

UNIVERSIDAD DE JAÉN  
*Nombre del Centro*

Trabajo Fin de Grado

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS  
GEOMÁTICAS A LA  
DOCUMENTACIÓN DEL  
PATRIMONIO HISTÓRICO:  
CASTILLO DE BURGALIMAR  
[SIGLO X, BAÑOS DE LA  
ENCINA, PROVINCIA DE JAÉN]**

**Alumno: Juan Fco Alcántara Sánchez**

Tutor: D. Francisco Javier Cardenal Escarcena  
D. Jose Luis Pérez García

Dpto: Ingeniería Cartográfica, Geodésica y  
Fotogrametría

**Junio, 2015**

## Índice

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 1. PROLOGO.....                                                 | 4  |
| 2. INTRODUCCION.....                                            | 5  |
| 2.1. Antecedentes.....                                          | 5  |
| 2.2. Objetivos del trabajo.....                                 | 6  |
| 2.3. Justificación.....                                         | 7  |
| 2.4. Partes del documento.....                                  | 8  |
| 3. ASPECTOS METODOLOGICOS.....                                  | 9  |
| 3.1. Laser Escáner 3D.....                                      | 9  |
| 3.1.1. Fundamento teórico.....                                  | 9  |
| 3.1.2. Ventajas del método.....                                 | 9  |
| 3.1.3. Registro y Georreferenciación.....                       | 9  |
| 3.1.4. Procedimiento de un proyecto con Laser Escáner 3D.....   | 10 |
| 3.2. Fotogrametría.....                                         | 12 |
| 3.2.1. Conceptos teóricos.....                                  | 12 |
| 3.2.2. Procedimiento de un proyecto fotogramétrico.....         | 13 |
| 3.3. UAV (Unmanned Aerial Vehicle).....                         | 15 |
| 3.3.1. Procedimiento de un proyecto fotogramétrico con UAV..... | 15 |
| 3.4. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL POR SATÉLITE (GNSS)..... | 16 |
| 3.3.1. Fundamentos GNSS.....                                    | 16 |
| 3.3.2. Procedimiento de un proyecto GNSS.....                   | 18 |
| 4. APLICACIÓN METODOLOGICA.....                                 | 19 |
| 4.1. Instrumentación y Software utilizados en el trabajo.....   | 19 |
| 4.1.1. Instrumentación.....                                     | 19 |
| 4.1.2. Software empleado.....                                   | 26 |
| 4.2. Situación y descripción de la zona.....                    | 27 |
| 4.2.1. Situación.....                                           | 27 |
| 4.2.2. Enclave de la fortaleza.....                             | 28 |
| 4.2.3. Características de la fortaleza.....                     | 28 |
| 4.2.4. Interior de la fortaleza.....                            | 29 |
| 4.2.5. Materiales de construcción de la fortaleza.....          | 29 |
| 4.3. Fases de los proyectos.....                                | 30 |
| 4.3.1. Fase de planificación y tomas de decisiones.....         | 30 |



|           |                                                      |    |
|-----------|------------------------------------------------------|----|
| 4.3.1.1   | Planificación fotogramétrica.....                    | 30 |
| 4.3.1.1.1 | Planificación del vuelo. ....                        | 30 |
| 4.3.1.2   | Planificación láser escáner 3D. ....                 | 34 |
| 4.3.1.3   | Planificación de la red GNSS. ....                   | 35 |
| 4.3.2     | Trabajos de campo. ....                              | 37 |
| 4.3.2.1   | Toma de puntos de apoyo mediante técnicas GNSS. .... | 37 |
| 4.3.2.2   | Adquisición de los escaneos. ....                    | 39 |
| 4.3.2.3   | Ejecución del vuelo fotogramétrico.....              | 41 |
| 4.3.3     | Trabajo de Gabinete.....                             | 43 |
| 4.3.3.1   | Puntos de Apoyo. ....                                | 43 |
| 4.3.3.2   | Tratamiento de los datos del laser escáner 3D. ....  | 48 |
| 4.3.3.3   | Tratamiento de los datos fotogramétricos. ....       | 52 |
| 5.        | RESULTADOS, PRODUCTO OBTENIDO Y CONCLUSIONES. ....   | 54 |
| 5.1       | Resultados. ....                                     | 54 |
| 5.1.1     | Laser escáner 3D. ....                               | 56 |
| 5.1.2.    | Fotogrametría.....                                   | 59 |
| 5.2       | Producto Obtenido. ....                              | 62 |
| 5.2.1     | Laser escáner 3d (I-Site).....                       | 63 |
| 5.2.3.    | Fotogrametría (PhotoScan).....                       | 65 |
| 5.2.4     | Productos con impresoras 3D. ....                    | 67 |
| 5.3       | Conclusiones. ....                                   | 69 |

## ANEXOS

**Anexo 1 – Reseñas de bases y puntos de apoyo**

**Anexo 2 – Plano de Ortofoto**

**Anexo 3 – Informe generado por PhotoScan**

## 1. PROLOGO.

El trabajo que se presenta se realiza para la asignatura Trabajo Fin de Grado (TFG), asignatura que se cursa en todos los estudios de Grado, consta de una carga lectiva de 12 créditos, esta carga lectiva se encuentra en el segundo cuatrimestre del cuarto curso de los estudios de Grado. El estudio de Grado que se contempla en este trabajo es el de “**Grado en Ingeniería Geomática y Topográfica**” en la Universidad de Jaén (UJA).

Con la realización de este trabajo se pone en práctica los conocimientos adquiridos durante los cuatro cursos correspondientes a la carrera.

El presente trabajo se titula: “Aplicación de técnicas Geomáticas a la documentación del patrimonio histórico: Castillo de Burgalimar [Siglo X, Baños de la Encina, Provincia de Jaén]”.

## **2. INTRODUCCION.**

### **2.1. Antecedentes**

En el mercado actual se encuentran disponibles varios productos de fotogrametría digital, entre estos productos, modelos digitales de elevaciones (MDE) así como ortofotografías digitales.

La toma de datos para obtener estos productos ha avanzado mucho desde las primeras técnicas con imágenes orto-normales con cámaras analógicas, a la actualidad que se disponen de muchas más técnicas como fotogrametría convergente y cámaras digitales.

Para la adquisición de estos productos la tecnología informática también ha avanzado desde los antiguos estereoscopios para la adquisición de cartografía topográfica a partir de imágenes, a los nuevos softwares con la llegada de las imágenes digitales al mercado.

El siguiente trabajo se ha llevado a cabo mediante nuevas tecnologías. Concretamente laser escáner 3D y UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

Un UAV, es una aeronave que vuela sin tripulación a bordo.

