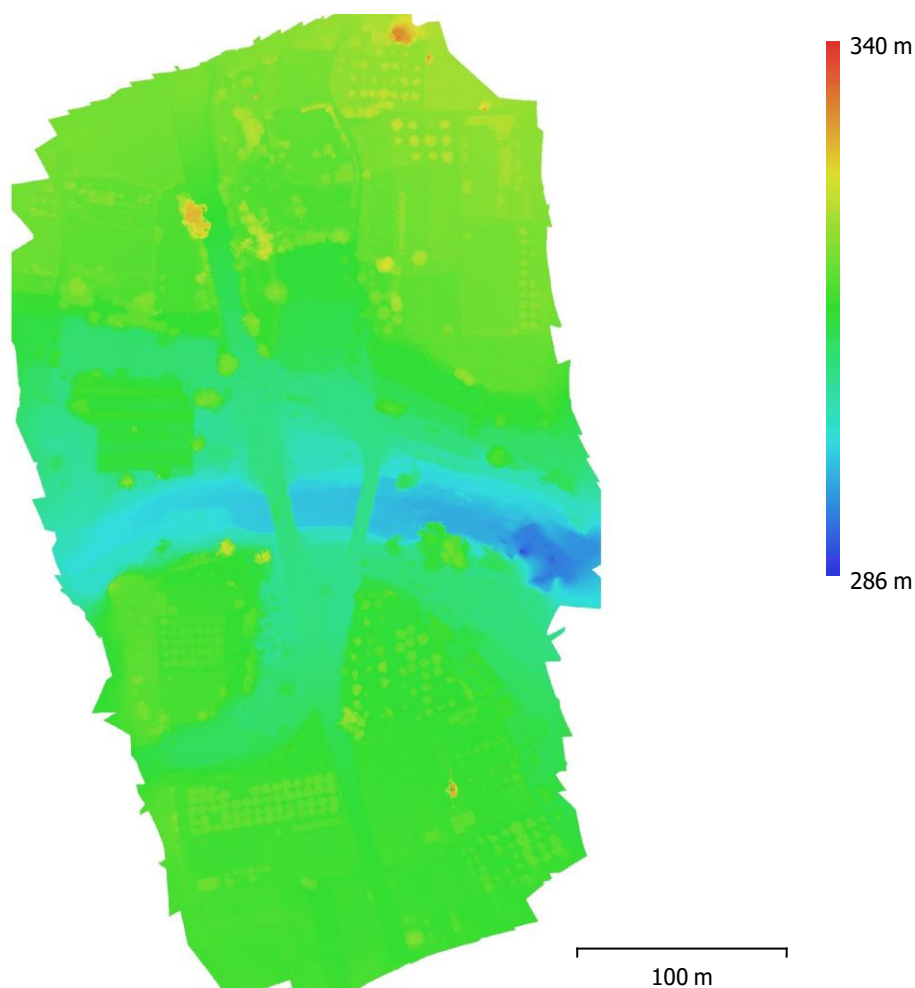


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 5.07 cm/pix

Point density: 389 points/m²

Processing Parameters

General

Images 140

Aligned images 140

Markers 4

Coordinate system ETRS89 / UTM zone 30N
(EPSG::25830)

Rotation angles Yaw, Pitch, Roll

Tie Points

Points 1,035,177 of 1,099,383

RMS reprojection error 0.227069 (1.00243 pix)

Max reprojection error 0.827446 (65.7912 pix)

Mean key point size 3.90694 pix

Point colors 3 bands, uint8

Key points No

Average tie point multiplicity 5.26869

Alignment parameters

Accuracy High

Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	400,000
Key point limit per Mpx	1,000
Tie point limit	40,000
Exclude stationary tie points	No
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	2 hours 34 minutes
Matching memory usage	3.22 GB
Alignment time	13 minutes 33 seconds
Alignment memory usage	701.79 MB
Optimization parameters	
Parameters	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Exclude corners	No
Optimization time	58 seconds
Date created	2025:06:20 09:58:56
Software version	2.1.3.18946
File size	115.24 MB
Depth Maps	
Count	140
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	1 hours 7 minutes
File size	1.20 GB
Point Cloud	
Points	55,594,628
Coordinate precision	1.27 cm
Point attributes	
Color	3 bands, uint8
Normal	
Confidence Point classes	1 - 66
Created (never classified)	55,594,628
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	1 hours 7 minutes
Point cloud generation parameters	
Source data	Depth maps
Processing time	11 hours 28 minutes
Date created	2025:06:21 00:07:20
Software version	2.1.3.18946

