



UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA
CENTRO UNIVERSITARIO DE MÉRIDA
GRADO EN INGENIERÍA EN GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA

TRABAJO FIN DE GRADO

**ORTOFOTO DEL CENTRO UNIVERSITARIO
DE MÉRIDA**

Autor: Álvaro González González
Fdo.:

Tutor: Juan Antonio Pérez Álvarez
Fdo.:

Índice

1. Objetivos	1
2. Introducción	1
2.1. Descripción de la zona	1
3. Equipo utilizado	2
3.1. VANT, vehículo aéreo no tripulado	3
3.1.1. Reseña histórica	4
3.1.2. Ventajas y desventajas	4
3.1.3. Clasificación de los VANT de uso fotogramétrico	5
3.1.4. Cuadricóptero F450	8
3.1.5. Cámara GoPro Hero 4 black	9
3.2. Leica GPS 1200	10
3.3. Estación total Leica TCR 307	11
4. Programas empleados	12
4.1. Programa para la planificación de vuelos	12
4.2. Programa de gestión y procesamiento de datos fotogramétricos	13
4.3. Programa para el tratamiento de datos	14
4.4. Programa de dibujo y modelado asistido por ordenador	15
4.5. Programa para cálculos topográficos	16
5. Metodología	17
5.1. Desarrollo del trabajo de campo	17
5.1.1. Señalización de puntos de apoyo y de control	17
5.1.2. Ejecución del vuelo	19
5.1.3. Toma de datos de puntos de apoyo y de control	20
5.1.4. Levantamiento	21
5.1.5. Radiación	22
5.2. Desarrollo del trabajo de gabinete	26
5.2.1. Planificación y resolución del vuelo	26
5.2.2. Procesamiento de imágenes digitales	27
5.2.3. Ajuste y comparación de resultados	35
5.2.4. Gestión de los datos del levantamiento	37
5.2.5. Gestión de los datos de la radiación	38
5.2.6. Cálculo del modelo digital de elevaciones	42
5.2.7. Comparación de MDEs generados	45

6. Conclusiones_____	49
7. Bibliografía consultada y páginas web_____	52

Índice de anexos

Anexo 1. Tabla de POE	
Anexo 2. Calculo de recubrimientos	
Anexo 3. Puntos de apoyo y control	
Anexo 4. Tabla de coordenadas relativas de los puntos del levantamiento en el Centro Universitario	
Anexo 5. Datos de la radiación	
Anexo 6. Datos de los marcadores	
Anexo 7. Calculo de errores planimétricos y altimétricos	
Anexo 8. Transformación 3D conforme	
Anexo 9. Tabla de coordenadas absolutas de los puntos del levantamiento en el Centro Universitario	
Anexo 10. Coordenadas calculadas de los puntos de la radiación	

Planos

Plano 1. Ortofoto del Centro Universitario de Mérida_____	54
---	----

1. OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto es obtener un documento fotográfico preciso del Centro Universitario de Mérida, corregido de las deformaciones producidas en la imagen por el relieve y la inclinación de la fotografía, la cual nos permitirá aprovechar el contenido informativo de la fotografía aérea y realizar las mismas medidas que en un plano gráfico.

Por otro lado, se generarán dos modelos digitales de elevaciones mediante procedimientos diferentes con el fin de valorar las ventajas y desventajas que aportan a este tipo de proyectos. El primero se generará a partir de los datos obtenidos del vuelo fotogramétrico, y el segundo generado a partir de la toma de datos realizadas mediante técnicas y equipos de topografía clásica.

Para ello dispondremos de la tecnología más actual, como es en el caso de los UAV, RPAS, etc. que junto con las herramientas de topografía clásica permitirán desarrollar la totalidad del trabajo.

2. INTRODUCCIÓN

Actualmente tenemos la necesidad de cartografiar el entorno que nos rodea con la mayor brevedad y reducción de costes posibles.

Una de las técnicas más empleadas para subsanar esta necesidad es la fotogrametría. Dicha técnica es el conjunto de métodos y procedimientos, donde obtenemos información fiable acerca de objetos físicos y de su entorno mediante procesos de registro, medida e interpolación de imágenes y representaciones digitales producidas desde sensores que no mantienen contacto con el objeto. En esta técnica la principal fuente de información es la fotografía, siendo ésta una representación plana del objeto o superficie.

Este estudio surge de la necesidad previamente citada y a nivel personal como primera toma de contacto con una nueva tecnología.

2.1. Descripción de la zona

La zona de actuación, que se puede observar en la figura 1, corresponde a la superficie del Centro Universitario de Mérida, con una extensión aproximada de 5 hectáreas. Se trata de un terreno de topografía suave, prácticamente regular.

Limita al norte con la calle Aguadores, al este con la Avda. Santa Teresa de Jornet y al oeste con la calle Anas.

El recinto encierra diversas instalaciones:

- El aulario, que recibió el nombre de Edificio Antonio Castillo Martínez.
- El edificio administrativo.
- El edificio de investigación.
- Zonas verdes, una parte de ella destinada a un jardín Mediterráneo.
- Aparcamientos.
- Pistas deportivas.



Figura 1. Centro Universitario de Mérida

3. EQUIPO UTILIZADO

Para el desarrollo del proyecto se han utilizado diferentes herramientas y accesorios:

- Sistema completo de aeronave no tripulada (Cuadricóptero F450).
- Leica GPS 1200.
- Leica TCR 307.
- Jalón.
- Prisma.
- Trípode.

- Cinta métrica.
- Pintura en spray.
- Plantilla del patrón utilizado para definir los puntos.
- Plantilla adhesiva.

3.1. VANT, vehículo aéreo no tripulado

Un vehículo aéreo no tripulado (VANT), UAV (del inglés unnamed aerial vehicle) o comúnmente dron, es una aeronave que vuela sin tripulación. Un VANT es un vehículo sin tripulación reutilizable, capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de explosión, eléctrico o de reacción. La definición jurídica en España la encontramos en el recién modificado Real Decreto 1489/1994, de 1 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Circulación Aérea Operativa, que dice así:

“Vehículo aéreo no tripulado: Vehículo aéreo propulsado que no lleva personal como operador a bordo. Los vehículos aéreos no tripulados incluyen solo aquellos vehículos controlables en los tres ejes. Además, un VANT:

a) Se mantiene en vuelo por medios aerodinámicos.

b) Se pilota de forma remota o incluye un programa de vuelo automático.

c) Puede ser reutilizado.

d) No puede usarse como un arma guiada o un dispositivo similar.”

El amplio abanico de funciones que ofrecen estas aeronaves permite distinguir cuatro grandes campos en función del colectivo que los utilice:

- Uso militar.
- Uso privado.
- Uso en servicios públicos.
- Uso civil o drones de recreo.

A continuación, se definen algunos términos usados en este campo y que provienen del inglés:

- UA (Unmanned Aircraft). Término genérico para referirse a las aeronaves no tripuladas, sin tener en cuenta si son autónomas o tripuladas por control remoto (RPA).

- UAS (Unmanned Aerial System). Término genérico para referirse al sistema de aeronaves tripuladas. A diferencia del UA que se refiere exclusivamente a la propia aeronave, el sistema integra el dispositivo, el enlace de comunicaciones y la estación de tierra.
- UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Concepto en desuso, de ámbito militar, para referirse literalmente a los vehículos aéreos no tripulados.
- RPA (Remotely Piloted Aircraft). Término para denominar a las aeronaves no tripuladas que son operadas mediante control remoto. Aplicado principalmente a los dispositivos destinados a la aviación comercial.
- RPAS (Remotely Piloted Aircraft System). Término para denominar al sistema completo (aeronave, enlace de comunicaciones y estación de tierra) de las aeronaves no tripuladas que son operadas mediante control remoto.

3.1.1. Reseña histórica

El desarrollo de los VANT abarca parte del siglo XIX dónde se utilizaban este tipo de tecnología para fines militares, hasta la actualidad.

En la Primera Guerra Mundial se desarrollaron los misiles crucero, controlados por un sistema de giroscopios. También se usaron aviones de radio control para entrenar a los tiradores antiaéreos de algunos cuerpos militares.

En las guerras de Vietnam y Corea, para los estadounidenses los VANT fueron una forma de desviar los ataques enemigos de sus bombarderos y cazas tripulados y se desarrollaron los primeros VANT de reconocimiento.

Fue una tecnología que evolucionó durante décadas por y para el ámbito militar.

En la década de los 80 surge la expansión de los RPAS, esto unido al gran desarrollo de la informática y a la fotogrametría digital hace que esta tecnología haya sido aplicada en el ámbito de la fotogrametría.

3.1.2. Ventajas y desventajas

La adaptación de este tipo de tecnología a la topografía ha supuesto un gran avance, las diversas ventajas son notables y entre ellas cabe destacar:

- Los costes de los trabajos realizados con esta tecnología son mas económicos que los que disponíamos hasta el momento.

- Eficacia, con los vuelos de drones se pueden obtener millones de puntos a color que ayudan a la representación del terreno para obtener modelos digitales de elevaciones.
- Alta resolución.
- Rapidez, con esta técnica se consigue reducir los tiempos de procesado, haciendo también que disminuyan los costes de trabajo.
- La posibilidad de visualizar el vuelo mientras se realiza.
- Todos los resultados derivados son en formato digital, con las ventajas de almacenamiento, manipulación, visualización, etc., que supone.
- La capacidad de acceder a áreas de estudio poco accesibles a pie.
- Equipo de bajo coste.

A pesar de las fuertes ventajas que nos aportan también cabe destacar algunas de sus desventajas:

- La distancia de vuelo está limitada y regulada por la ley vigente en España. Actualmente la distancia viene marcada en 500 metros de distancia respecto al punto de despegue para un dron que se encuentre entre 2 y 25kg (peso de despegue). Para un dron que no supere los 2 kg la distancia vendría limitada por el radio de alcance de la emisión de radio de la estación de control.
- La altura de vuelo máxima que se puede alcanzar con este tipo de VANT no podría superar los 120 metros en el ámbito español.
- La autonomía, se podría decir que es la desventaja más importante, las baterías suelen ofrecer un tiempo de vuelo muy limitado. Cualquier factor afecta a la duración de la misma. Pese a todo es algo que puede tener solución planificando varios vuelos para zonas de estudio muy amplias y disponiendo de varias baterías.

3.1.3. Clasificación de los VANT de uso fotogramétrico

Actualmente es muy amplia la variedad de VANT que se pueden encontrar en el mercado con multitud de aplicaciones diferentes. A continuación, se citan aquellos más destinados a estudios fotogramétricos.

VANT multirrotores

Es la herramienta más extendida en la actualidad, ya que nos proporciona una gran versatilidad y eficacia en las operaciones. Son muy simples a la hora de pilotarlos y se montan rápidamente. Los motores están distribuidos a la misma distancia del centro de gravedad lo que nos ofrece una plataforma bastante estable.

Según la cantidad de motores lo clasificamos en (figura 2):

- Tricópteros (3 motores).
- Cuadricóptero (4 motores).
- Hexacóptero (6 motores).
- Octocópteros (8 motores).

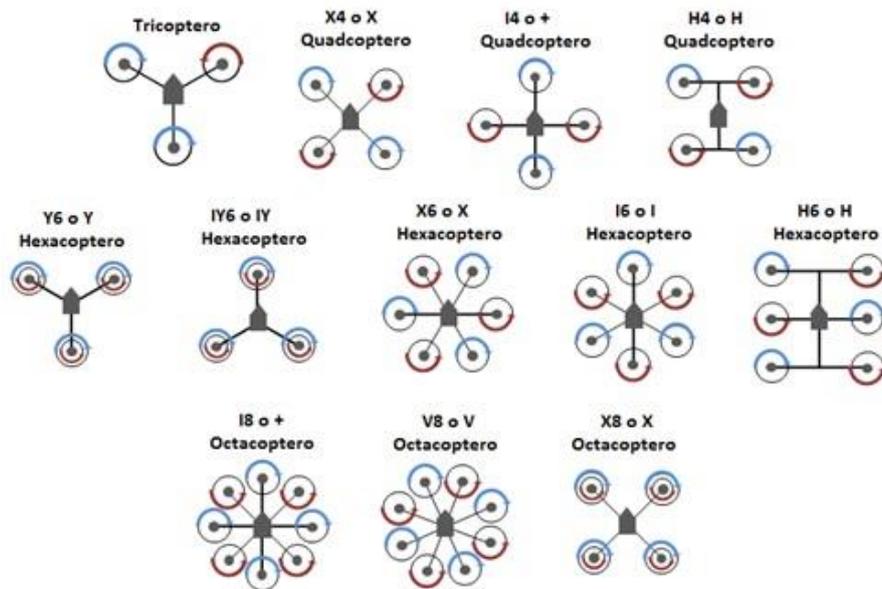


Figura 2. Clasificación dependiendo del número de motores

También existen los multirrotores coaxiales, son aquellos que disponen dos motores por brazo.

Cabe destacar que ante las numerosas ventajas que ofrece este tipo de VANT, su principal desventaja es la autonomía, no superando los 15-25 minutos de vuelo de media.

VANT de ala fija

Este tipo de VANT (figura 3) es el de mayor autonomía. Según venga equipado con un motor de explosión o un motor eléctrico, puede permanecer volando varias horas. Unas de las ventajas que aportan los ala fija, a parte de la autonomía, es la aerodinámica, la cual le permite planear sin necesidad de tener el motor en funcionamiento.