Un escáner laser 3D es un dispositivo de captura de objetos o una escena para reunir datos de su forma y ocasionalmente su color. La información obtenida se puede usar para construir modelos digitales tridimensionales que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones. Desarrollados inicialmente en aplicaciones industriales, han encontrado un amplio campo de aplicación en actividades como la ingeniería civil, medio ambiente, Ciencias de la Tierra o patrimonio histórico, entre otras.

En este trabajo se muestran ambas metodologías de trabajo, aplicadas en el entorno del castillo de Buralimar de Baños de la Encina (Jaén), mostrando al final del trabajo ventajas e inconvenientes de una y otra técnica, y una posible combinación de las técnicas, para la obtención de productos cartográficos en la obtención de documentación del patrimonio histórico.

## **2.2. Objetivos del trabajo**

Cabe destacar dos claros objetivos en este proyecto un objetivo académico y un objetivo técnico.

En primer lugar el objetivo académico se trata de obtener el título de Graduado en Ingeniería en Geomática y Topográfica por el autor del proyecto, así como la de poner en práctica los conocimientos adquiridos durante los estudios de grado.

El objetivo técnico es la adquisición de productos fotogramétricos por diferentes técnicas fotogramétricas:

1. Determinar la viabilidad del empleo de técnicas geomáticas,
2. Obtención de productos 2D y 3D mediante levantamientos fotogramétricos del castillo de Burgalimar dentro del término municipal de Baños de la Encina. Los productos a obtener son: ortoimágenes de las zonas de interés y modelos 3D del castillo.
3. Maquetas a través de impresiones 3D.

### **2.3. Justificación.**

En primer lugar hay que hablar de la justificación académica, el siguiente trabajo supone la puesta en escena de los conocimientos obtenidos así como las competencias y habilidades adquiridas durante el periodo de docencia y afianzar estos conocimientos.

Sobre la justificación técnica del trabajo cabe destacar:

Las nuevas tecnologías han introducido muchas innovaciones y mejoras a la forma de trabajar en geomática, la incorporación de los UAVs a la fotogrametría ha abierto nuevas aplicaciones en diversos campos de trabajo y el escáner laser 3D ha supuesto la captura masiva de información frente a la topografía clásica. Es interesante testear estas tecnologías para ver sus ventajas o limitaciones en zonas piloto y de las mismas características, de tal manera que se puedan extraer conclusiones sobre su correcta aplicación y adecuación a cada proyecto y necesidad concreta.

Hay que destacar que la inclusión de los sistemas UAV, para la obtención de fotogramas es relativamente reciente, no obstante, anteriormente se había intentado simular esta tecnología mediante diversos sistemas (globos de helio, mástiles, etc.) pero estos eran mucho más laboriosos, además de ofrecer unos resultados bastante menos competitivos que hoy día con estas tecnologías.

No obstante se ha de hacer mención que dicha tecnología presenta los mismos problemas que la fotogrametría clásica, por tanto, se incorpora a la realización del estudio un sistema laser, con el objetivo de comparar, o mejorar los productos obtenidos mediante fotogrametría por UAV.

#### **2.4. Partes del documento.**

El documento consta de Memoria, y productos fotogramétricos obtenidos con varias técnicas de fotogrametría.

En la memoria se definen las técnicas utilizadas en el trabajo así como la ejecución de la toma de datos y el tratamiento de los datos en gabinete.

Los productos obtenidos se dividen según la técnica utilizada para la realización del mismo.

Cabe destacar las superficies en formato obj exportables a diversos programas de tratamiento en 3D, realidad virtual o sistemas 3D de impresión. Los PDFs 3D también son destacables ya que este formato es un formato universal y cómodo para la visualización de los productos 3D.

### **3. ASPECTOS METODOLOGICOS.**

#### **3.1. Laser Escáner 3D.**

##### **3.1.1. Fundamento teórico.**

El escáner laser terrestre es un instrumento cuyo funcionamiento se basa en el barrido de la zona a estudiar mediante un haz de luz láser, según unos incrementos constantes de giro prefijados.

Los datos obtenidos son las coordenadas 3D a intensidad de un conjunto de puntos en un sistema de referencia instrumental.

##### **3.1.2. Ventajas del método.**

Ventajas de la metodología escáner laser 3D:

Rapidez en la obtención de la información; gran densidad – resolución; obtención de información espacial y de intensidad; y no se necesita estar en contacto con el objeto a escanear.

##### **3.1.3 Registro y Georreferenciación.**

Cuando el objeto a escanear es demasiado grande (como el caso que nos ocupa) para que se escanee desde una única posición, aparece la necesidad de varios estacionamientos para poder acceder a zonas ocultas y otras partes del objeto. Cada escaneo individual está referenciado al sistema de coordenadas del escáner en esa posición.

El registro es la orientación relativa de los datos obtenidos en cada escaneo y se puede realizar por medio de dianas, esferas, etc. O por medio de nube de puntos identificando en varios escaneos los puntos comunes en la nube de puntos.

La georreferenciación se trata de la obtención del producto en el sistema de coordenadas definido, ya sea local u oficial.

### 3.1.4 Procedimiento de un proyecto con Laser Escáner 3D.

El flujo de trabajo (**Figura 1 – Flujo de trabajo mediante la técnica del laser escáner 3d**) técnica para esta técnica geomática se divide en tres fases que se explican a continuación.

#### 1. Determinación de objetivos (fase de planificación y de toma de decisiones).

En esta fase se analiza el área u objeto a levantar teniendo en cuenta los recubrimientos entre posibles estacionamientos y determinando las posibles posiciones más óptimas de los estacionamientos del escáner y de los puntos de apoyo para su futura georreferenciación o registro.

#### 2. Trabajo en campo.

Esta fase es la más compleja, ya de que ella depende si se obtienen unos buenos productos o no. En este punto hay que llevar en práctica la solución adoptada en la fase anterior. Hay que tener en cuenta varios factores como la definición del área a escanear, la resolución y los recubrimientos. La primera fase es una fase teórica, pudiendo ser modificada en esta fase para conseguir un producto mejor.

En esta fase se realiza el apoyo topográfico para una posterior georreferenciación de las nubes de puntos obtenidas en el proceso de escaneo del objeto. Para ello se utilizarán dianas o puntos bien definidos en el terreno.

#### 3. Trabajo de Gabinete.

Los pasos a seguir en esta fase son:

- a. Tratamiento de los datos, limpieza y filtrado de los mismos.
- b. Registro y Georreferenciación.
- c. Procesamiento de nubes de puntos
- d. Extracción de información.