File size	798.78 MB
DEM	
Size	5,548 x 9,294
Resolution	5.07 cm/pix
Coordinate system	ETRS89 / UTM zone 30N
Reconstruction parameters	(EPSG::25830)
Source data	Point cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	43 seconds
Memory usage	326.50 MB
Date created	2025:06:23 07:49:47
Software version	2.1.3.18946
File size	142.23 MB
Orthomosaic	
Size	11,095 x 18,587
Resolution	2.54 cm/pix
Coordinate system	ETRS89 / UTM zone 30N
	(EPSG::25830)
Colors	3 bands, uint8
Orthophotos	1.53 GB
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
Processing time	4 minutes 42 seconds
Memory usage	2.04 GB
Date created	2025:06:23 07:54:42
Software version	2.1.3.18946
File size	1.76 GB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	2.1.3 build 18946
OS	Windows 64 bit
RAM	15.73 GB
CPU	12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12450H
GPU(s)	Intel(R) UHD Graphics

REPORTE AGISOFT METASHAPE CON CGSP SEMIAUTOMATICO

Processing Report

26 June 2025



Survey Data

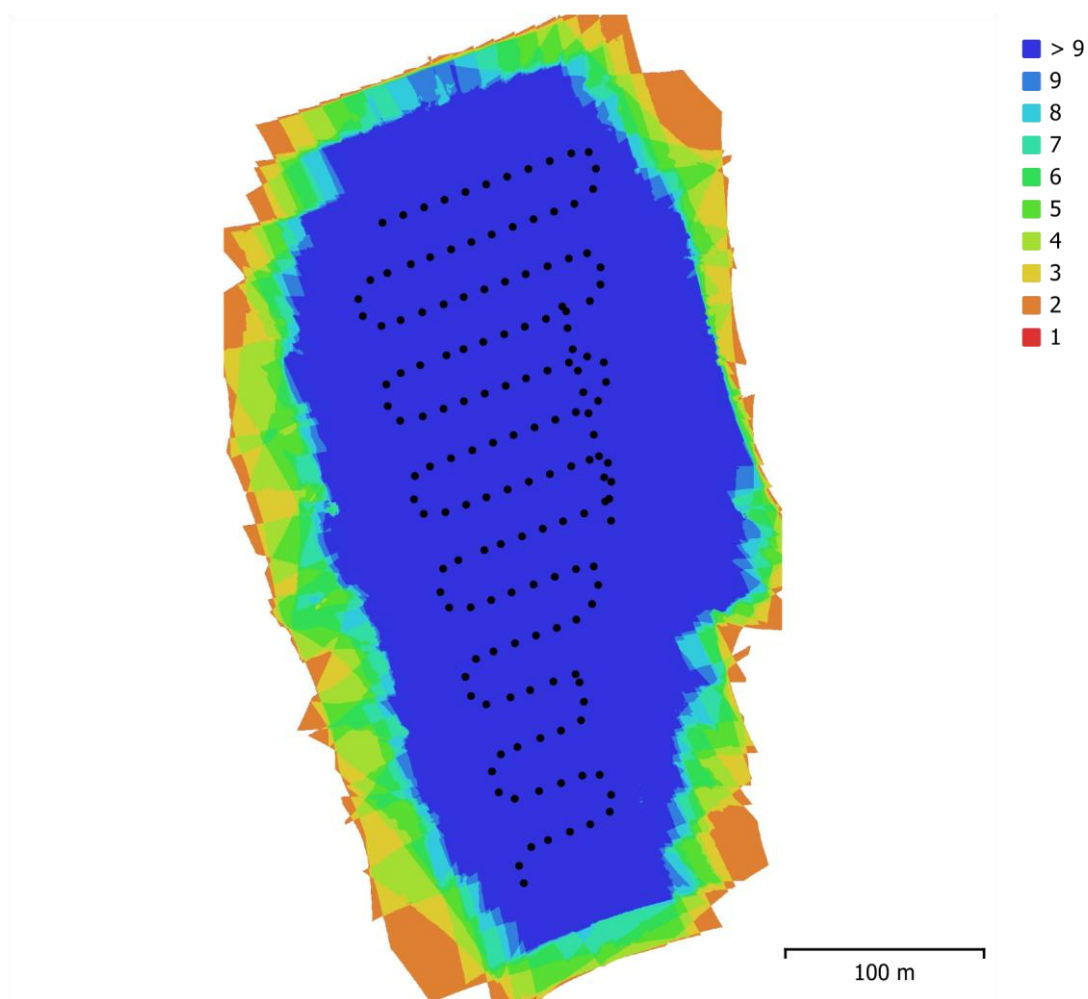