No obstante, el ala fija, tiene unos fines muy específicos lo que le resta versatilidad a la hora de su uso. Su principal desventaja surge con el despegue y el aterrizaje, al no poder realizar ninguno de los dos verticalmente, tendremos que disponer de un área acotada que sea plana y sin obstáculos.



Figura 3. VANT ala fija

VANT helicóptero

Están clasificados como los más polivalentes a la hora de realizar todo tipo de operaciones (figura 4). Al poseer un único motor con una hélice de gran tamaño le permite una gran capacidad de carga y autonomía. Los helicópteros son más eficientes aerodinámicamente que los multirrotores, ya que los multirrotores varían las revoluciones constantemente para mantenerse estable. Sin embargo, los helicópteros son muy complejos a nivel mecánico y hay que estar ajustándolos constantemente para obtener un vuelo óptimo. A la hora de pilotarlos son bastante complicados.



Figura 4. VANT Helicóptero

3.1.4. Cuadricóptero F450

Para la realización del proyecto se utilizó el VANT Cuadricóptero F450 similar al de la figura 5, con una controladora de vuelo Ardupilot Mega versión 2.7, basada en el software libre Arduino, la cual nos permite la realización de rutas de vuelo totalmente automáticas, planificadas con el software libre Mission Planner.

La elección de este vehículo se debe a que reúne todas las características necesarias para llevar a cabo cualquier trabajo fotogramétrico, teniendo un coste sustancialmente inferior a las demás alternativas disponibles, ofreciendo las mismas características que equipos mucho más caros. También permite la modificación de algunas de sus especificaciones y/o características, adecuándolo en cualquier momento a las necesidades del proyecto.

Este VANT Cuadricóptero permite una carga máxima adicional de hasta 2.7 kg gracias a sus motores sin escobillas SkyRc 2830. Va equipado con un receptor GNSS de 72 canales (Ublox M8N) que permitirá recibir señales de las constelaciones GPS, Galileo; GLONASS y BeiDou alcanzando una precisión máxima de 1 metro en el posicionamiento del Cuadricóptero. Además, va equipado con una conexión por radio de 2.4 GHz y conexión por telemetría, la cual indicara en todo momento la posición del vehículo aéreo, así como la autonomía del mismo, entre otros parámetros. Esta conexión se realiza enlazando el VANT mediante un módulo de radio 3DR con un Smartphone y la aplicación Tower a una frecuencia de 433Mhz.

Con el objetivo de mantener la cámara lo mas horizontal posible va estabilizada mediante un gimbal de 3 ejes de la casa Feiyu Tech, el cual permite tener la cámara orientada hacia adelante y con el eje óptico perpendicular al terreno durante todo el vuelo.



Figura 5. VANT Cuadricóptero F450

3.1.5. Cámara GoPro Hero 4 black

La cámara utilizada para la realización de las fotografías será una Gopro Hero 4 black (figura 6). Con una lente de 5.2 mm modificada y una resolución de 4000 x 3000 pixeles.

Posee un sensor óptico CMOS con una resolución de 12 megapíxeles. También dispone de diferentes velocidades de disparo, a 10, 5 o 3 fotogramas por segundos.



Figura 6. GoPro Hero 4

3.2 Leica GPS 1200

El GPS es una herramienta que proporciona datos topográficos y cartográficos de alta precisión. La recopilación de datos basados en el GPS es mucho más rápida que las técnicas convencionales de topografía y cartografía, ya que reduce la cantidad de equipos y la mano de obra que se requiere.

Los instrumentos de medición Leica system 1200 (figura 7) están catalogados como extremadamente eficientes y fiables, capaces de aguantar los entornos más severos.

Algunas de las características destacables de estos equipos en la actualidad son:

- GPS1200, usa las mejores baterías disponibles de alta capacidad para una alimentación fiable y de larga duración.
- Actualmente son equipos con compatibilidad entre GNSS y TPS gracias a las tarjetas CompactFlash que utilizan, ya que poseen los mismos formatos y gestión de datos, y pueden pasarse de un equipo a otro.
- La tecnología SmartTrack que actualmente poseen, recibe todas las señales GNSS disponibles (L2C y GLONASS). Más satélites significa más productividad, precisión y fiabilidad. SmartTrack recibe satélites en segundos, ideal en entornos urbanos y obstruidos donde a menudo otros receptores pierden la señal. Están diseñados para soportar futuras señales GPS L5 y Galileo.
- El control continuo de satélites disponibles proporciona la más elevada fiabilidad posible. Un sistema particular de monitorización integral incorporado revisa todos los resultados inmediatamente. SmartCheck procesa ahora las mediciones con GPS y GLONASS simultáneamente para obtener precisión centimétrica, 20 Hz RTK a 30 km y más.



Figura 7. Leica GPS 1200

3.3. Estación total Leica TCR 307

La estación total utilizada para el desarrollo del trabajo de campo ha sido la Leica TCR 307 (figura 8).

Una estación total es un instrumento electro-óptico que consiste en la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador a un teodolito electrónico.

La estación total cuenta con diversos programas sencillos que permiten llevar a cabo la mayoría de las tareas topográficas de forma fácil, rápida y óptima. Proporciona, entre otras cosas, el cálculo de coordenadas en campo, replanteo de puntos de manera sencilla y eficaz y el cálculo de rumbos y distancias.



Figura 8. Leica TCR 307

Algunas de sus características son:

- Anteojo:
 - Totalmente basculante.
 - Aumentos 30x.
 - La distancia mínima de enfoque es de 1,7 metros.
 - Campo visual de 1,6 gon.
- Medida de ángulo:
 - Desviación típica, según DIN 18723/ISO 12857, 2 mgon.
 - Posibilidad de elegir diferentes unidades de medida.
 - Precisión de estabilización en el compensador de 0,7 mgon.

4. PROGRAMAS EMPLEADOS

A continuación, se muestra una breve descripción de los programas informáticos utilizados para el tratamiento de los datos obtenidos con los diferentes equipos.

4.1. Programa para la planificación de vuelos

Actualmente existen gran variedad de programas y aplicaciones destinadas a la planificación de vuelos para vehículos aéreos no tripulados. Algunos de los mas populares son:

- DJI Ground Station Pro
- Pix4d Capture
- UGCS
- Mission Planner
- Litchi
- DroneDeploy

Cada programa posee diferentes características y limitaciones, por lo que es importante comparar entre varios programas para ver cual se ajusta mejor a las necesidades del proyecto. En este caso se ha optado por el programa Mission Planner, la principal razón para utilizar este programa es que permite cambiar los parámetros de la controladora de vuelo.

Mission Planner (figura 9) es una aplicación, creada por Michael Osborne, de estación de control terrestre con todas las funciones para el proyecto de piloto automático de código abierto ArduPilot.

Es compatible solo con Windows. Se puede utilizar como una herramienta de configuración o como un suplemento de control dinámico para un VANT.

Se citan a continuación algunas de las funciones que ofrece Mission Planner:

- Cargar el software en el piloto automático (APM, PX4 ...) que controla el VANT.
- Configurar y ajustar el VANT para un rendimiento óptimo.
- Planificar, guardar y cargar las misiones autónomas en el piloto automático con una sencilla entrada de punto y compatibilidad con gran variedad de fuentes cartográficas (Google, Yahoo, Open Street).
- Descargar y analizar los registros de la misión creados por el piloto automático.

- Interfaz con un simulador de vuelo de PC para crear un simulador de VANT completo de hardware en el circuito.

Con el hardware de telemetría apropiado, se puede:

- Controlar el estado del VANT mientras está en funcionamiento.
- Registrar los registros de telemetría que contienen mucha más información que los registros del piloto automático de a bordo.
- Ver y analizar los registros de telemetría.
- Operar el VANT en FPV (vista en primera persona).
- Todas estas y muchas características más están cubiertas con este software.



Figura 9. Programas Mission Planner

4.2. Programa de gestión y procesamiento de datos fotogramétricos

Hay diferentes programas para el procesamiento de imágenes digitales, todo dependerá del objetivo de nuestro trabajo. Se pueden encontrar programas como: PhotoMod Lite, 123D Catch, Agisoft PhotoScan, etc. en este estudio se ha optado por el programa Agisoft PhotoScan.

Agisoft PhotoScan (figura 10) es un programa que permite incorporar fotografías realizadas con VANT y comenzar un proceso de restitución de imágenes por coincidencia espacial entre los elementos representados en cada una de las imágenes. Llegando a visualizar las fotografías realizadas en altura y volúmenes generados a partir de la representación espacial de los objetos proyectados en la superficie.

Siempre que se haya realizado el vuelo correctamente y se disponga de las coordenadas de los puntos nadir, el programa puede hacer el análisis y la producción cartográfica a partir de una secuencia de pasos en cascada.

En un primer lugar se realiza una alineación de las imágenes con el fin de buscar puntos espaciales coincidentes por el recubrimiento de las imágenes. A continuación, se creará una nube de puntos densa que comenzará a reconstruir el modelo de una manera más o menos realista. Pese a no representar una malla ráster continua, mostrará la nube de puntos mediante valores RGB pudiendo apreciar con cierta nitidez la zona territorial.

Posteriormente se puede construir diferentes Modelos Digitales de Terreno. Entre otros se pueden construir mallas, modelos de texturas, MDE y finalmente realizar la reconstrucción del modelo sustituyendo la nube de puntos por una malla continua basada en resoluciones de píxel apropiados para el mosaico que se puede equiparar a la resolución de los ráster MDE derivados.

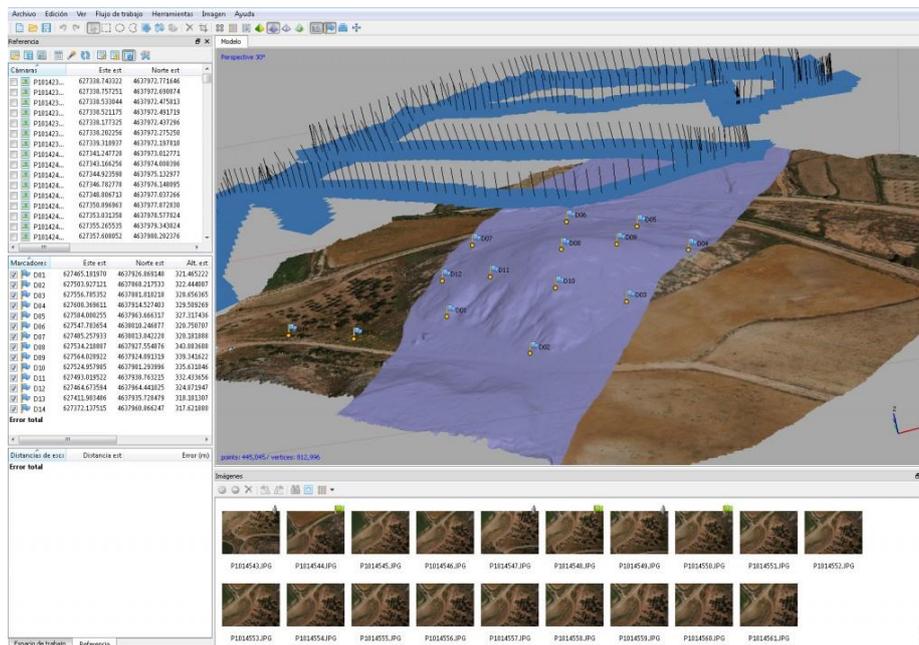


Figura 10. Programa Agisoft PhotoScan

4.3. Programa para el tratamiento de datos

Puede emplearse cualquier tipo de programa informático que permita el tratamiento de grandes nubes de puntos, imágenes digitales, etc. existe en el mercado una gran variedad de productos, por ejemplo, ArcGIS, QGIS, ArcMap, Global Mapper, etc. Se ha

elegido la última opción, por sus diferentes herramientas, manejo y disponibilidad gratuita.

Global Mapper (figura 11) que es una potente aplicación que combina una amplia gama de herramientas de tratamiento de datos espaciales con acceso a una gran variedad de formatos de datos, así como acceso directo a bases de datos espaciales comunes, esta notable aplicación puede leer, escribir y analizar todos sus datos actuales.

También dispone de la opción de leer datos LIDAR en formatos LAS 1.4 y LASzip.

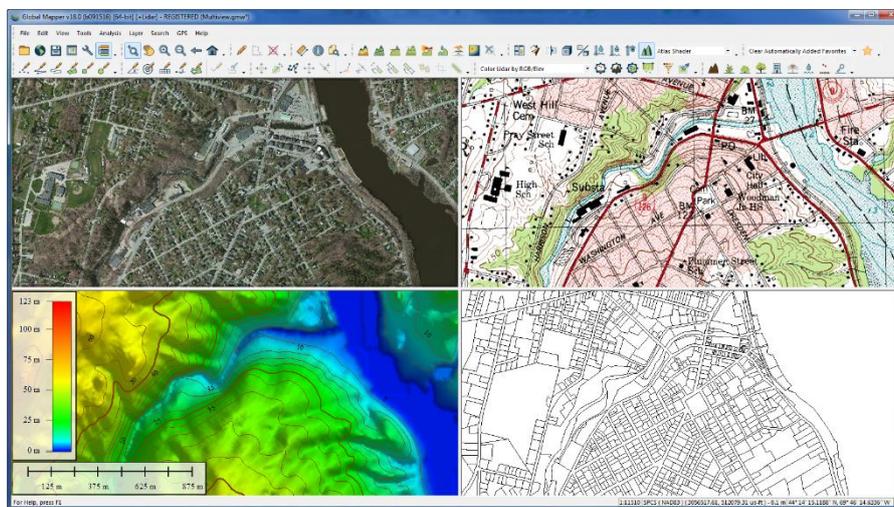


Figura 11. Programa Global Mapper

4.4. Programas de dibujo y modelado asistido por ordenador

Se pueden encontrar diferentes programas para el dibujo asistido por ordenador o para el modelado. Para la realización del proyecto se ha elegido el programa AutoCAD de la compañía Autodesk, que tiene como herramienta una aplicación para el tratamiento de modelos digitales llamada MDT4.