Figura 1 – Flujo de trabajo mediante técnicas escáner Laser 3D

### 3.2. Fotogrametría.

La fotogrametría es una ciencia que trata de obtener información fiable sobre objetos físicos y del medio en el que se encuentra mediante el proceso de registro, medidas e interpretación de imágenes fotográficas u otras imágenes derivadas de modelos de energía radiante electromagnética. Esta definición incorpora la información espectral y radiométrica que la imagen digital posibilita.

#### 3.2.1 Conceptos teóricos.

De manera sencilla puede decirse que la técnica fotogramétrica consiste en transformar la información bidimensional (x,y) suministrada por las fotografías en información espacial o tridimensional (X, Y, Z) del objeto fotografiado.

El método general de la fotogrametría consiste en resolver los procesos de: orientación interna, relativa y absoluta.

Una característica importante en fotogrametría es que la cámara fotográfica debe estar calibrada, por tanto, hay un conocimiento de los parámetros internos de la cámara: distancia principal o focal, las coordenadas del punto principal y la función de distorsión del sistema de lentes. En caso de desconocimiento de estos parámetros de calibración, será necesario el empleo de métodos adecuados (autocalibración, DLT, etc.), que permitan la obtención de productos con carácter métrico. Ello permite el empleo de cámaras no métricas, si bien en función de la calidad de la cámara y los métodos de trabajo aplicados, los productos tendrán mayor o menor precisión.

Antes de comenzar cualquier trabajo hay que definir los errores máximos permitidos, ya que esto condicionara los procesos de cálculo posteriores.

$$T \leq 0,2 E$$

Por tanto, en el caso de emplear esta técnica, la precisión de la cartografía dependerá en gran medida de:

1. Distancia del centro de proyección de la cámara fotográfica al objeto.
2. Conocimiento fidedigno del certificado de calibración de la cámara.
3. Distancia focal de la cámara.
4. Tamaño del pixel

## 5. Precisión del apoyo topográfico.

Para desarrollar la técnica fotogramétrica es necesario disponer de fotografías con recubrimiento del objeto, esto es, el objeto fotografiado debe aparecer en al menos dos imágenes para observarlas posteriormente con visión estereoscópica o sin estereoscopia.

### 3.2.2. Procedimiento de un proyecto fotogramétrico.

El flujo de trabajo (**Figura 2 – Flujo de trabajo mediante la técnicas fotogramétricas**) para esta técnica geomática se divide en tres fases:

#### 1. Determinación de objetivos (fase de planificación y toma de decisiones).

En esta fase se tendrá que elegir el tipo de fotogramas (tomas normales o tomas convergentes), cámara a utilizar (digital o analógica), el producto a obtener, el número de fotogramas, recubrimientos, elección de la plataforma (mástil, UAV) y planificación de la misión o del proyecto de vuelo en el caso de un UAV), diseño de la red de puntos de apoyo, elección de dianas o puntos naturales, etc.

#### 2. Trabajo en Campo

Se realiza la toma fotográfica, con los medios acordados según el tipo de productos a obtener en la primera fase.

Simultáneamente se realizará el apoyo topográfico para una posterior georreferenciación de las nubes de puntos obtenidas en el proceso de escaneo del objeto. Para ello se utilizarán dianas o puntos bien definidos en el terreno.

#### 3. Trabajo en Gabinete.

Esta fase a su vez se divide en tres fases:

- ✓ En primer lugar se ajusta el bloque con el software elegido en el primera fase del proyecto fotogramétrico.
- ✓ En segundo lugar se realiza el modelo del objeto con el mismo software.
- ✓ En tercer lugar se realiza la edición donde se perfilan y determinan los resultados de los productos obtenidos.



**Figura 2 – Flujo de trabajo mediante técnicas fotogramétricas**

### 3.3. UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

En este punto cabe hablar de los UAVs, el cual es el método elegido en este trabajo, ya que en la actualidad es una de las técnicas más empleadas en la fotogrametría. La idea de poder sobrevolar una extensión determinada para capturar la información y en gabinete poder reconstruir el modelo para obtener su geometría y elementos. La posibilidad de elevar los sensores y capturar desde el aire el objeto hace que esta técnica tenga un gran potencial. Ello no impide que, llegado el caso, se puedan combinar las tomas aéreas con tomas terrestres.

En determinados proyectos, los elevados costes que supone el despegue de un avión para la realización de la toma fotográfica hacen descartar esta técnica, por lo que el empleo de un UAV, a costes muy inferiores, hacen viables las técnicas aéreas.

#### 3.3.1 Procedimiento de un proyecto fotogramétrico con UAV.

El flujo de trabajo (**Figura 2 – Flujo de trabajo mediante la técnicas fotogramétricas**) en fotogrametría por medio de UAV en líneas generales es el mismo que se emplea en otras técnicas fotogramétricas aéreas convencionales.

##### 1. Determinación de objetivos (fase de planificación y toma de decisiones)

Aunque se esté trabajando con UAV, al fin y al cabo es un procedimiento fotogramétrico y hay que tener en cuenta en esta fase todas las especificaciones mencionadas en la primera fase de procedimiento de un proyecto fotogramétrico con la diferencia que, en este caso, además hay que realizar el diseño del vuelo en función de la resolución que se pretenda obtener mediante el un software donde se programara una ruta de vuelo que se ejecutara de forma autónoma.

##### 2. Trabajo de Campo.

En esta fase se realiza simultáneamente el apoyo topográfico y la toma de fotogramas según el plan de vuelo planificado.

##### 3. Trabajo de Gabinete

Esta fase es igual que la de la metodología fotogramétrica.

### 3.4 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL POR SATÉLITE (GNSS).

Se debe de hablar de este sistema ya que forma parte de las otras tres disciplinas estudiadas anteriormente.

Se entiende por sistemas globales de posicionamiento a sistemas pasivos de navegación basado en satélites emisores de radiofrecuencias, que proporcionan un marco de referencia espacio-temporal con cobertura global, independientemente de las condiciones atmosféricas, de forma continua en cualquier lugar de la Tierra, y disponible para cualquier número de usuarios (*Global Navigation Satellite System*; GNSS).