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	151	Camera stations:	151
Flying altitude:	98.5 m	Tie points:	1,119,442
Ground resolution:	2.52 cm/pix	Projections:	5,338,735
Coverage area:	0.107 km ²	Reprojection error:	1.01 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
M3E (12.29mm)	5280 x 3956	12.29 mm	3.36 x 3.36 μm	Yes

Table 1. Cameras.
Camera Calibration

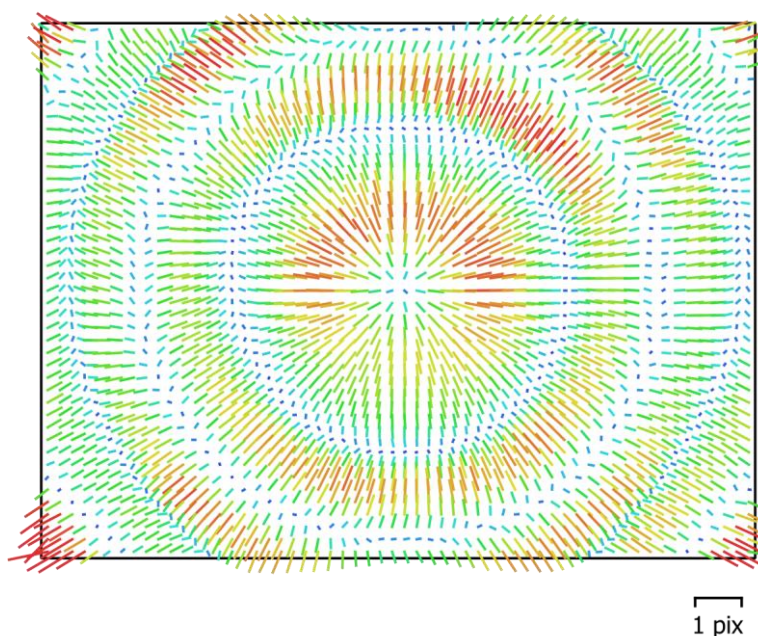


Fig. 2. Image residuals for M3E (12.29mm).

M3E (12.29mm)

151 images, precalibrated

Type Resolution

Focal Length

Pixel Size

Frame 5280 x 3956

12.29 mm

3.36 x 3.36
μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3758.49	1.6	1.00	-0.96	-0.23	-0.98	0.58	-0.95	0.94	0.11
Cx	6.129	0.042		1.00	0.22	0.94	-0.55	0.91	-0.93	-0.11
Cy	-9.09273	0.011			1.00	0.22	-0.13	0.21	-0.21	-0.40
K1	-0.116833	0.0001				1.00	-0.66	0.94	-0.95	-0.11
K2	0.0103722	3.1e-05					1.00	-0.78	0.57	0.07
K3	-0.0241222	6.2e-05						1.00	-0.88	-0.10
P1	-1.92009e-05	1.6e-06							1.00	0.11
P2	-0.000114333	4.4e-07								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.
Camera Locations