MDT (figura 12) es una aplicación del programa AutoCAD, que permite cargar nube de puntos, modelar un terreno usando puntos tomados por cualquier estación total o GPS, generar curvas de nivel, obtener perfiles longitudinales o transversales, calcular volúmenes por diferencia de mallas o perfiles.

Esta aplicación ayudará al tratamiento de los puntos obtenidos con la estación total Leica TCR 307 y el GPS de las fases de levantamiento.

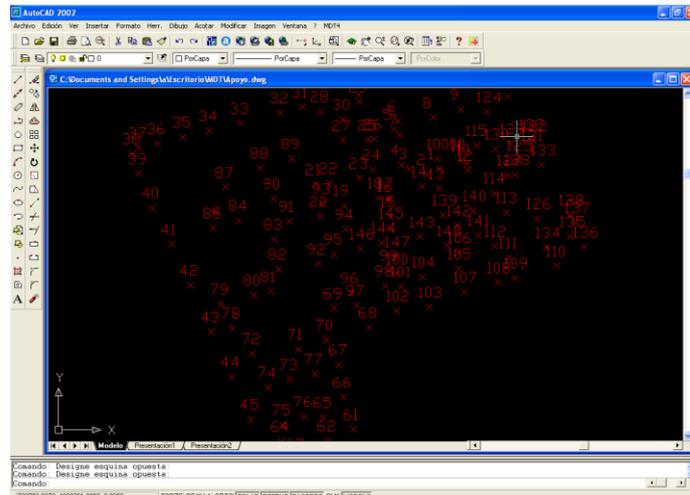


Figura 12. Programa MDT 4 (AutoCAD)

4.5. Programa para cálculos topográficos

Actualmente hay potentes gestores de datos topográficos y geodésicos que facilitan el trabajo de los cálculos topográficos en la fase de gabinete.

El programa informático Topcal21 (figura 13) es una herramienta de cálculo eficaz, sencilla y productiva que permite al usuario resolver todo tipo de problemas de cálculo y organización de datos topográficos, desde la toma de datos en campo hasta el replanteo y los cálculos auxiliares de mayor interés en un proyecto de ingeniería.

Dispone de una ventana de visualización de datos a modo de hoja de cálculo que ayuda a la fácil asimilación de los mismos. Funciona con proyectos, de forma que se puede tener organizados los trabajos con subdirectorios y se pueden manejar varios archivos de puntos y de observaciones a la vez.

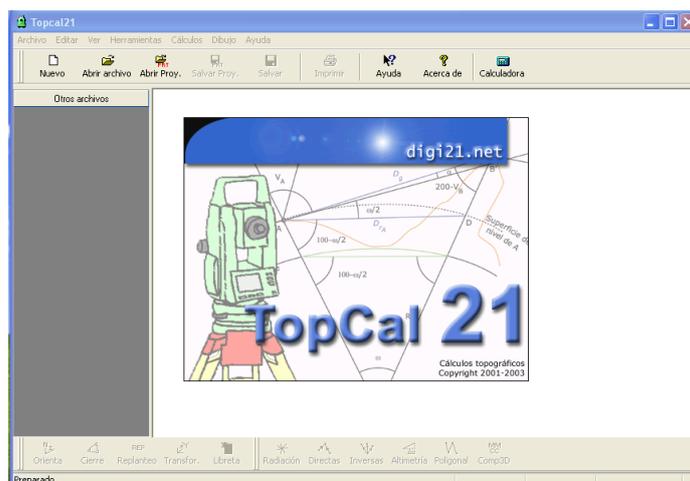


Figura 13. Programa Topcal21

5. METODOLOGÍA

A continuación, se muestra la sucesión de operaciones realizadas, tanto en el trabajo de campo para la toma de datos, como el post-procesamiento de los mismos para la obtención de los resultados.

5.1. Desarrollo del trabajo de campo

El trabajo de campo se ha distribuido de la siguiente manera:

- Señalización de puntos de apoyo y de control.
- Ejecución del vuelo.
- Toma de datos de puntos de apoyo y de control.
- Levantamiento.
- Radiación.

En esta parte del proyecto hemos utilizado todo el equipo descrito anteriormente.

5.1.1. Señalización de puntos de control y de apoyo.

En primer lugar, es aconsejable explorar la zona de estudio para valorar la colocación y distribución de los puntos, ver posibles adversidades que pueden surgir, familiarizarse con la zona para ver posibles irregularidades del relieve relevantes para el estudio, etc.

Una vez decidida la distribución a seguir de los puntos, se realizaron marcas en la superficie de la zona de estudio de tres tipos diferentes:

- Con una marca cuadrada adhesiva, con dos cuadrados en su interior de 5 x 5 cm de lado, como se muestra en la figura 14.

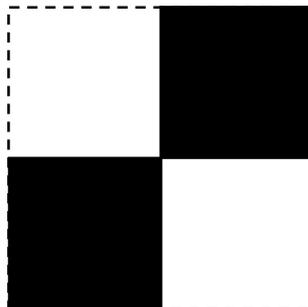


Figura 14. Patrón de la marca adhesiva

- Con una plantilla cuadrada, con dos cuadrados en su interior de 7.5 x 7.5 cm de lado. Esta plantilla junto con un bote de pintura en spray blanco es lo necesario para realizar la marca. La marca realizada con dicha plantilla se puede observar en la figura 15.



Figura 15. Marca realizada con la plantilla

- Señalización directa, mediante una flecha en puntos fácilmente identificables desde el aire (figura 16 y 17) o referenciando alguna marca o base existente en la zona fruto de otros estudios paralelos.



Figura 16. Señalización directa



Figura 17. Señalización directa

Hay que tener en cuenta que dependiendo de la superficie que se quiere marcar, la pintura puede ser mejor o peor identificada desde el aire, a su vez hay superficies donde la pintura es absorbida, como es el caso de la tierra.

La distribución de los puntos en la zona de estudio fue la siguiente:

- En el perímetro de la zona de estudio.
- Distribución interior de forma homogénea.

- Puntos fijos fácilmente identificables (figura 18):
 - Señalización vial (paso de peatones, flechas de dirección, etc.).
 - Elementos de la red de saneamiento (arquetas, imbornales, etc.).



Figura 18. Punto de fácil identificación

La toma de datos en esta fase del proyecto se realizó el 24/10/2017.

5.1.2. Ejecución del vuelo

Para el despegue del Cuadricóptero es aconsejable elegir una zona que este bien despejada y sin obstáculos a su alrededor.

El montaje previo del Cuadricóptero F450 es sencillo, la rutina seguida para el vuelo ha sido la siguiente:

- Sacamos el Cuadricóptero de su maletín de transporte y montamos las hélices.
- Verificamos que la lente de la cámara este limpia y bien colocada y se procede a su encendido.
- Se conecta el modem y la antena en la estación de control de tierra, en este caso un Smartphone. Conectamos la telemetría.
- Verificamos el correcto funcionamiento de las hélices.
- Verificamos la carga de la batería.
- Colocamos el Cuadricóptero en el punto elegido para su despegue y procedemos al lanzamiento.

Una vez en el aire, el Cuadricóptero irá cogiendo altura y empezará a aproximarse a la posición de primera fotografía de la primera pasada para realizar el barrido completo programado.

Durante el vuelo podemos ir comprobando que la altura y la velocidad de vuelo son correctas, que no se pierde comunicación GPS y la batería de los dispositivos.

En el caso de que se diese algún tipo de inconveniente el proyecto puede ser abortado y el Cuadricóptero volverá al punto de despegue. Si todo avanza según lo previsto el Cuadricóptero terminará con toda la programación y volverá al punto del despegue, terminando con un aterrizaje en modo manual.

El vuelo fotogramétrico se realizó el 26/10/2017.

5.1.3. Toma de datos de puntos de apoyo y de control.

En este apartado se procede a la toma de datos de los puntos materializados en el terreno. Las observaciones de estos puntos se realiza mediante el método cinemático en tiempo real RTK (Real Time Kinematic). Este método consiste en la obtención de coordenadas en tiempo real con precisión centimétrica (1 ó 2 cm + 1ppm). Usualmente se aplica este método a posicionamientos cinemáticos, aunque también permite posicionamientos estáticos. Es un método diferencial o relativo. El receptor fijo o referencia estará en modo estático en un punto de coordenadas conocidas, mientras el receptor móvil o “rover”, es el receptor en movimiento del cual se determinarán las coordenadas en tiempo real (teniendo la opción de hacerlo en el sistema de referencia local). Precisa de transmisión por algún sistema de telecomunicaciones (vía radio-modem, GSM, GPRS, por satélites u otros) entre referencia y “rover”. Sus aplicaciones son muchas en el mundo de la topografía, y van desde levantamientos, hasta replanteos en tiempo real, fundamentalmente.

En este tipo de levantamiento se utilizan dos receptores con equipo radio-modem, un trípode y un jalón con la libreta digital adaptada.

En primer lugar, se estaciona el equipo de referencia fijo con posicionamiento absoluto con el objetivo de que resuelva ambigüedades y calcule su posición durante un intervalo de tiempo. Este tiempo dependerá del número de satélites sobre el horizonte y la geometría de los mismos. Se puede ver la marca del punto del estacionamiento en la figura 19.



Figura 19. Punto de estacionamiento del receptor fijo

El siguiente paso será realizar la toma de datos con el receptor móvil. Es importante controlar la conexión entre los dos receptores para evitar que la posición del punto calculado sea errónea o poco precisa. Durante la realización de esta parte se observó problemas para medir cerca de los edificios del Centro Universitario y cerca de una zona con alta arboleda.

Las coordenadas de los puntos se obtienen en el sistema de referencia WGS84, aunque el método de trabajo RTK también permite asociar una proyección y un sistema de referencia distinto, incluso cargar parámetros de transformación para la captura de datos en otro sistema de referencia.

Se tomó un total de 148 puntos distribuidos por toda la zona de estudio. Algo que facilita mucho el trabajo es realizar la señalización y toma de datos de los puntos de apoyo al unísono.

Con las medidas en RTK se obtienen precisiones de las líneas base del orden de 1 y 5 centímetros.

Los datos generados en el levantamiento se pueden encontrar en el *Anexo 3. Puntos de apoyo y control*.

5.1.4. Levantamiento

Para la realización de esta parte del proyecto se ha procedido utilizando el mismo equipo y método que en la toma de datos de puntos de apoyo y control. Se ha estacionado el receptor fijo en la misma base que en la última jornada de trabajo de campo nombrándola como Base 1000.

El levantamiento de la zona del Centro Universitario se ha realizado siguiendo el siguiente esquema de códigos de puntos:

- Marca (Punto de apoyo)
- CT (Cabeza de talud)
- PT (Pie de talud)
- Muro
- Rell (Relleno)
- Bord (bordillo)
- Acera
- Crta (Carretera)
- Edif (Edificación)
- Base

Es aconsejable ir realizando anotaciones en un croquis durante el trabajo campo para facilitar la posterior interpretación de los datos y el renombrado de los puntos.

Este proceso genera una nube de puntos de los que dispondremos sus coordenadas relativas (X, Y, Z).

El trabajo de campo se realizó el día 26/04/2018. El archivo generado en esta jornada de campo se adjunta en el *Anexo 4. Tabla de coordenadas relativas de los puntos del levantamiento en el Centro Universitario.*

5.1.5. Radiación.

El objetivo de esta última parte del trabajo de campo es el de obtener los datos de puntos pertenecientes a las fachadas de los edificios del CUM. Posteriormente se procederá al cálculo de las coordenadas de los mismos con el fin de encajar la geometría de los edificios en los resultados gráficos del proyecto.

Para la realización de este apartado se utilizó la estación total Leica TCR 307 y el apoyo de un segundo operario encargado de transportar el jalón donde está instalado el prisma.

Se realizaron 4 estacionamientos en dos jornadas de trabajo no consecutivas, los datos pertenecientes a este apartado están reflejados en el *Anexo 5. Datos de la radiación.*

Estos 4 estacionamientos (tabla 1) son de coordenadas conocidas y son necesarias para el trabajo posterior de gabinete.

Estacionamiento	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z
1000	730807.458	4309851.908	215.573
2000	730734.228	4309834.647	214.633
3000	730730.666	4309762.426	214.327
4000	730768.373	4309855.252	215.119

Tabla 1. Puntos de estacionamiento

El primer estacionamiento se realizó en el lateral del edificio administrativo (figura 20), con una altura de instrumento de 1.520 metros, concretamente en el punto de apoyo número 131. Para establecer el origen del ángulo de lectura horizontal, se visó al punto 121 perteneciente también a la red de puntos de apoyo, situado en la tapa de un elemento de la red de saneamiento junto al acceso al recinto. Fue renombrado como estacionamiento 1000 y los puntos visados renombrados a partir del 100.

Desde este punto se visaron los puntos correspondientes a la geometría del edificio, el acerado, una pequeña edificación perteneciente a la red eléctrica, puntos de apoyo y demás puntos de interés para el estudio.