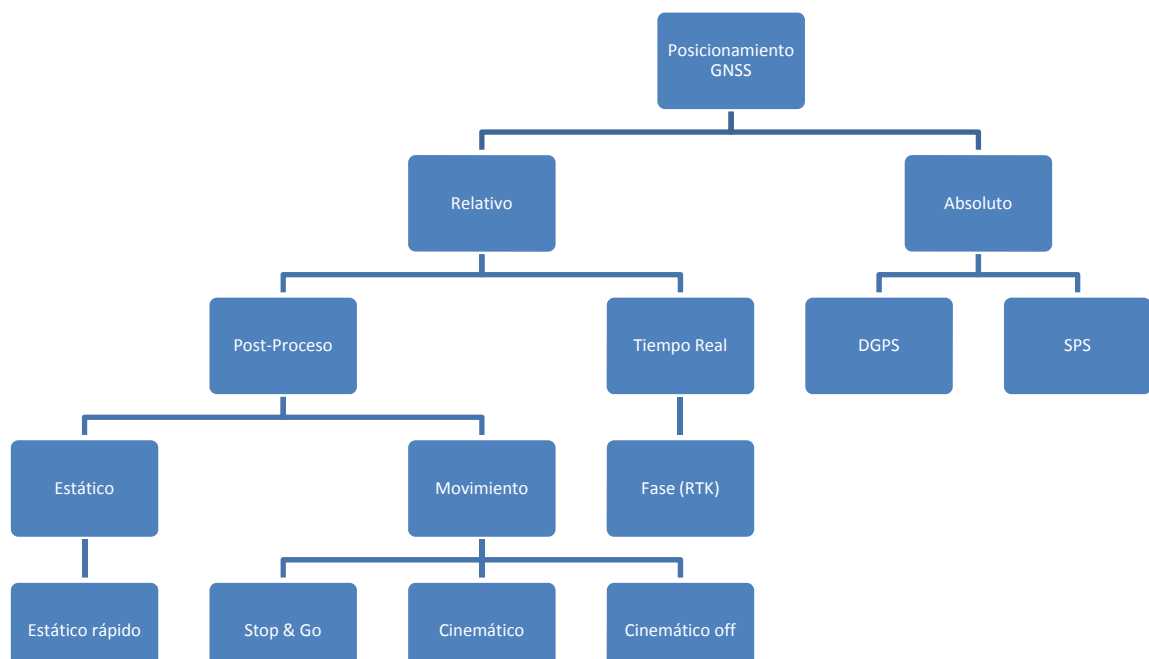
#### 3.3.1 Fundamentos GNSS.

Los satélites envían a través de las efemérides su posición, el receptor GNSS mide la distancia al satélite a través del tiempo que tarda la señal en llegar al receptor.

Son necesarios al menos cuatro satélites para obtener la posición del receptor.

La señal GNSS que recibe el receptor consta de dos portadoras en la banda L.

Hay tres formas de calcular la posición del receptor mediante fase, Pseudodistancia y código (**Figura 3 – Tipos de posicionamiento GNSS**).



**Figura 3 – Tipos de posicionamiento GNSS**

La tabla 1 representa las características de los posicionamientos.

| Tipo de posicionamiento   | Nº de receptores           | Observables   | Nº de satélites | Precisión  | Aplicación                          |
|---------------------------|----------------------------|---------------|-----------------|------------|-------------------------------------|
| Absoluto                  | 1                          | Código        | 4               | 15 – 100 m | Barcos en alta mar                  |
| RTK                       | 2<br>1 (fijo)<br>1 (móvil) | Fase          | 4               | 0,015 m    | Replanteos<br>MDT<br>Levantamientos |
| Estático (post-proceso)   | 2 o +                      | Fase y Código | 4               | 0,005 m    | Controles geodésicos                |
| Cinemático (post-proceso) | 2<br>1 (fijo)<br>1 (móvil) | Fase y Código | 4               | 0,02 m     | Batimetría                          |
| Stop and go               | 2<br>1 (fijo)<br>1 (móvil) | Fase y Código | 4               | 0,02 m     | Levantamientos                      |

Tabla 1 – Tabla de características de los posicionamientos

### **3.3.2 Procedimiento de un proyecto GNSS.**

#### **1. Determinación de objetivos (fase de planificación y toma de decisiones)**

En esta fase se decide el tipo de posicionamiento según la precisión que se desee, el tipo de puntos de apoyo a medir, la distribución de los puntos de apoyo, sistema de referencia a utilizar, etc.

#### **2. Trabajo de campo**

Se ejecuta como se haya decidido en la fase anterior, se realizan fotografías de los puntos de apoyo, así como un croquis para la creación de la reseña de puntos de apoyo, así como para su fácil localización en una futura visita.

#### **3. Trabajo de gabinete.**

Se calculan las coordenadas de los puntos de apoyo en el sistema establecido en la primera fase con un software específico para la marca de los equipos GNSS y se crean las reseñas de los puntos de apoyo.



## 4. APLICACIÓN METODOLOGICA.

### 4.1 Instrumentación y Software utilizados en el trabajo.

#### 4.1.1 Instrumentación.

Lo especial de este TFG es la utilización de herramientas novedosas de última generación que ha revolucionado el mundo de la topografía y la cartografía: un UAV es un vehículo aéreo no tripulado, teledirigido, que, en el tipo de aplicaciones que nos ocupa, lleva incorporado una cámara digital. Supone una herramienta muy práctica que permite la recogida de datos en un periodo de tiempo bastante corto y con una gran resolución dependiente, por supuesto de las características del trabajo y de la cámara empleada. El UAV junto con el escáner laser 3D el propósito permite crear una nube de puntos a partir de la recogida de datos espaciales y radiométricos sobre la superficie del objeto. Ambas son herramientas con las cuales la recogida de datos se realiza de forma rápida y precisa.

El modelo UAV elegido para la realización de este trabajo ha sido el **ASTEC FALCON 8 (Figura 4 – UAV ASTEC FALCON 8)** helicóptero con 8 motores guiado radiocontrol y equipado con sistema de posicionamiento y de navegación inercial (GPS/INS).



Figura 4 – UAV ASTEC FALCON 8

La cámara que lleva incorporada es una **SONY NEX 5N (Figura 5 – Cámara SONY NEX 5n)** de objetivo gran angular de 16 mm instalada en una montura con compensación automática de aleteo y cabeceo.



Figura 5 – Cámara SONY NEX 5n

Las especificaciones básicas del UAV son:

- Hasta 750 g de carga útil.
- Hasta 20 minutos de tiempo de vuelo con carga estándar
- 10 m/s de velocidad de viento máxima permitida.
- Propulsión redundante de ocho rotores.
- Campo de visión steam de la cámara
- Dispone de GPS, sensor de altitud (barométrico), brújula e IMU.
- 2,2 kg de peso máximo de despegue.