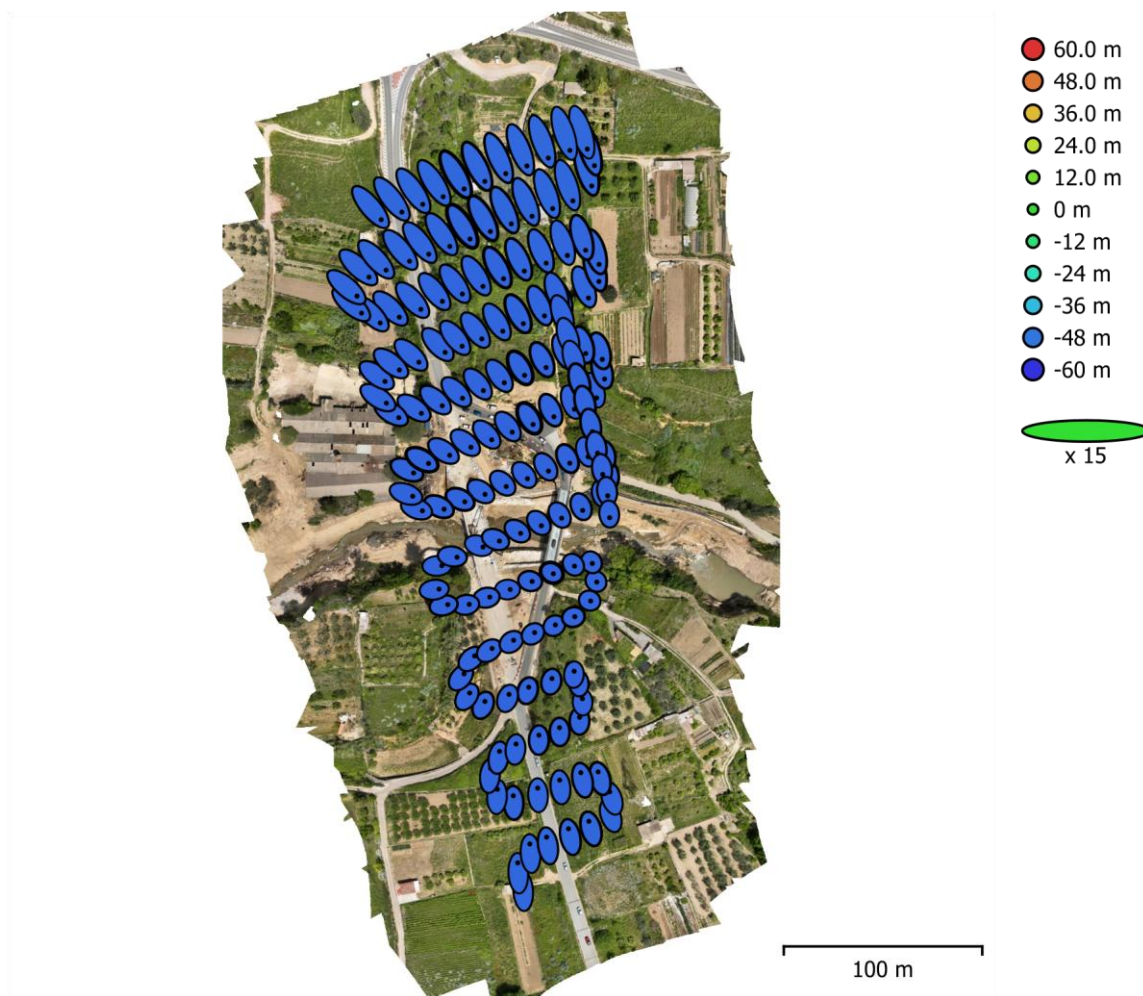


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
0.339526	0.563239	51.0064	0.657659	51.0106

Table 3. Average camera location error.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.
Ground Control Points