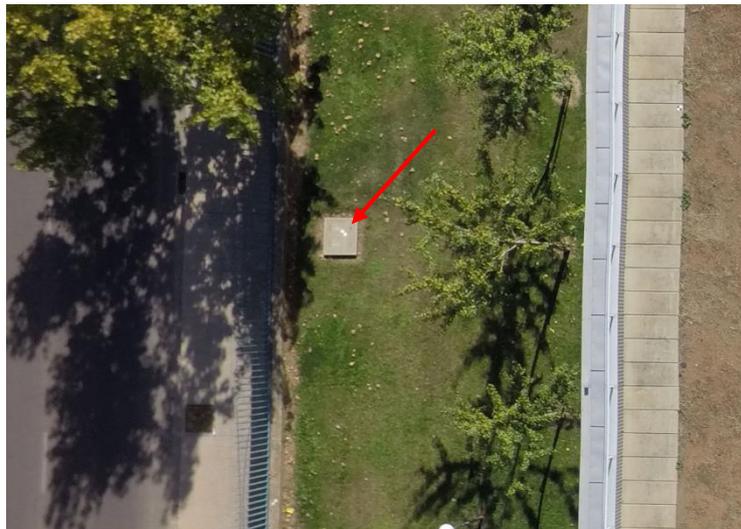


Figura 20. Punto de estacionamiento 1000

Posteriormente se realizó un segundo estacionamiento (figura 21) en las inmediaciones de los aparcamientos cubiertos del centro universitario, con una altura de instrumento de 1.575 metros, concretamente en el punto de apoyo número 2.



Figura 21. Punto de estacionamiento 2000

El origen del ángulo de lectura horizontal se estableció en el punto de apoyo número 13, situado en un elemento de la red de saneamiento situado junto al edificio de investigación. Fue renombrado como estacionamiento 2000 y los puntos visados renombrados a partir del 200.

Una vez situado en este estacionamiento, se radiaron los puntos correspondientes a la geometría del edificio de investigación, los que pertenecen a la parte trasera del Edificio Antonio Castillo Martínez y demás puntos de interés.

En tercer lugar, se realizó otro estacionamiento en la calzada de la zona de aparcamiento frente al Edificio Antonio Castillo Martínez (figura 22), con una altura de instrumento de 1.675 metros, concretamente en el punto de apoyo número 104. El origen del ángulo de lectura horizontal se estableció en el punto número 97 perteneciente a la red de puntos de apoyo. Fue renombrado como estacionamiento 3000 y los puntos visados renombrados a partir del 300.

Desde este punto se visaron los correspondientes a la fachada del Edificio Antonio Castillo Martínez, el acerado, otros puntos de apoyo y la esquina visible del edificio administrativo.

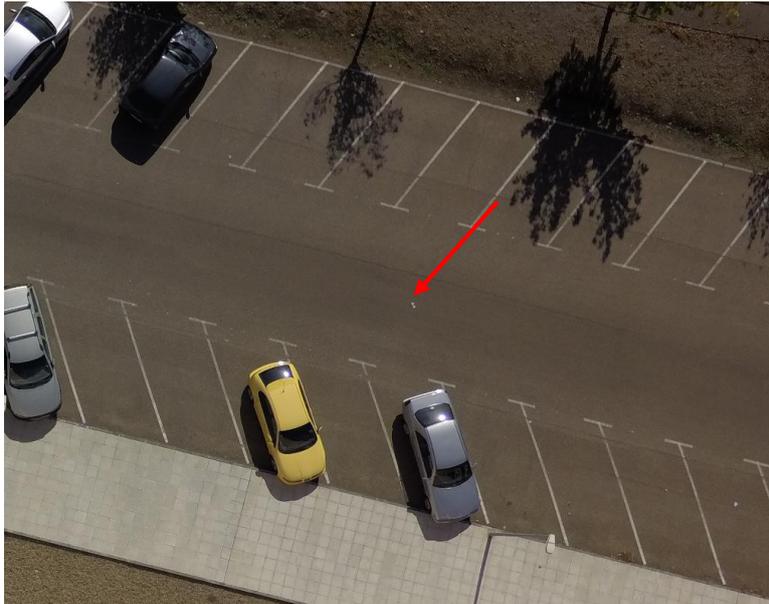


Figura 22. Punto de estacionamiento 3000

Por último, se realizó un estacionamiento en frente del edificio administrativo (figura 23), con una altura de instrumento de 1.745 metros, concretamente en el punto de apoyo número 115 y se visó al punto de apoyo número 13, al igual que en el estacionamiento 2000, para establecer el origen de la lectura horizontal. Fue renombrado como estacionamiento 4000 y los puntos visados renombrados a partir del 400.

Desde este estacionamiento se pudo visar puntos de apoyo que podrían tener una toma de datos anterior errónea, la fachada del edificio administrativo y la geometría del acerado visible.



Figura 23. Punto de estacionamiento 4000

5.2. Desarrollo del trabajo de gabinete.

A continuación, se desarrollan todas las operaciones realizadas en el trabajo de gabinete, utilizando los programas descritos en apartados anteriores.

El trabajo de gabinete se ha distribuido de la siguiente manera:

- Planificación y resolución del vuelo.
- Procesamiento de imágenes digitales.
- Ajuste y comparación de resultados.
- Procesamiento de los datos del levantamiento.
- Cálculo de los datos de la radiación.
- Cálculo del modelo digital de elevaciones.
- Comparación de MDEs generados.

5.2.1. Planificación y resolución del vuelo.

La planificación del vuelo se realizó con el programa Mission Planner, definiendo una serie de parámetros para optimizar el resultado del vuelo.

- Conexión de la telemetría a los dispositivos.
- Conexión entre las antenas en el modo "flight data".
- Se crea el plan de vuelo.
- Se diseña la configuración de las pasadas.
- Coordenadas del proyecto en el sistema de referencia ETRS89.
- Sistema de proyección UTM, uso 29 N.
- Modo de vuelo.
- Sentido de vuelo.
- Velocidad de vuelo y giros.
- Definición de los parámetros en GeoFence.
- Una altura de vuelo de 52 m.
- intervalo entre fotografías de 0.5 centímetros.
- Recubrimiento longitudinal y transversal.
- Resolución de la imagen.

Se obtuvieron un total de 984 fotografías, de las cuales se seleccionaron y renombraron 554 fotografías. Dispuestas en 7 pasadas como se puede observar en la tabla 2.

Numero de pasada	Numero de fotografías
1	60
2	62
3	55
4	61
5	67
6	122
7	127

Tabla 2. Número de pasadas y fotografías

La elección de las fotografías irá en función del GSD y los recubrimientos deseados para el estudio, para ello se genera una hoja de cálculo, que se puede encontrar en el *Anexo2. Cálculo de recubrimientos*.

Para decidir el intervalo de fotografías que se debían escoger se calculó por columnas la superficie cubierta por modelo y calculando el porcentaje de recubrimiento entre ellas.

5.2.2. Procesamiento de imágenes digitales.

Para la realización del tratamiento de imágenes se utilizó el programa informático Agisoft PhotoScan. Se describe a continuación el esquema de trabajo seguido para la obtención de los resultados.

En primer lugar, se crea un nuevo proyecto, se le asigna un nombre y se asigna el sistema de referencia del proyecto (ETRS89) y la proyección UTM uso 29 N.

Se debe comprobar que la cámara ha sido reconocida y que sus parámetros están bien definidos (figura 24), mediante la herramienta “calibración de la cámara”. También se pueden seleccionar diferentes parámetros de ajuste que optimizaran la orientación del bloque (figura 25).

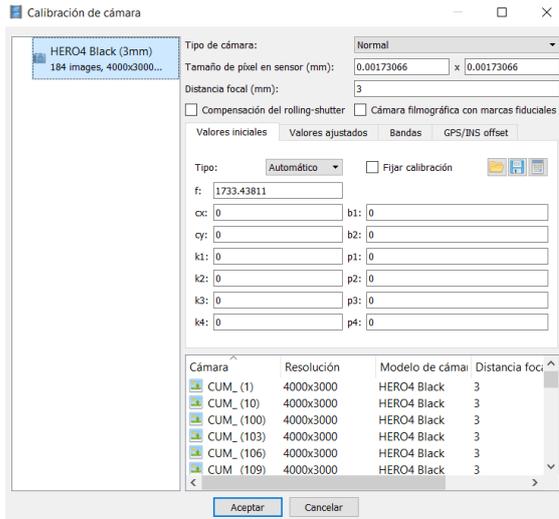


Figura 24. Calibración de la cámara en PhotoScan

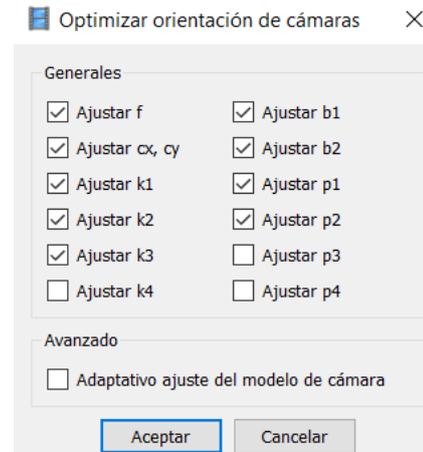


Figura 25. Parámetros para optimizar / el ajuste

A continuación, se importan al programa los marcadores, que en este caso es la nube de puntos generada en el apartado de la toma de datos de puntos de apoyo y de control. Los marcadores son medidos en todas y cada una de las fotografías, para poder obtener los errores medios de sus coordenadas. El objetivo del proyecto es que el error medio de las coordenadas no supere los 2 centímetros.

Tras medir cada uno de los puntos el programa calcula el error en las coordenadas de cada uno de los puntos y el error medio total de las mismas. Para realizar la orientación de las fotografías, se deben seleccionar aquellos puntos de apoyo que contengan valores de error bajos y con una distribución homogénea para poder realizar un ajuste del bloque óptimo. En este caso el ajuste se realizó con 28 puntos de apoyo distribuidos de forma homogénea por el perímetro de la zona de estudio y su interior. En la figura 26 se puede observar la información de los 28 puntos de apoyo.

Marcadores	Este err (m)	Norte err (m)	Alt. err (m)
<input checked="" type="checkbox"/> 4	-0.002241	0.022716	0.016222
<input checked="" type="checkbox"/> 9	0.001613	0.000913	0.016891
<input checked="" type="checkbox"/> 28	-0.019033	-0.004129	0.020712
<input checked="" type="checkbox"/> 33	-0.033027	-0.001871	-0.001806
<input checked="" type="checkbox"/> 37	0.040196	-0.009910	0.012377
<input checked="" type="checkbox"/> 41	0.001820	-0.004453	-0.012526
<input checked="" type="checkbox"/> 43	-0.004586	0.019864	-0.001233
<input checked="" type="checkbox"/> 45	0.019792	-0.012335	0.001234
<input checked="" type="checkbox"/> 47	-0.018267	0.013844	0.023552
<input checked="" type="checkbox"/> 49	0.008723	0.006523	0.013722
<input checked="" type="checkbox"/> 52	0.011197	-0.008382	-0.003240
<input checked="" type="checkbox"/> 54	-0.009149	-0.017941	-0.006299
<input checked="" type="checkbox"/> 59	-0.008712	0.008788	-0.019142
<input checked="" type="checkbox"/> 60	-0.004789	0.005529	0.010430
<input checked="" type="checkbox"/> 61	0.018821	0.003314	0.006010
<input checked="" type="checkbox"/> 62	0.000899	-0.016853	0.000181
<input checked="" type="checkbox"/> 67	-0.008001	-0.002515	0.010730
<input checked="" type="checkbox"/> 73	-0.006915	-0.004211	0.013126
<input checked="" type="checkbox"/> 80	0.006881	0.007891	-0.013833
<input checked="" type="checkbox"/> 85	-0.009245	0.019100	0.008271
<input checked="" type="checkbox"/> 93	0.009428	0.008738	-0.048592
<input checked="" type="checkbox"/> 96	-0.005374	-0.000784	-0.017134
<input checked="" type="checkbox"/> 106	0.036267	-0.014686	0.012861
<input checked="" type="checkbox"/> 120	-0.005929	-0.015228	0.021863
<input checked="" type="checkbox"/> 127	-0.013063	-0.026293	-0.003160
<input checked="" type="checkbox"/> 133	0.012591	-0.013210	0.024822
<input checked="" type="checkbox"/> 136	-0.006309	0.023574	-0.062620
<input checked="" type="checkbox"/> 147	0.030416	-0.001840	0.018035
Error total			
Puntos de...	0.016445	0.012862	0.020104

Figura 26. Puntos de apoyo seleccionados para el ajuste

Una vez se tiene esta información, se procede a la orientación de las fotos. La información obtenida de la orientación de las fotografías se encuentra en el *Anexo 5. Datos de orientación de las cámaras*. La información obtenida de la medida de los diferentes puntos de apoyo y enlace se encuentra en el *Anexo 6. Datos de los marcadores*.

El siguiente paso a seguir es la creación de la nube de puntos, definiendo previamente algunos parámetros de densificación y calidad del proceso (figura 27):

- Calidad, especifica la calidad de reconstrucción deseada. Se pueden usar ajustes de mayor calidad para obtener información más detallada y geometría precisa, pero requieren más tiempo para de procesamiento. Interpretación de la calidad
- Filtrado de profundidad, en esta etapa PhotoScan calcula mapas de profundidad para cada imagen. Debido a algunos factores, como imágenes con ruido o mal

enfocadas, puede haber algunos valores atípicos entre los puntos. descripción arriba).