En la tabla 2 aparecen las especificaciones técnicas de la cámara son:

|                                           |                                      |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Características físicas</b>            |                                      |
| Material de fabricación                   | Metal                                |
| Dimensiones                               | 111 x 59 x 38 mm                     |
| Peso                                      | 269 g                                |
| <b>Sensor</b>                             |                                      |
| Tamaño                                    | APS-C (23,40 x 15,60 mm)             |
| Resolución                                | 16,0 mega píxeles (4912 x 3264)      |
| Proporciones                              | 3:02                                 |
| <b>Óptica</b>                             |                                      |
| objetivos intercambiables                 |                                      |
| <b>Visor</b>                              |                                      |
| tipo de visor                             | Electrónico (opcional)               |
| <b>Pantalla</b>                           |                                      |
| tamaño de pantalla                        | 3"                                   |
| resolución de pantalla                    | 920.000 px                           |
| Otros                                     | pantalla táctil                      |
|                                           | pantalla articulada                  |
| <b>Sensibilidad ISO</b>                   |                                      |
| Rango de sensibilidades ISO               | 100 - 25.600                         |
| ISO automático                            | Si                                   |
| <b>Modos de medición de la exposición</b> | medición matricial                   |
|                                           | medición central                     |
|                                           | medición puntual                     |
| <b>Modos de exposición</b>                | modo programa                        |
|                                           | prioridad de velocidad de obturación |
|                                           | prioridad de apertura                |
|                                           | Manual                               |
|                                           | modos de escena                      |
| <b>Enfoque</b>                            |                                      |
| Autofoco                                  | Si                                   |
| sistema de autofocus                      | por detección de contraste           |
| modos de autofocus                        | normal, continuo                     |
| puntos de enfoque                         | 25                                   |
| <b>Obturador y disparo</b>                |                                      |
| velocidad mínima de obturación            | 1/4000 seg                           |
| velocidad máxima de obturación            | 30 seg                               |
| disparo continuo                          | 10 fps                               |
| auto disparador                           | Si                                   |
| control remoto                            | Inalámbrico                          |

|                                     |             |
|-------------------------------------|-------------|
| <b>Estabilización de imagen</b>     |             |
| sistema de estabilización de imagen | Óptico      |
| <b>Flash</b>                        |             |
| flash externo                       |             |
| velocidad de sincronización         | 1/160 seg   |
| <b>Balance de blancos</b>           |             |
| numero de ajustes predefinidos      | 6           |
| ajuste manual                       |             |
| <b>Formatos de imagen</b>           |             |
| formato jpeg                        | formato raw |
| <b>Tarjetas de memoria</b>          |             |
| Formato                             | sd, ms      |
| numero de ranuras                   | 1           |
| <b>Conectividad</b>                 |             |
| Usb                                 | 2.0         |
| Hdmi                                | Si          |
| Wifi                                | Opcional    |
| Gps                                 | No          |

Tabla 2 – Tabla de características de la cámara SONY NEX 5n

El modelo de laser escáner 3D elegido ha sido el **SCANSTATION C10 de Leica** (Figura 6 – Escaner Laser 3D SCANSTATION C10 de Leica).



Figura 6 – Escáner Laser 3D SCANSTATION C10 de Leica

Las características técnicas del Scanstation C10 son:

- Alcance entre 0,1 y 100 metros
- Velocidad de almacenaje de 50000 puntos/segundo
- Precisión posicional de 6 mm / 50 m a 1 sigma
- Campos de visión 360° en horizontal y 270° en vertical
- Cámara digital integrada 1920 x 1920 pixel.

También ha sido necesario un GPS bifrecuencia para la medida de la red de puntos de apoyo en este caso se ha utilizado un **GPS Leica System 1200+** como base fija y otro **Lica Viva (Figura 7 – GPS Leica 1200+ y GPS Leica Viva)**.



Figura 7 – GPS Leica 1200+ y GPS Leica Viva

Las especificaciones técnicas de los GPS Leica son:

| SENSOR  | Fase en Post-Proceso |                |
|---------|----------------------|----------------|
|         | Estático H/V         | Cinemático H/V |
| GX1230+ | 5mm + 0,5ppm         | 10mm + 1ppm    |
|         | 10mm + 0,5ppm        | 20mm + 1ppm    |
| GS15    | 3mm + 0,1ppm         | 8mm + 1ppm     |
|         | 3,5mm + 0,4ppm       | 15mm + 1ppm    |

Tabla 3 – Especificaciones técnicas de los equipos GNSS en Post Proceso

| SENSOR  | Fase en tiempo Real |                | CODIGO                |
|---------|---------------------|----------------|-----------------------|
|         | Estático H/V        | Cinemático H/V | Estático – Cinemático |
| GX1230+ | 5mm + 0,5ppm        | 10mm + 1ppm    | 25 cm                 |
|         | 10mm + 0,5ppm       | 20mm + 1ppm    |                       |
| GS15    | 8mm + 1ppm          | 8mm + 0,5ppm   | 25 cm                 |
|         | 15mm + 1ppm         | 15mm + 0,5ppm  |                       |

Tabla 4 – Especificaciones técnicas de los equipos GNSS en RTK y Código

#### 4.1.2 Software empleado.

Los softwares empleados han sido: **Leica Geo Office** empleado para tratar los puntos de control medidos, **Agisoft PhotoScan** para la orientación del bloque fotogramétrico y **Maptek I-site Studio 4.2** para el tratamiento de las nubes de puntos obtenidos con el laser escáner 3D.

Otros softwares empleados y no menos importantes han sido: un software de **entorno de CAD** para la elaboración y diseño final de los productos fotogramétricos obtenidos y por ultimo mencionar **AscTec\_AutoPilot\_Control** para la planificación y ejecución del vuelo.



## 4.2 Situación y descripción de la zona.

### 4.2.1 Situación.

El trabajo que se está redactando se ha ejecutado en el municipio de Baños de la Encina. Baños de la Encina es un municipio español de la provincia de Jaén, Andalucía, situado en la comarca de Sierra Morena.

Los trabajos se han realizado en la plaza Santa María 1 de Baños de la Encina con referencia catastral 2151501VH3225S0001ZE.

|                           |                      |
|---------------------------|----------------------|
| <b>País</b>               | España               |
| <b>Comunidad Autónoma</b> | Baños de la Encina   |
| <b>Provincia</b>          | Jaén                 |
| <b>Termino Municipal</b>  | Baños de la Encina   |
| <b>Ref. Catastral</b>     | 2151501VH3225S0001ZE |

Tabla 5 – Tabla Resumen de la localización del castillo

Las coordenadas geodésicas aproximadas del castillo de Buralimar en el sistema de referencia ETRS89, adoptado como oficial para España son:

Latitud ( $\phi$ ) = 38° 10' 13" N

Longitud ( $\lambda$ ) = 3° 46' 32" O

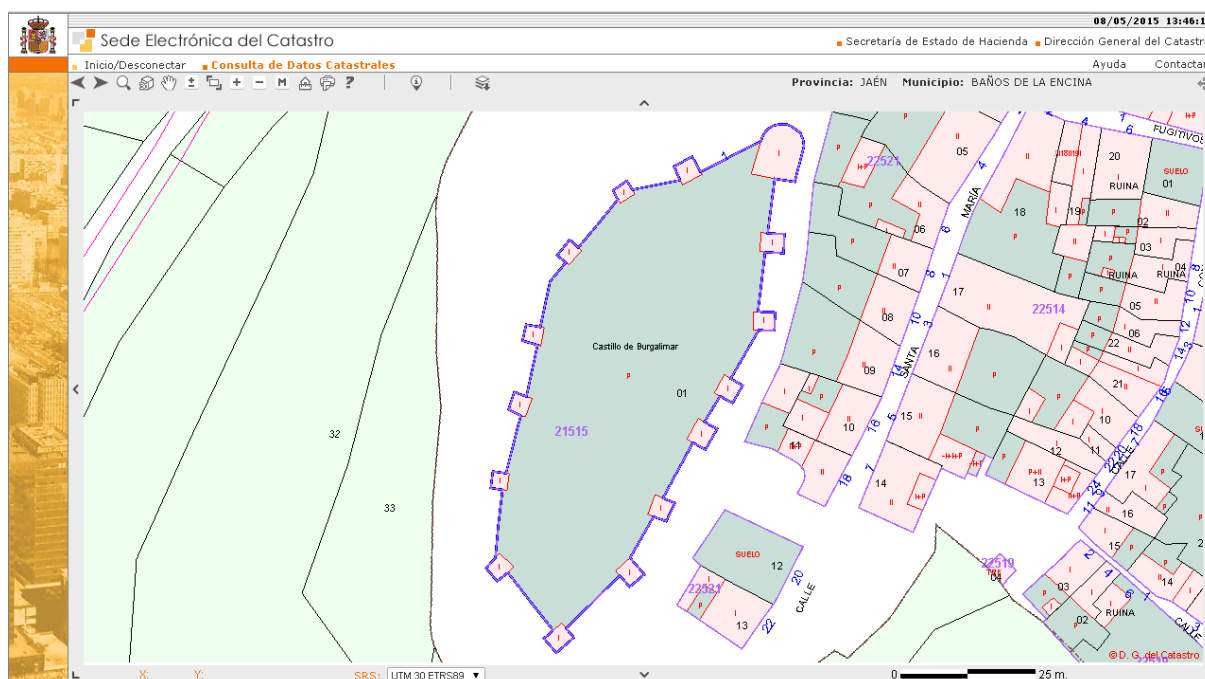


Figura 8 – Cartografía catastral de la situación del Castillo de Buralimar

#### 4.2.2 Enclave de la fortaleza.

El castillo de Baños de la Encina se levanta sobre una pequeña colina rocosa que le permite dominar el pueblo y, por tanto, todo el paisaje que le rodea. La fortaleza se encuentra cercana a otros importantes emplazamientos históricos, como las ruinas de la ciudad romana de Cástulo, carias casas señoriales de los siglos XVI y XVII, o varias ermitas donde entra la Iglesia Parroquial de San Mateo. Excavaciones arqueológicas realizadas en el interior de la fortaleza, han puesto al descubierto restos de uno o dos recintos amurallados que evidencian la existencia bajo la fortaleza de un asentamiento de la edad de Bronce, hecho que proporciona datos sobre la cultura argárica, una de las más importantes de la antigüedad del Mediterráneo Occidental, lo que muestra que el asentamiento controlaría una de las zonas estratégicas más importantes del Valle del Guadalquivir.

#### 4.2.3 Características de la fortaleza.

De apariencia sobria, se presenta bajo la forma de un perímetro con forma oval (100 metros en su eje mayor y 46 m en su eje menor, con una superficie total de 2.700 m<sup>2</sup>), punteado de catorce torres cuadrangulares de estilo califal y de igual altura sobrepasando apenas la de la muralla (**Figura 8 – Cartografía catastral de la situación del castillo**). El conjunto de estas catorce torres, severas y próximas entre sí, le confieren o afirman el carácter defensivo del castillo. Una torre adicional, la torre del homenaje (también llamada almena gorda), sería edificada en el siglo XV, y constituye en realidad una modificación cristiana de una de las torres originales. Esta torre, imponente, que resalta sobre las otras por sus dimensiones, no es característica de la arquitectura musulmana hispánica, sino que responde a cánones arquitectónicos cristianos. La torre del homenaje representa el poder de su ocupante. Así, su posición lo demuestra, pues no se dirige hacia el paisaje, sino hacia el pueblo, revelando por tanto su utilización simbólica, fiel a la costumbre feudal.

Tanto las murallas como las torres están dotadas de almenas o merlones y están perforadas por aspilleras. Las torres disponen de tres pisos e incluso de cuatro si estas se sitúan en un terreno más bajo. Las murallas presentan dos entradas que permiten el acceso. La primera es una puerta soberbia situada en el costado meridional entre dos altas torres. Presenta dos grandes arcos de herradura, sobre los cuales se dispone un matacán. El segundo acceso, más modesto, está situado sobre el costado norte de la muralla.

#### **4.2.4 Interior de la fortaleza.**

Las murallas rodean el patio de armas, en el que se halla un aljibe cubierto por una bóveda de medio cañón, y que está dividido en dos naves separadas.

Además de la torre del homenaje, también se observa otra modificación de la época cristiana dentro del recinto, vestigios de un pequeño fortín. Existía un alcaracejo circular o torreón imponente rodeado de una muralla interior, unida al recinto exterior por dos lienzos de pared. De esta obra, que dividía en dos partes la plaza de armas, sólo subsisten las bases del fortín y fragmentos de una de las paredes de defensa.

#### **4.2.5 Materiales de construcción de la fortaleza.**

Los materiales de construcción son bastante elementales. La materia prima es una mezcla denominada *tapial*, similar al adobe, que está hecha a base de arcilla, arena, cal y piedra cruda, con la que se confeccionaron los ladrillos que finalmente irán superpuestos unos sobre otros. La cal garantiza la robustez del edificio. Esta técnica responde a la necesidad básica de levantar con rapidez las fortificaciones, y explica el color específico del recinto, que oscila entre el pardo y el rojo. Sólo la torre del homenaje, más tardía, se construyó con otros métodos, siendo edificada en piedra con un estilo que se asemeja más al de las fortificaciones góticas.

### 4.3 Fases de los proyectos.

En este trabajo se diferencian tres tipos de proyecto (proyecto fotogramétrico, proyecto GNSS y proyecto para laser escáner) definidos anteriormente y que estudiaremos en conjunto, ya que consta de tres fases bien diferenciadas.

#### 4.3.1 Fase de planificación y tomas de decisiones.

La planificación es una de las fases más importantes en la realización de cualquier proyecto, con objeto de reducir la mayor parte de los costes indirectos, los tiempos de ejecución, estimar la calidad de los resultados obtenidos, etc.