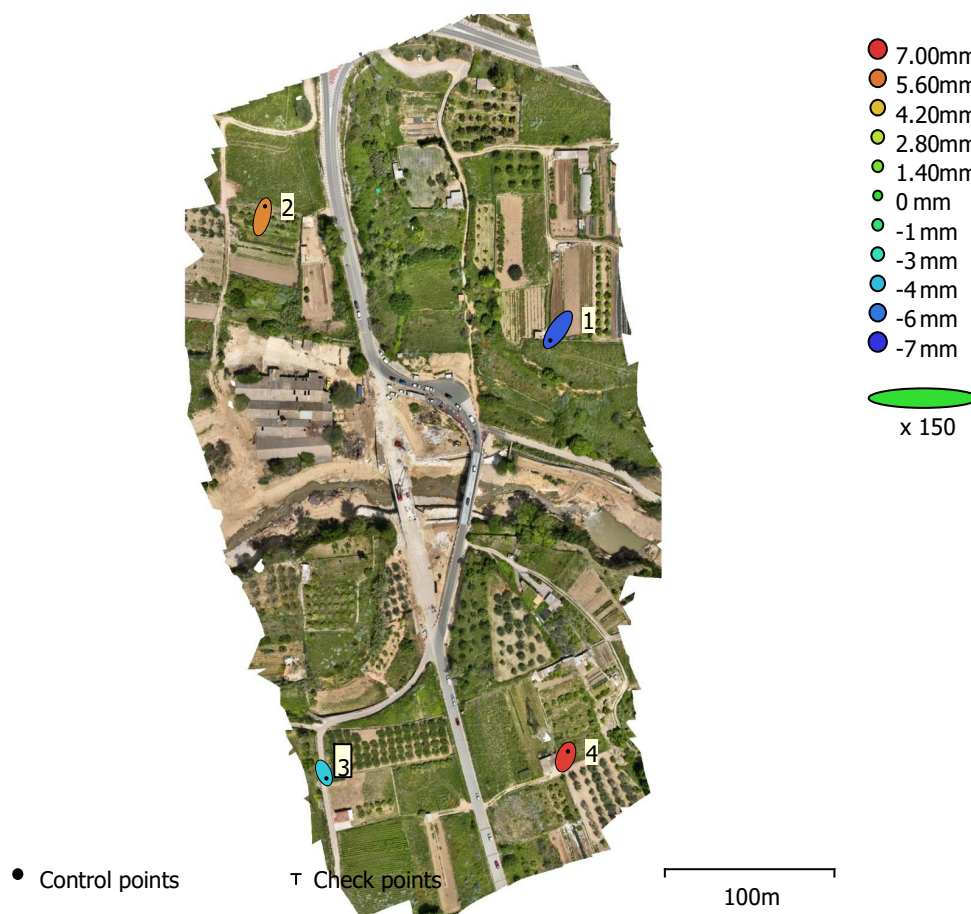


Fig. 4. GCP locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
4	3.45375	6.21262	0.564457	7.10809	7.13047

Table 4. Control points RMSE.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
1	-5.97804	-7.78871	-0.617993	9.83783	8.229 (10)
2	2.1964	7.75539	0.527047	8.07763	2.929 (8)
3	1.94472	-4.08005	-0.394242	4.53698	4.055 (3)
4	1.83591	4.11454	0.677737	4.55624	1.775 (9)
Total	3.45375	6.21262	0.564457	7.13047	5.239