- Calcular los colores de punto, esta opción se puede desmarcar en caso de que el color de los puntos no sea de interés para el estudio. Esto permitirá ahorrar tiempo de procesamiento.

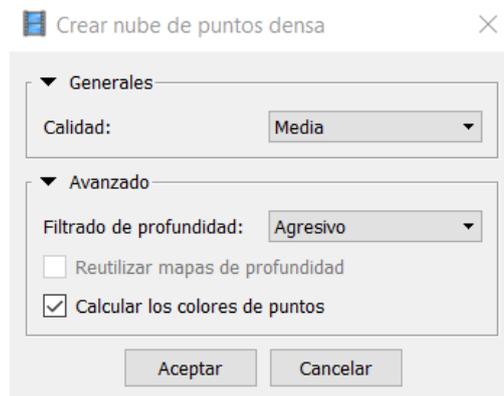


Figura 27. Parámetros para la creación de la nube de puntos

En este proceso el programa calcula profundidades para la obtención de la nube de puntos. Esta nube de puntos debe ser tratada para la clasificación de los puntos, ya que es necesario para procesos posteriores como la generación de modelos digitales de elevaciones. Por defecto el programa los clasifica como:

- Puntos pertenecientes al terreno
- Puntos sin clasificar

Con la clasificación de puntos conseguimos que aquellos que no pertenecen al terreno, como árboles, edificios, sombras, etc., queden bien definidos y clasificados y en la generación de modelos sea solo el terreno el objeto de estudio.

A continuación, una vez orientada las fotos, creada la nube de puntos y clasificada, se procede a crear la malla (figura 28).

Debemos definir los siguientes parámetros:

- Tipo de superficie El tipo de superficie Arbitrario (3D) se puede usar para modelar cualquier tipo de objeto, no obstante, debe ser seleccionado para objetos cerrados, como estatuas, edificios, etc. El tipo de superficie terreno (2.5D) está optimizado para el modelado de superficies planas, como terrenos. Se debe seleccionar para el procesamiento de fotografía aérea ya que requiere una

cantidad menor de memoria y permite un mayor procesamiento de conjuntos de datos.

- Datos fuente, La configuración de nubes densas dará como resultado una mayor duración del tiempo de procesamiento, pero generará una producción de alta calidad basada en la densidad previamente reconstruida.
- Numero de caras, especifica la cantidad máxima de polígonos en la malla final.
- Interpolación, Si el modo de interpolación está deshabilitado, se obtienen resultados de reconstrucción precisos, con el modo de interpolación activado (predeterminado) PhotoScan interpolará algunas áreas de superficie dentro de un círculo de cierto radio alrededor de cada punto denso de la nube. Como resultado, algunos agujeros pueden ser cubierto automáticamente.
- Clases de puntos, esta opción especifica el tipo de nube de puntos densos que se utilizará para la generación de la malla. Por ejemplo, se selecciona solo "Puntos de tierra" para producir un MDT en lugar de un MDS.
- Calcular los colores de los vértices, si los datos de origen tienen información de color para los puntos, puede calcular opcionalmente los colores de los vértices.

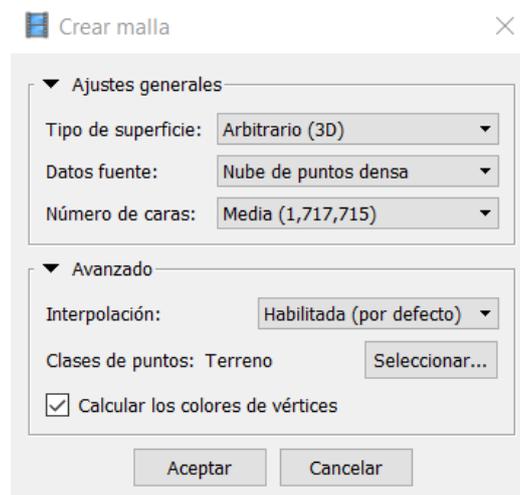


Figura 28. Creación de la malla

El siguiente paso será la creación de la textura, como en los casos anteriores, se debe definir ciertos parámetros para adaptar el proceso a nuestro estudio, los parámetros que se pueden definir son (figura 29):

- Modos de mapeado, este modo determina cómo se empaquetará la textura del objeto en el atlas de textura. Hacer una selección correcta del modo de mapeo de textura ayuda a obtener un empaquetamiento de textura óptimo y, en

consecuencia, una mejor visión calidad del modelo final. Entre las posibles elecciones está: genérico, ortofoto adaptativa, ortofoto, esférico y cámara única.

- Modo de mezcla, en este apartado se define la forma en que se combinarán los valores de píxeles de diferentes fotos en la textura final. Dentro de este apartado se puede elegir entre: mosaico, promedio, máxima intensidad, mínima intensidad y la opción de deshabilitarlo.
- Tamaño de texturas, especifica el tamaño del atlas de textura en píxeles y determina la cantidad de archivos a exportar para la textura. Este tipo de exportación permite obtener una mayor resolución del modelo final.
- Realizar el relleno de agujeros, es una opción habilitada por defecto y ayuda a evitar el efecto de “salt and pepper” (sal y pimienta) en el caso de complicaciones en superficies con numerosas partes que dan sombra a otras partes del modelo.
- Filtro de efecto fantasma, en el caso de que la zona de estudio incluya algunas estructuras delgadas u objetos en movimiento que no se pudieron reconstruir como parte del modelo poligonal.

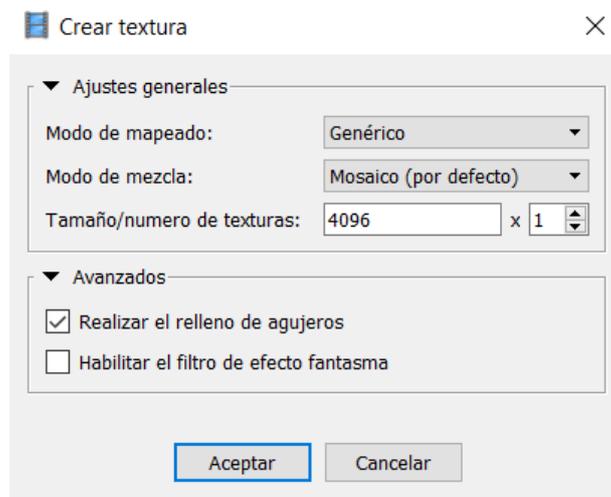


Figura 29. Parámetros para la creación de texturas

El próximo paso será la creación del modelo de teselas, definiendo en el cuadro de diálogo los siguientes parámetros (figura 30):

- Datos fuente, se puede elegir entre nube densa para grandes proyectos cuando el procedimiento de construcción de la malla no es factible debido al tiempo de procesamiento, o se puede elegir la malla como fuente de datos para mantener todos los detalles en el modelo de mosaico si se ha generado una malla muy detallada previamente.

- El tamaño del píxel, se muestra un valor sugerido de tamaño del píxel debido a la resolución de las imágenes de entrada. Su unidad es el metro.
- Tamaño de la tesela, se define el tamaño del mosaico en píxeles.

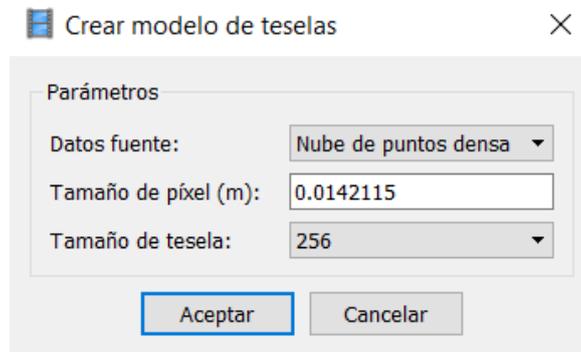


Figura 30. Creación del modelo de teselas

Una vez definido todos los pasos anteriores PhotoScan permite generar y visualizar un modelo digital de elevaciones (MDE). Un MDE representa una superficie modelo como una cuadrícula regular de valores de altura. Un MDE se puede rasterizar desde una nube de puntos densos, una nube de puntos dispersos o una malla. A continuación, se muestran los parámetros que se pueden definir (figura 31):

- Tipo de proyección, en el caso de este proyecto es la geográfica que permite elegir un sistema de referencia de coordenadas que en este estudio ha sido el ETRS 89 /UTM uso 29 Norte.
- Datos fuente, en este apartado se define la fuente de los datos, ya sea la nube de puntos densa, la nube de puntos dispersa o la malla.
- Si el modo de interpolación está Deshabilitado, se obtienen resultados de reconstrucción precisos, ya que solo las áreas correspondientes a la nube de puntos densa se reconstruyen. Si el modo de interpolación Activado, PhotoScan calculará un MDE para todas las áreas del proyecto que son visibles en al menos una imagen. En el modo Extrapolado, el programa genera un modelo sin orificios con algunos datos de elevación extrapolando hasta las extensiones del cuadro delimitador.
- Clase de puntos, este parámetro indica la clase de punto clasificado que se usará para definir el MDE. Para la generación de MDT o MDE es necesario clasificar los puntos de la nube densa en al menos dos, el terreno y otro.
- Región, en este apartado podemos definir una zona determinada para realizar el modelo digital, en vez de hacerlo en todo el proyecto.

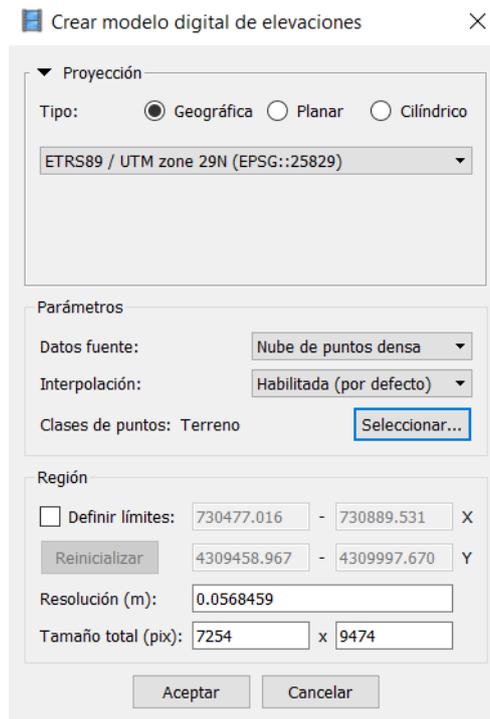


Figura 31. Creación del MDE

Como último apartado del flujo de trabajo de PhotoScan, el programa ofrece la posibilidad de crear un ortomosaico. En este apartado podemos definir los siguientes parámetros (figura 32):

- Proyección, al igual que en la creación del modelo digital de elevaciones.
- Superficie, la creación ortomosaica basada en los MDE es muy eficiente para procesar datos de levantamientos aéreos mientras que la basada en la malla, se utilizan para otro tipo de fines no topográficos.
- Tamaño del pixel, se refiere a la resolución de muestreo de suelo, por lo tanto, es inútil establecer un valor menor, la cantidad de píxeles aumentaría, pero la resolución efectiva no lo haría.
- Max. Dimensión, permite establecer la dimensión máxima para los datos ráster resultantes.

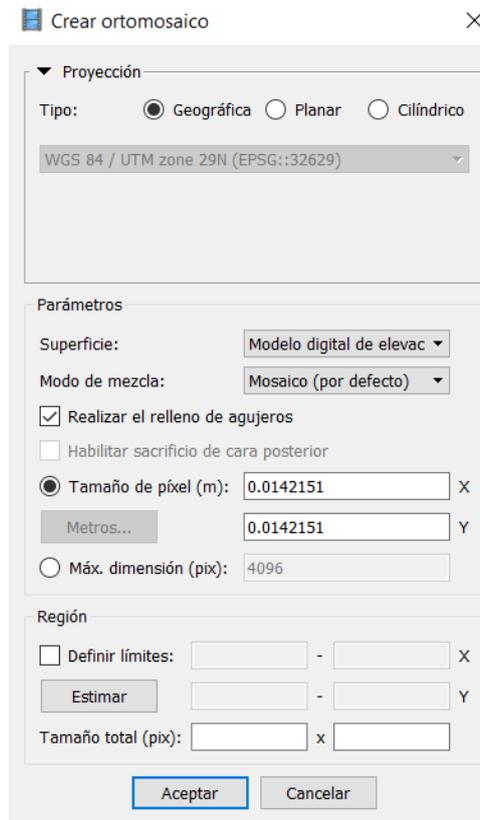


Figura 32. Creación del ortomosaico

Una vez terminado el flujo de trabajo y verificado que el resultado cumple con los requisitos del proyecto, se exportarán dos archivos .TIF:

- DEM.ETRS89.TIF donde se encuentra la información del modelo digital de elevaciones generado, corregido de errores y referido solo al terreno.
- ORTO.ETRS89.TIF archivo que contiene la ortofoto generada como resultado del trabajo realizado en el programa.

El plano generado con la ortofoto del CUM se encuentra adjunto al final de la memoria descriptiva.

Estos archivos son compatibles con el programa Global Mapper donde serán los datos de partida para continuar con el estudio.

5.2.3. Ajuste y comparación de resultados

El objetivo de este apartado es el de georreferenciar los datos exportados de PhotoScan en el programa Global Mapper con el objeto de medir los puntos conocidos

y ver el error obtenido durante la generación de la ortofoto. Los cálculos se llevarán a cabo en una hoja de cálculo de Excel.