##### 4.3.1.1 Planificación fotogramétrica.

Como se viene mencionando en apartados anteriores la toma de fotografías se lleva a cabo mediante un UAV, guiado por radio control y equipado con sistema de posicionamiento y de navegación inercial.

El UAV se controla desde el suelo mediante una estación móvil de control remoto diseñada para llevarla una persona y conectada a un PC.

Para la realización de la toma de datos fotográficos se realiza un proyecto de vuelo fotogramétrico mediante la interfaz del software **AscTec\_AutoPilot\_Control**es una herramienta versátil para controlar todas las funciones del sistema de vuelo.

**WayPoint Navigation:** empleando la navegación “Waypoint” el sistema AscTec Falcon 8 se utiliza para obtener imágenes aéreas del área de interés.

##### 4.3.1.1.1 Planificación del vuelo.

La planificación del vuelo se realiza en este punto empleando para ello una imagen de la zona previamente georreferenciada. Puede ser suficiente una imagen descargada desde algún servidor tipo Iberpix (**Figura 9 – Imagen Georreferenciada descargada de iberpix**).

Pasos a ejecutar en la elaboración de la planificación del vuelo con la herramienta “GPS Misión”.

- Importar la imagen satélite georreferenciada.
- Planificación del vuelo utilizando la herramienta “Matrix Editor”.

Se genera una matriz de vuelo que contiene:

- ✓ Posición del primer disparo.
- ✓ Recubrimiento longitudinal en la dirección del eje Y
- ✓ Recubrimiento transversal en la dirección del eje X
- ✓ Numero de disparos (fotos)
- ✓ Orientación de la matriz con respecto al norte geográfico
- ✓ Altura de vuelo desde la zona de despegue
- ✓ Altura sobre el objeto
- ✓ Inclinación de la cámara

Para cubrir la zona objeto de estudio una vez realizada la campaña de vuelo previa se opta por realizar dos pasadas paralelas y verticales y una pasada inclinada alrededor de la fortaleza para los muros del castillo.

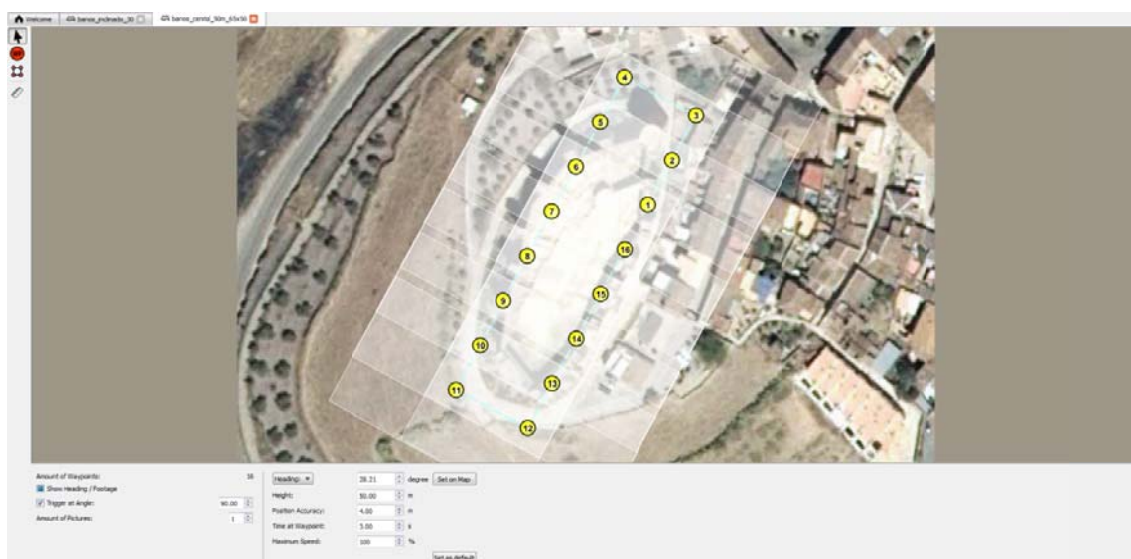


Figura 9 – Imagen Georreferenciada de la zona descargada de Iberpix

A Continuación se presenta en las tablas 6 y 7 los datos de los proyectos de vuelo utilizados en este trabajo con UAV (**Figura 10 - Software AscTec Navigator con la planificación de vuelo cenital**, **Figura 11 – Software AscTec Navigator con la planificación de vuelo inclinado.**)

|                                               |               |       |
|-----------------------------------------------|---------------|-------|
| Focal de la cámara                            | 16 mm         |       |
| GSD                                           | 0.01 m        |       |
| Recubrimiento longitudinal                    | 70 %          |       |
| Recubrimiento transversal                     | 40 %          |       |
| Numero de disparos                            | 16            |       |
| Orientación de la línea de vuelo              | De la 1 a 3   | 80°   |
|                                               | De la 4 a 11  | 260 ° |
|                                               | De la 12 a 16 | 80°   |
| Ángulo de inclinación                         | 90°           |       |
| Altura de vuelo desde la zona de despegue     | 50 m          |       |
| Altura de vuelo sobre el objeto a fotografiar | 45 m          |       |
| Orientación del Falcón                        | 80°           |       |