Table 5. Control points. X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

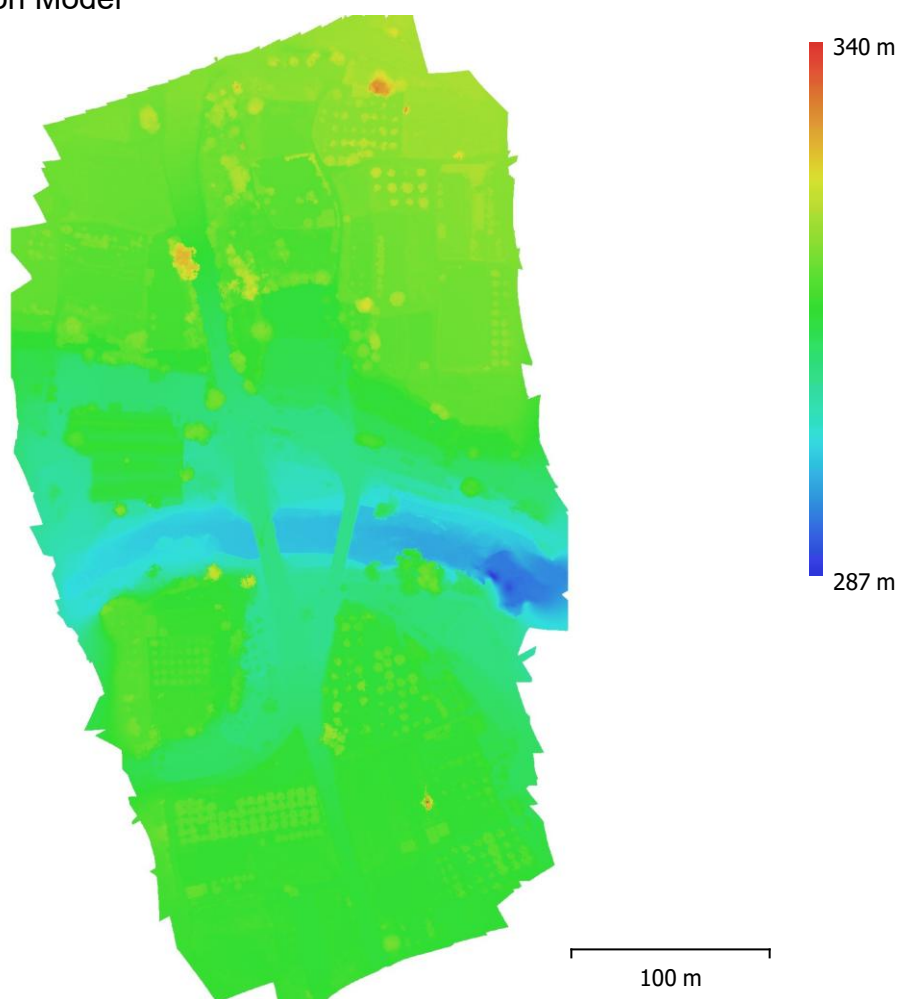


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 5.05 cm/pix

Point density: 392 points/m²

Processing Parameters

General

Images

151

Aligned images

151

Markers

4

Coordinate system

ETRS89 / UTM zone 30N
(EPSG::25830)

Rotation angles

Yaw, Pitch, Roll

Tie Points

Points

1,119,442 of 1,189,120

RMS reprojection error

0.228295 (1.01137 pix)

Max reprojection error

0.829005 (65.7995 pix)

Mean key point size

3.90144 pix

Point colors

3 bands, uint8

Key points

No

Average tie point multiplicity	5.25249
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	400,000
Key point limit per Mpx	1,000
Tie point limit	40,000
Exclude stationary tie points	No
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	1 hours 29 minutes
Matching memory usage	3.72 GB
Alignment time	6 minutes 52 seconds
Alignment memory usage	861.81 MB
Optimization parameters	
Parameters	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Exclude corners	No
Optimization time	1 minutes 14 seconds
Date created	2025:06:25 14:26:41
Software version	2.1.3.18946
File size	124.35 MB
Depth Maps	
Count	151
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	1 hours 13 minutes
Memory usage	6.10 GB
Date created	2025:06:25 16:43:13
Software version	2.1.3.18946
File size	1.29 GB
Point Cloud	
Points	59,437,689
Point attributes	
Color	3 bands, uint8
Normal	
Confidence Point classes	1 - 67
Created (never classified)	59,437,689
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	1 hours 13 minutes

Memory usage	6.10 GB
Point cloud generation parameters	
Source data	Depth maps
Processing time	3 hours 22 minutes
Memory usage	7.79 GB
Date created	2025:06:25 20:05:31
Software version	2.1.3.18946
File size	853.87 MB
DEM	
Size	5,561 x 9,860
Resolution	5.05 cm/pix
Coordinate system	ETRS89 / UTM zone 30N
Reconstruction parameters	(EPSG::25830)
Source data	Point cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	30 seconds
Memory usage	321.85 MB
Date created	2025:06:25 21:18:11
Software version	2.1.3.18946
File size	150.92 MB
Orthomosaic	
Size	11,122 x 19,720
Resolution	2.52 cm/pix
Coordinate system	ETRS89 / UTM zone 30N
	(EPSG::25830)
Colors	3 bands, uint8
Orthophotos	1.66 GB
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
Processing time	4 minutes 5 seconds
Memory usage	1.90 GB
Date created	2025:06:25 21:26:24
Software version	2.1.3.18946
File size	1.91 GB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	2.1.3 build 18946
OS	Windows 64 bit
RAM	15.73 GB
CPU	12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12450H
GPU(s)	Intel(R) UHD Graphics