Para la medición de las coordenadas, se deben cargar en el programa Global Mapper los dos archivos .TIF generados en el apartado anterior.

Para cargar los datos en el programa bastará con arrastrar los archivos a la pantalla inicial del programa. Como se puede observar en la imagen 33, los archivos son agregados por capas, junto a dos escalas, una cromática con la descripción de la altura y otra gráfica.

Por último, se debe cargar el archivo Apoyo.dwg dónde se encuentra la información referente a los puntos de apoyo. Aparecerá un cuadro de dialogo donde se deberán definir los siguientes parámetros:

- Proyección: UTM
- Zona: 29 (12°W - 6°W - Hemisferio Norte)
- Datum: ETRS89
- Unidades planas y de elevación: Metros

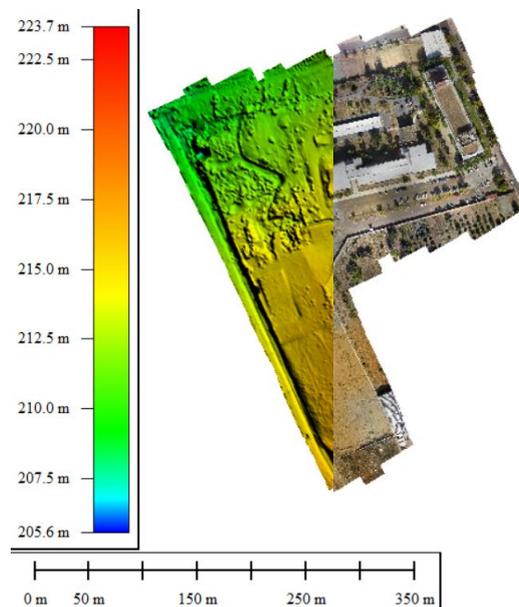


Figura 33. DEM y ortofoto cargados en Global Mapper

Ahora mediante la herramienta de creación de líneas (modo vértices ) , se irán identificando gráficamente cada uno de los puntos de apoyo que aparecen en la ortofoto. Una vez que todos los puntos de apoyo sean detectados, la línea generada durante el proceso de detección de puntos se guarda en una nueva capa. La ventaja que ofrece

este tipo de línea es que ofrece información de las coordenadas de cada uno de sus vértices, que en este caso son cada uno de los puntos de apoyo detectados, dicha información debe ser copiada a un archivo de texto para procesos posteriores.

Durante la creación de la línea se puede observar que existe una leve desviación del punto medido con GPS (capa apoyo.dwg) con respecto a su posición real, dicha desviación es el error planimétrico obtenido durante el proceso de generación de la ortofoto.

Para medir los errores planimétricos y altimétricos se deben cargar los datos de los puntos de apoyo y control y los datos obtenidos en Global Mapper. Se disponen los datos por columnas y se les hace la diferencia a las coordenadas para obtener el error de medida. El archivo generado se encuentra en el *Anexo 7. Calculo de errores planimétricos y altimétricos.*

5.2.4. Gestión de los datos del levantamiento

Con el objetivo de generar un modelo digital de elevaciones para su posterior comparación, se ha procedido a realizar un levantamiento mediante topografía clásica.

En primer lugar, debemos transformar los datos de partida. Disponemos de una nube de puntos reflejados en el Anexo 3, con las coordenadas relativas del levantamiento y deben estar referidas al sistema ETRS89.

Se realiza una transformación 3D conforme, para esta transformación es necesario conocer al menos 3 puntos en los dos sistemas, dos de ellos planimétricos y un tercero altimétrico. A partir de 11 marcas de coordenadas conocidas en los dos sistemas y con el apoyo del programa informático para el cálculo topográfico Topcal21, se obtuvieron residuos inferiores a los 2 centímetros, los resultados obtenidos en este proceso están reflejados en *Anexo 8. Transformación 3D conforme.* Una vez calculados los 7 parámetros (λ , Ω , Φ , K , T_x , T_y y T_z) se pueden calcular las coordenadas absolutas de todos los puntos, las coordenadas calculadas en este paso se encuentran en el *Anexo 9. Tabla de coordenadas absolutas de los puntos del levantamiento en el Centro Universitario.*

Una vez obtenidas las coordenadas en el sistema absoluto, el siguiente paso será importar la lista de puntos a un nuevo proyecto de AutoCAD MDT, con el fin de identificar y dibujar el contorno de los diferentes elementos del centro universitario, como se muestra en la figura 34.

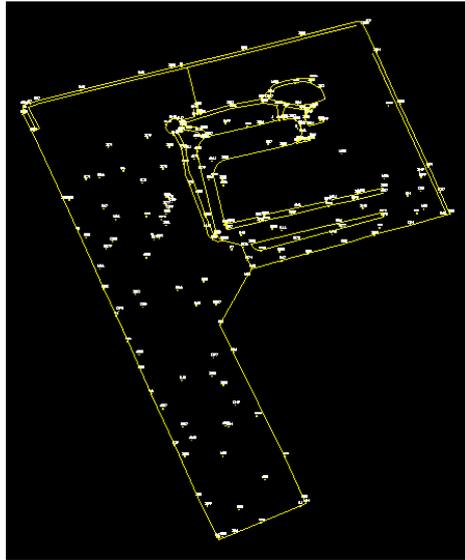


Figura 34. Geometría generada en MDT

Los datos de campo para este apartado fueron tomados con el instrumento Leica GPS 1200, el problema de usar este tipo de instrumento lo podemos encontrar en la pérdida de satélites, o como en este caso, con la pérdida de señal cerca de las edificaciones, ya sea por la máscara de elevación o por la posición de los satélites. Para poder subsanar este tipo de inconveniente se utilizó el apoyo de una estación total Leica TCR 307 para radiar los puntos pertenecientes a las esquinas de los edificios y radiar algunos puntos de los elementos que componen la geometría del centro universitario como aceras, bordillos, pequeñas estaciones eléctricas, etc.

5.2.5. Gestión de los datos de la radiación

En este paso se calculan los datos de la radiación realizada en campo con el fin de añadir la información topográfica necesaria al levantamiento. Para la realización de dichos cálculos se utilizará el programa de gestión de cálculos topográficos Topcal21.

El primer paso, una vez instalado el programa, será crear un nuevo proyecto, definiendo el nombre del fichero y del trabajo mediante el cuadro de dialogo que se muestra en la figura 35.

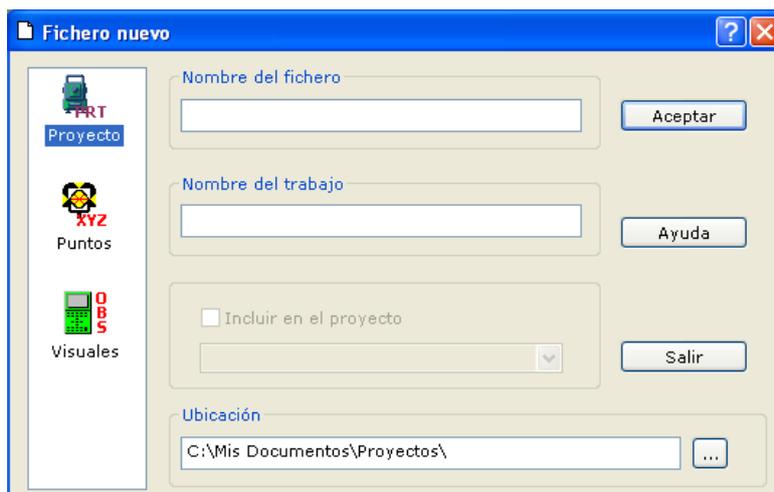


Figura 35. Creación del proyecto

A continuación, se importa el archivo .ASCII con la información de las coordenadas de los estacionamientos y sus visuales con origen 0.000 g para el ángulo horizontal, definido como “ESTACIONES.pts” como se puede observar en la figura 36.

	Punto	X	Y	Z	Desorientacion
1	1000	730807.458	4309851.908	215.573	372.9940
2	2000	730734.228	4309834.647	214.633	155.0093
3	3000	730730.666	4309762.426	214.327	273.9525
4	4000	730768.373	4309855.252	215.119	244.6190
5	9013	730742.657	4309824.775	0.000	0.0000
6	9097	730684.451	4309742.386	0.000	0.0000
7	9121	730790.352	4309889.784	0.000	0.0000

Figura 36. Archivo ESTACIONES.pts

El siguiente paso será importar un segundo archivo .ASCII con la información de las observaciones. Se han creado dos archivos de observaciones, “VISADOS 1000.obs” y “VISADOS 2000, 3000 Y 4000.obs”. En ellos deberán aparecer las lecturas de los puntos visados para el origen de ángulos horizontales con las lecturas a 0 para poder realizar el cálculo de las desorientaciones. Estos archivos seguirán la siguiente estructura (figura 37):

- Estación.
- Punto visado.
- Lectura del ángulo horizontal.
- Lectura del ángulo vertical.
- Distancia reducida.
- Altura de mira.

- Altura del instrumento.

	▲ Estacion	Visado	Horizontal	Vertical	Distancia	Mira	Instrumento
1	1000	100	99.1822	111.7533	1.691	1.300	1.520
2	1000	101	90.1154	137.8264	2.002	0.000	1.520
3	1000	102	246.5164	116.9099	5.708	0.000	1.520
4	1000	103	299.5308	111.8760	10.018	0.000	1.520
5	1000	104	384.0960	101.7157	40.826	1.300	1.520
6	1000	105	384.3976	101.8652	46.989	1.300	1.520
7	1000	106	398.7128	101.2309	43.661	1.300	1.520
8	1000	107	2.9595	100.8712	41.236	1.300	1.520
9	1000	108	2.9606	100.8715	42.949	1.300	1.520
10	1000	109	1.3345	100.9177	42.961	1.300	1.520
11	1000	110	1.1990	100.9580	41.310	1.300	1.520
12	1000	111	2.5300	100.9582	41.079	1.300	1.520
13	1000	112	1.9053	101.0651	39.644	1.300	1.520
14	1000	113	399.0093	100.9637	39.883	1.300	1.520
15	1000	114	397.4178	100.9299	36.058	1.300	1.520
16	1000	115	396.9765	100.9683	32.112	1.300	1.520
17	1000	116	396.5833	100.9235	28.028	1.300	1.520
18	1000	117	393.7588	101.0138	25.217	1.300	1.520
19	1000	118	387.5491	101.3922	23.330	1.300	1.520
20	1000	119	382.8461	101.9118	22.587	1.300	1.520
21	1000	120	380.5311	102.1963	19.634	1.300	1.520
22	1000	121	392.0364	101.3085	21.008	1.300	1.520

Figura 37. Archivo VISADOS 1000.obs

Una vez importada toda la información se procede al cálculo de las desorientaciones de cada uno de los estacionamientos realizados, en este caso son 1000, 2000, 3000 y 4000. Mediante la herramienta “Desorientaciones”, el programa nos guiara de manera rápida, sencilla y eficaz hasta el cálculo de las desorientaciones. En primer lugar, el programa nos pide mediante un cuadro de dialogo que indiquemos cuales son los ficheros de puntos y visuales que contienen la información de nuestros puntos. A continuación, basta con seleccionar el punto de estacionamiento y el visado con lectura horizontal 0 para que el programa calcule al instante la desorientación de ese estacionamiento (figura 38).

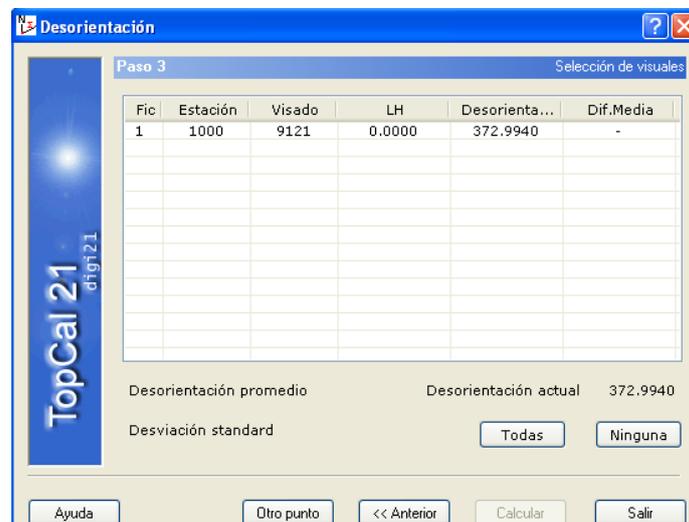


Figura 38. Cálculo de desorientaciones

En la figura 36, se puede observar que el programa actualiza automáticamente los datos de estacionamiento una vez calculada la desorientación. Este proceso debe repetirse para cada uno de los estacionamientos.

Una vez calculadas las desorientaciones, el siguiente paso será calcular las coordenadas de cada uno de los puntos visados, para ello el programa nos ofrece la herramienta “radiación” que guía al usuario en 4 sencillos pasos:

- En primer lugar, el programa pedirá especificar el fichero de puntos donde se encuentran los datos de los estacionamientos y el fichero de visuales con los puntos visados desde él. En este paso se deberá especificar también el nombre del fichero .ASCII que el programa genera con los resultados.
- En el segundo paso se eligen las estaciones de radiación.
- A continuación, en el tercer paso, nos aparecerán los puntos que el programa ha detectado que se han visado desde la estación elegida previamente.
- Por último, se configura la salida de los datos, definiendo el nombre del fichero de Topcal21 de resultados y el tipo de distancias UTM o planas.

Una vez calculada la primera radiación, en este caso desde el estacionamiento 1000 (figura 39), el programa genera un archivo “.pts” con los resultados y lo añade al proyecto automáticamente. En este caso se han generado 4 archivos, uno para cada estacionamiento:

- Radiación 1000.pts
- Radiación 2000.pts
- Radiación 3000.pts
- Radiación 4000.pts

	Z	Punto	X	Y	Z	Desorientacion
1		100	730808.964	4309852.612	215.483	0.0000
2		101	730808.846	4309852.817	215.972	0.0000
3		102	730805.796	4309846.655	215.594	0.0000
4		103	730798.514	4309847.789	215.235	0.0000
5		104	730781.980	4309883.802	214.693	0.0000
6		105	730778.311	4309888.752	214.417	0.0000
7		106	730788.686	4309891.329	214.949	0.0000
8		107	730792.248	4309890.242	215.229	0.0000
9		108	730791.617	4309891.835	215.205	0.0000
10		109	730790.598	4309891.427	215.174	0.0000
11		110	730791.165	4309889.874	215.171	0.0000
12		111	730792.049	4309889.993	215.175	0.0000
13		112	730792.228	4309888.513	215.130	0.0000
14		113	730790.476	4309888.000	215.189	0.0000
15		114	730791.294	4309884.145	215.266	0.0000
16		115	730792.864	4309880.517	215.305	0.0000
17		116	730794.566	4309876.799	215.386	0.0000
18		117	730794.878	4309873.766	215.391	0.0000
19		118	730793.906	4309870.899	215.283	0.0000
20		119	730793.020	4309869.271	215.115	0.0000
21		120	730794.369	4309866.533	215.116	0.0000
22		121	730796.490	4309869.825	215.361	0.0000

Figura 39. Resultado de la Radiación 1000.pts

Los archivos con las coordenadas calculadas de los puntos radiados se encuentran en el *Anexo 10. Coordenadas calculadas de los puntos de la radiación.*

Una vez calculadas las coordenadas de todos los puntos de la radiación, se debe exportar un fichero .ASCII con la información generada para su tratamiento gráfico en el programa AutoCAD.

De vuelta en el programa MDT, en el archivo generado en la gestión de los datos del levantamiento, se importan los archivos .ASCII con las coordenadas calculadas de los puntos radiados y se continúa delimitando la geometría de los elementos que no habían podido ser identificados en el apartado anterior. Finalmente, el resultado queda reflejado como se muestra en la figura 40.

Finalmente se exportan la nube de puntos de MDT para hacer la triangulación de la zona, las curvas de nivel y finalmente el modelo digital de elevaciones con el programa Global Mapper y poder proceder a la comparación de este último MDE con el creado a partir de los puntos de apoyo y control.

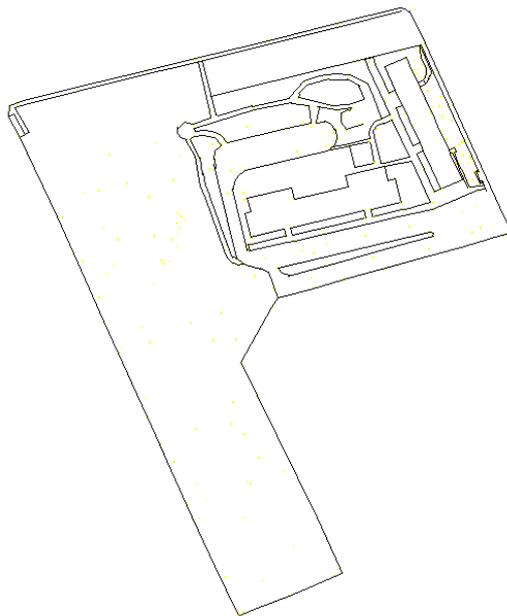


Figura 40. Geometría del CUM en el programa MDT

5.2.6. Cálculo del modelo digital de elevaciones

Para el tratamiento de datos espaciales se va a utilizar el programa Global Mapper, para ello se tienen como datos de partida la nube de puntos exportada de MDT en el apartado anterior, denominada como “Levantamiento CUM”.

En primer lugar, se carga la nube de puntos, aparecerá el cuadro de dialogo que se muestra en la figura 40, en él se pueden definir diferentes parámetros. En este caso importamos como red de elevaciones de datos de puntos 3D, esta opción nos generara automáticamente el modelo digital de elevaciones a partir de los datos importados.

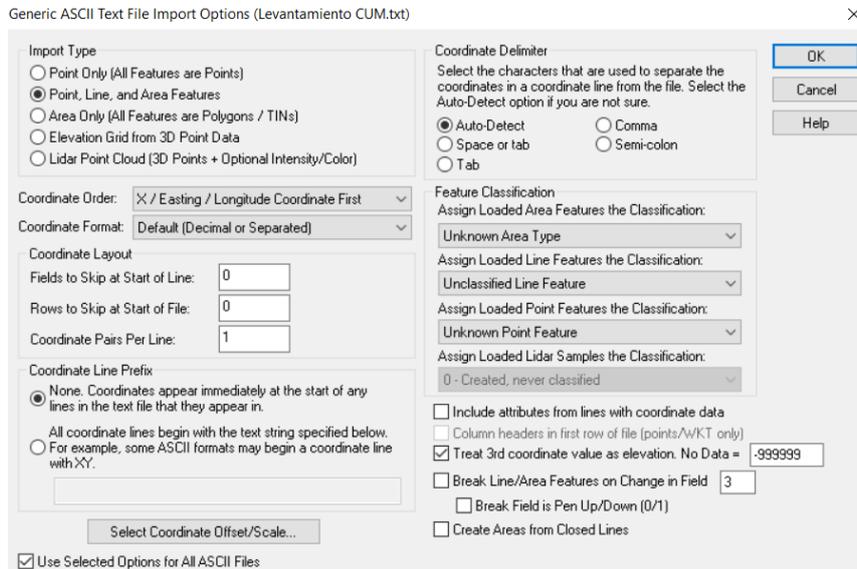


Figura 40. Opciones de importación de archivos ASCII en Global Mapper

En segundo lugar, aparecerá el cuadro de dialogo de la figura 41, donde se definen los parámetros para la creación de la red de elevaciones. En este caso y para evitar una triangulación errónea, se debe modificar el criterio de distancia entre puntos. Este criterio define la distancia máxima, desde un punto de coordenadas conocidas, a la que el programa interpola los datos para la generación del modelo.

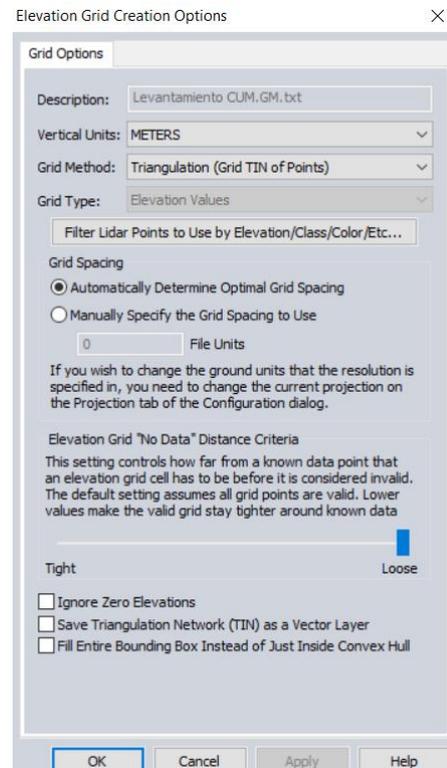


Figura 41. Opciones para la creación del MDE

Aparecerá un tercer cuadro de dialogo para definir los parámetros de proyección, uso, sistema de referencia y las unidades de medida para el proyecto (figura 42).

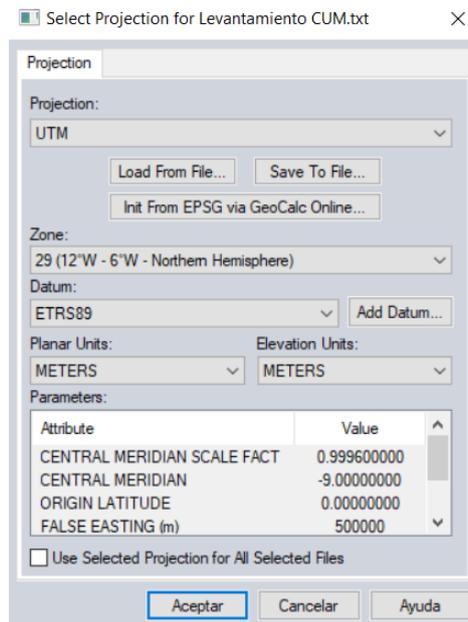


Figura 42. Parámetros de proyección

Para tener una visión mas completa del proyecto (figura 43) se cargan también los puntos que componen el levantamiento y la geometría generada en el programa informático AutoCAD. Para ello se deberá importar el mismo archivo que en el paso anterior y definirlo como puntos en el cuadro de dialogo que aparecerá igual que en la figura 40. A continuación, se importa el archivo .dwg generado en el apartado anterior y que contiene la geometría de la zona de estudio, en este caso solo se pedirá definir los parámetros de proyección para el archivo (figura 42).

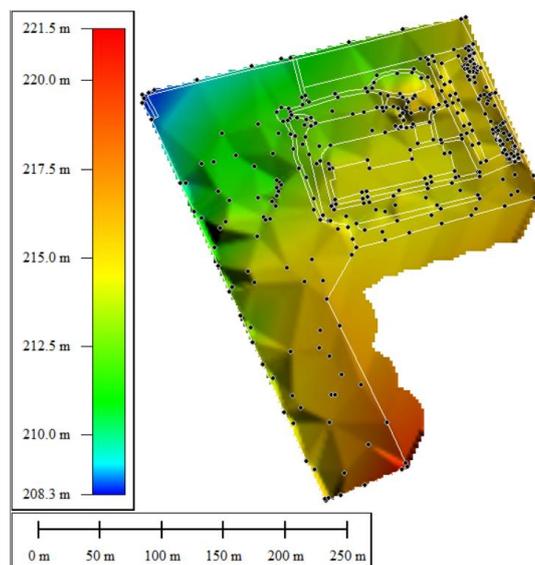


Figura 43. MDE 1

5.2.7. Comparación de MDEs generados

Con el fin de contrastar los resultados y valorar la precisión obtenida con cada uno de ellos, se han comparado dos modelos digitales de elevaciones.

El primer modelo digital (MDE1), es el resultado de la creación de la nube de puntos densa realizada en el apartado 5.2.2. Procesamiento de imágenes digitales. Para ello, desde el programa informático PhotoScan, se exporta la nube de puntos densa en formato .las. Este formato es el estándar para datos LIDAR, que permite el intercambio de información de una nube de puntos tridimensional y es compatible con el programa Global Mapper donde se realizara la comparación de los MDEs.

Para poder tener un modelo digital mas preciso referido únicamente al terreno, se realiza una segunda clasificación de los puntos. Con este procedimiento se consiguen eliminar elementos y puntos que no pertenecen al terreno (edificios, coches, etc.) o que han sido mal interpolados durante los diferentes procesos del tratamiento de imágenes, como pueden ser las sombras proyectadas de árboles, edificios, señales, etc.

Por último, se exporta la información en un archivo .dem (figura 44), se ha definido como MDE 1.dem.

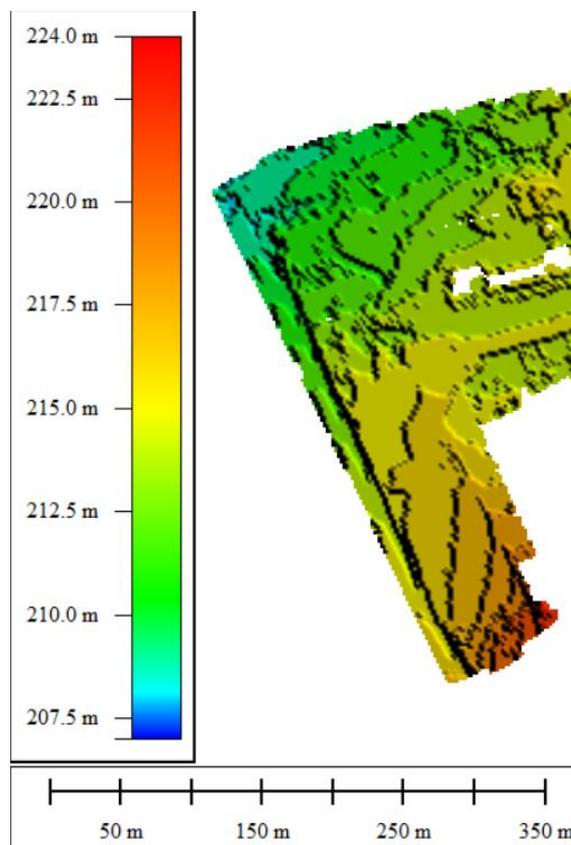


Figura 44. MDE 1

El segundo modelo digital (MDE2) es el resultado del apartado 5.2.6. Cálculo del modelo digital de elevaciones, se exporta un archivo .dem con la información generada en dicho apartado (figura 45).

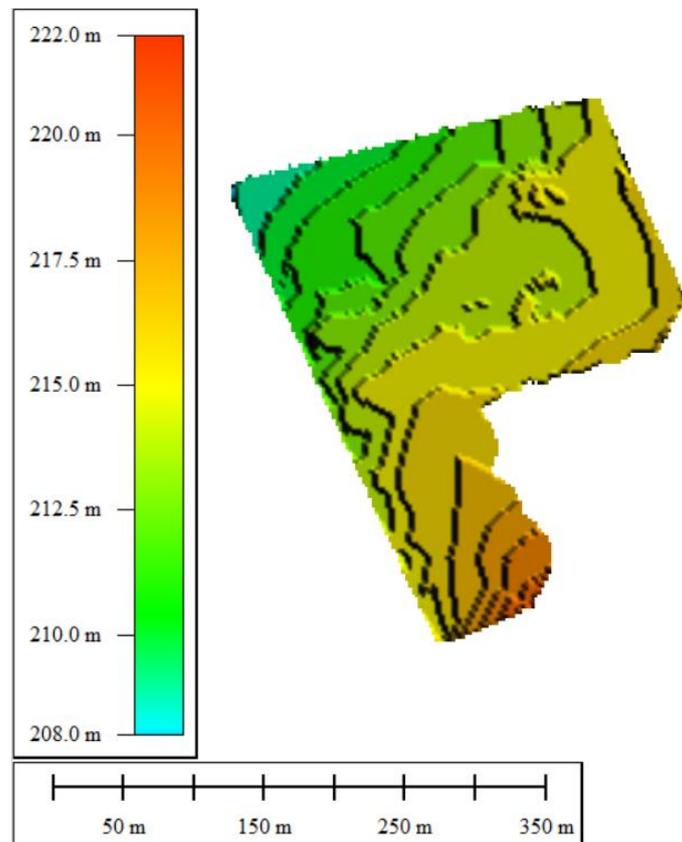


Figura 45. MDE 2

Por último, se utiliza la herramienta de comparación de capas para ver las diferencias existentes entre los modelos, y poder así deducir que procedimiento es el mas preciso, rápido y eficaz. Se ha decidido exportar los modelos digitales en formato .dem ya que es el archivo estándar para los datos de modelos digitales de elevaciones.

Una vez implementada la herramienta de comparación de capas, el programa informático muestra el cuadro de dialogo de la figura 46, donde se definen los parámetros del proceso, el orden en el que intervienen los modelos y se elige la operación a realizar en la comparación. En este caso utilizaremos la operación “diferencia” que generará un tercer modelo digital con el resultado de la operación.

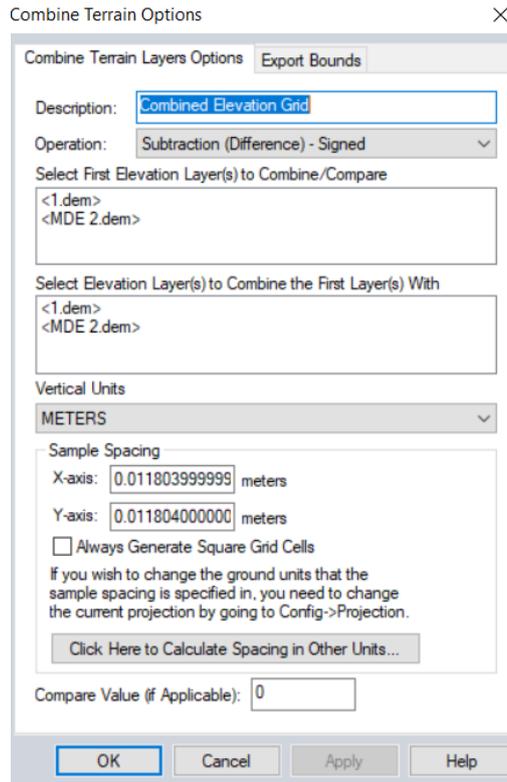


Figura 46. Comparación de capas

Tras una primera prueba se comprobó que la diferencia entre los modelos era de 6m. Esto era debido a una serie de puntos, pertenecientes a un edificio, que no habían sido detectados durante los procesos de clasificación de puntos. Para poder realizar una valoración mas detallada del resultado, se realizará la comparación de los modelos digitales en diferentes zonas del CUM.

Por un lado, se ha realizado la comparación en una zona que abarca los tres edificios y los aparcamientos del CUM (figura 47). Debido a que fue la zona donde mas puntos se tomaron en el levantamiento, se intuye que será la mejor definida en el MDE y la mas precisa.

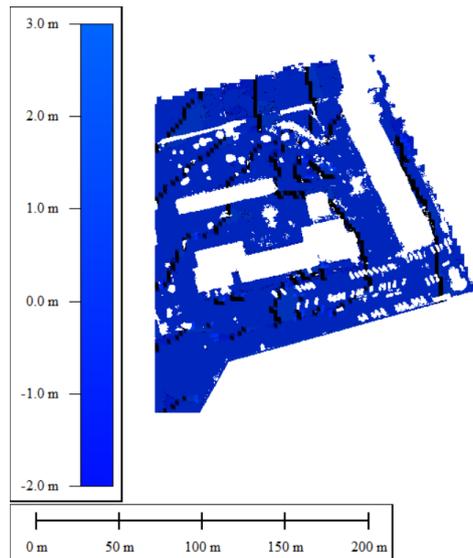


Figura 47. Primera zona comparada

Tras realizar la comparación se puede observar que existen puntos o áreas con hasta 3 m. de diferencia. Tras analizar el modelo digital, se observó que por lo general existía un error mínimo o nulo en la parte central de la zona de estudio, siendo las zonas cercanas a los edificios las que experimentaban mayor error. El único punto con 3 metros de error detectado se encuentra en el perímetro del edificio administrativo del CUM, probablemente debido a la incompleta clasificación de los puntos que contienen el elemento.

La segunda zona a estudiar (figura 48) se prevé que será la mas conflictiva debido a que es donde se encuentra una gran arboleda, afectando al MDE generado en PhotoScan con sombras proyectadas, y donde por perdida de señal, menos puntos se tomaron en el levantamiento.

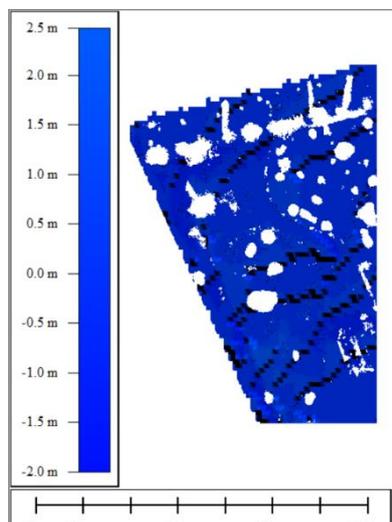


Figura 48. Segunda zona comparada

Por último, en la tercera zona comparada se obtienen los mismos resultados que en el anterior. Al ser una zona de relieve prácticamente regular, los errores son mínimos excepto en los extremos del área de estudio donde se ha encontrado una zona con casi 1.5 metros de diferencia.

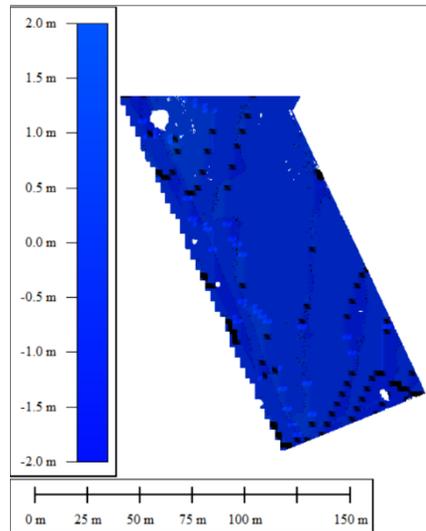


Figura 49. Tercera zona comparada

6. CONCLUSIONES

Después de la realización completa del proyecto, cabe destacar en primer lugar el avance que ha supuesto para la fotogrametría el poder encontrar una herramienta como el dron para realizar captura de nubes de puntos densas y generación de ortos de una forma tan rápida y eficaz.

Durante la realización del proyecto he utilizado diferentes programas informáticos. Con PhotoScan he encontrado una herramienta muy completa para el procesamiento de imágenes digitales, por un lado, he realizado la generación completa de la ortofoto del Centro Universitario de Mérida corregido de deformaciones y con una precisión aceptable, cercana a los 2cm., y por otro, las herramientas de las que dispone el programa me ha permitido depurar la información y exportarla con el fin de realizar una comparación entre los resultados obtenidos por fotogrametría y por topografía clásica. Cabe destacar también el trabajo realizado con el programa informático Global Mapper, aunque conocido, nunca había realizado ningún trabajo con él. Ha sido un programa que ofrece gran cantidad de operaciones con datos espaciales de una forma sencilla y con un aprendizaje rápido y sencillo gracias al manual del que dispone. El idioma ha sido el

único inconveniente que le he encontrado, ya que, tratándose de palabras técnicas, a veces me he encontrado con conceptos que me han costado interpretar al momento.

A la hora de realizar el trabajo de topografía clásica, este proyecto me ha ayudado a recordar aquellas técnicas estudiadas durante el grado, como son:

- La radiación de puntos con la estación total.
- El levantamiento de la zona de estudio con la técnica de posicionamiento RTK.

En la última parte del desarrollo del proyecto he podido comparar dos modelos digitales de elevaciones, el primero fue el resultado del trabajo fotogramétrico realizado, utilizando como datos de partida aquellos que provenían del vuelo, el segundo tenía como datos de partida aquellos obtenidos mediante técnicas de topografía clásica. Finalmente he podido comprobar que, aunque con los dos procedimientos realizados se obtienen resultados similares, aquellos que provienen de la fotogrametría quedan mejor definidos y con mayor precisión. Pienso que para realizar un MDE mediante topografía clásica con la precisión e información con la que se obtiene mediante fotogrametría, habría que realizar un trabajo de campo muy completo con un levantamiento de puntos muy denso para llegar a obtener los mismos resultados.

Las ventajas encontradas a la hora de definir el MDE mediante métodos de fotogrametría han sido numerosas:

- Es un trabajo que se desarrolla en gran parte en gabinete, generando un ahorro de tiempo considerable.
- La nube de puntos densa que se genera durante el procesamiento de datos proporciona una información muy completa del objeto de estudio.

Entre los inconvenientes encontrados cabe destacar:

- Es fundamental disponer de un equipo informático con los requisitos necesarios para el procesamiento de datos, principalmente por el ahorro de tiempo que supone a la hora de procesar los datos.
- Para que el MDE quede bien referido al terreno hay que hacer una buena clasificación de los puntos de la nube densa, lo que se convierte en un inconveniente debido a la densidad de los mismos.

A la hora de crear el MDE por topografía clásica tenemos se han encontrado diversos inconvenientes:

- Para definir el modelo con la misma precisión que por métodos fotogramétricos habría que realizar un levantamiento muy denso, generando listados de puntos muy extensos.

- Pueden encontrarse zonas de difícil acceso.
- Los equipos GPS, en este caso Leica GPS 1200, no siempre realizan una toma correcta de los puntos, debido a la pérdida de algún satélite o si se interrumpe la señal entre los receptores fijo y móvil.
- Al perder señal con los satélites cerca de los edificios, nos obliga a tener que recurrir a otros métodos para tomar aquellos puntos que componen la geometría del edificio.

La principal ventaja que veo a la hora de utilizar los métodos de topografía clásica es que el tiempo de procesamiento y gestión de los datos en el trabajo de gabinete es menor que utilizando métodos fotogramétricos.

Gracias a este trabajo he podido poner en práctica aquellos conocimientos adquiridos durante el grado y, a su vez, seguir ampliando mis conocimientos en fotogrametría mediante el uso de nuevas tecnologías.

7. BIBLIOGRAFÍA

Santana, Ernesto. (2017). Levantamientos topográficos con drones- fotogrametría aérea con drones. XDRONES: <http://www.xdrones.es>

Burón, Rubén. PPAS/UAV: Analisis de los factores que influyen en la calidad métrica de los resultados. Geotronics.

Jaime. (Abril 2018). Ventajas e inconvenientes de la fotogrametría con drones. DroneSpain: <http://dronespain.pro/>

Jaime. (Mayo 2018). Tipos de drones aereos. DroneSpain: <http://dronespain.pro/>

Marquez, A. Los drones en la cartografía automática y la generación de nube de puntos. MECINCA.

Santana, Ernesto. (2017). Tipos de drones-Categorías de drones. XDRONES: <http://www.xdrones.es>

Desconocido. (Septiembre 2016). Ventajas de la fotogrametría con drones. <http://www.areadron.com/>

N. Bustos, Guillermo. Documento de cátedra

Pérez Álvarez, J. Antonio. Apuntes de los cursos de Fotogrametría II y Fotogrametría digital y teledetección.

Páginas Webs consultadas:

<https://leica-geosystems.com/>

<http://habitateea.es/habitat/>

<https://www.multicoptero.com/es/>

<https://www.4dmetric.com/>

<http://www.areadron.com/>

<http://www.topoedu.es/>

<http://ardupilot.org/planner/index.html>

<https://www.agisoft.es/products/agisoft-photoscan/>

<https://www.instop.es/index.php>

<http://lidar.com.es/>

Anexos

Todos los anexos y archivos generados durante la realización del proyecto se encuentran en el CD adjunto.



UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA		CENTRO UNIVERSITARIO DE MÉRIDA	
GRADO EN INGENIERÍA EN GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA	TRABAJO FIN DE GRADO	PLANO N.º: 1	ESCALA: 1/2000
PLANO: ORTOFOTO DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE MÉRIDA			
AUTOR: TUTOR:	ALVARO GONZALEZ GONZALEZ JUAN ANTONIO PÉREZ ALVAREZ		FECHA: 1-6-18