**Tabla 6 – Tabla con las características del vuelo Cenital**

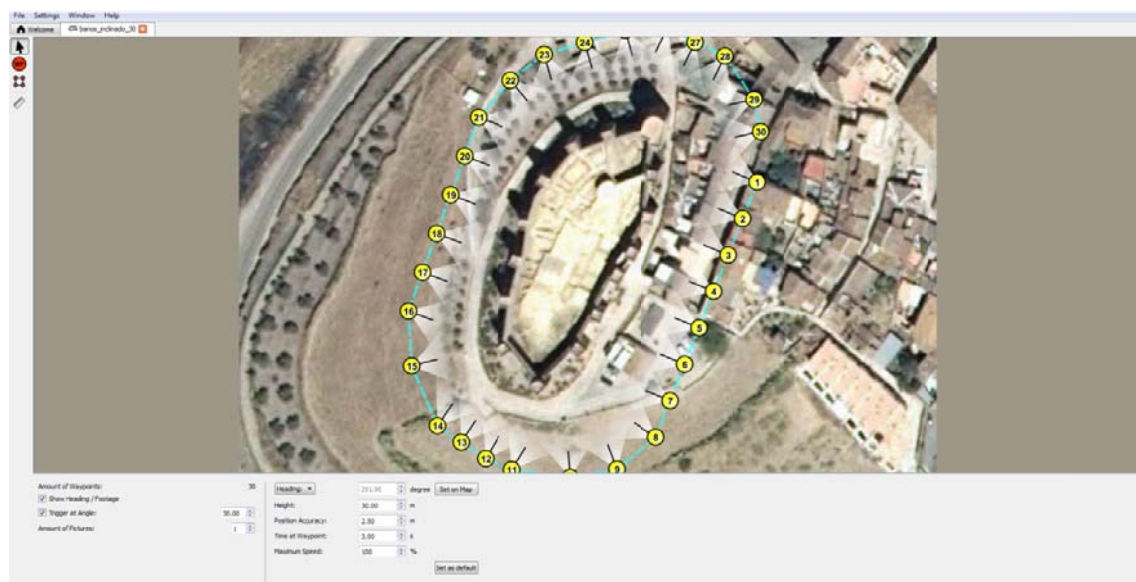


**Figura 10 – Software AscTec Navigator con la planificación de vuelo cenital**



|                                               |               |       |
|-----------------------------------------------|---------------|-------|
| Focal de la cámara                            | 16 mm         |       |
| GSD                                           | 0.01 m        |       |
| Recubrimiento longitudinal                    | 70 %          |       |
| Recubrimiento transversal                     | 40 %          |       |
| Numero de disparos                            | 30            |       |
| Orientación de la línea de vuelo              | De la 1 a 8   | 260°  |
|                                               | De la 9 a 15  | 180 ° |
|                                               | De la 16 a 23 | 80°   |
|                                               | De la 23 a 30 | 0°    |
| Ángulo de inclinación                         | 30°           |       |
| Altura de vuelo desde la zona de despegue     | 30 m          |       |
| Altura de vuelo sobre el objeto a fotografiar | 25 m          |       |
| Orientación del Falcón                        | 80°           |       |

**Tabla 7 – Tabla con las características del vuelo Inclinado**



**Figura 11 – Software AscTec Navigator con la planificación de vuelo inclinado**

#### **4.3.1.2 Planificación láser escáner 3D.**

En la planificación del proyecto láser escáner 3D habrá que tener en cuenta una serie de factores como es la resolución de escaneo, evitar zonas ocultas, los solapes que tienen que tener un escaneo contiguo, analizar la posibilidad de uso de dianas georreferenciadas.

En lo referente a la resolución de escaneo, esta será variable debido a que los objetos se encuentran a diferentes distancias del punto de estación del escáner. En el caso del presente trabajo la resolución se fijó en 2 cm a 10 m de distancia.

Hay que evitar zonas ocultas para ello hay que realizar tomas de diferentes posiciones ya que hay vegetación alrededor de la fortaleza.

Los solapes entre los escaneos no es un problema, ya que se realizan los escaneos alrededor de la fortaleza y además la estación escáner permite un giro de 360° en el plano horizontal.



#### 4.3.1.3 Planificación de la red GNSS.

En primer lugar se debe elaborar una planificación previa en la que se determinara la ubicación de los puntos de control (buena distribución en la zona de actuación, tanto para escáner como para el bloque fotográfico), el sistema de coordenadas a utilizar y los tipos de señal para los puntos de control (naturales o artificiales).

Los puntos de apoyo son necesarios para una correcta orientación del bloque fotográfico y la georreferenciación de los escaneos y los bloques fotográficos. Estos a su vez deben aparecer por toda la zona de manera que cada punto aparezca en varias fotografías.

Los puntos deben tener posición tanto en planimetría como en altimetría para obtener el modelo digital de la fortaleza.

Los puntos de apoyo se definirán a través de:

Para laser escáner 3D: se utilizaran marcas circulares blancas sobre fondo negro ya que son fáciles de localizar en los escaneos, así como la situación de la estación laser escáner. Se colocan al menos 3 dianas tipo en cada escaneo cubriendo todo el rango escaneado, evitando que las dianas estén alineadas, de la cual al menos una diana tipo debe aparecer en dos escaneos consecutivos para poder orientar entre si los dos escaneos.

Para el proyecto fotogramétrico: se utilizaran las mismas dianas tipo y algunos puntos naturales como arquetas, bordes de baldosas que se diferencien con claridad en las fotografías, etc. **(Figura 12 – Diana tipo y punto natural para la red de puntos de apoyo)**

El sistema de coordenadas a utilizar es el sistema oficial para España el ETRS89 y se mezclaran dos tipos de posicionamiento el post-Proceso y el RTK. El post proceso se realizara para dar coordenadas a la base a partir de la RAP (Red Andaluza de Posicionamiento) por si hay que realizar más de una visita a la zona y el RTK para dar coordenadas a los puntos de control así como a las estaciones de escáner.

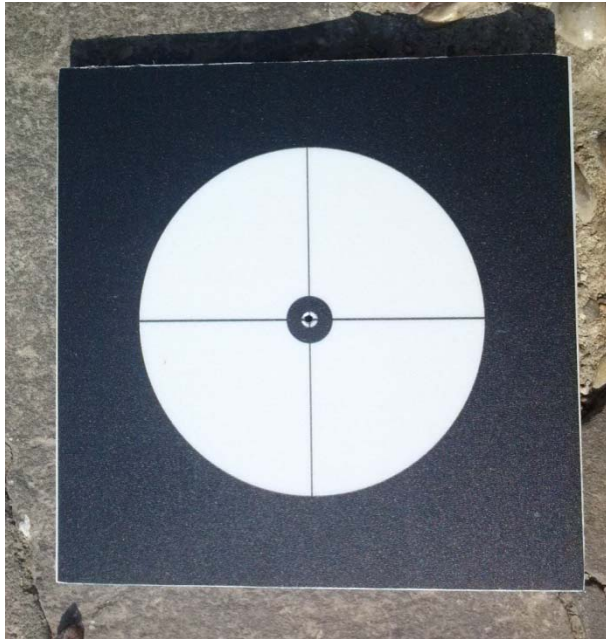


Figura 12 – Diana tipo y punto natural para la red de puntos de apoyo

### 4.3.2 Trabajos de campo.

Se examina la zona para comprobar que la planificación que se ha realizado se puede ejecutar sin problemas como por ejemplo colocación de dianas.

Como no se tiene suficientes dianas para los dos proyectos, se toma la decisión de ir trasladando las dianas del laser escáneren cada escaneo.

#### 4.3.2.1 Toma de puntos de apoyo mediante técnicas GNSS.

En primer lugar se materializa la posición de la base desde la cual se radiara los puntos de apoyo. Para ello se utiliza una punta hincada en una junta de baldosa, esta base se coloca en un lugar despejado que no impida el buen funcionamiento del equipo GNSS.

A pie de campo se reparten las dianas por toda la zona según lo establecido en la planificación previa para el vuelo fotogramétrico y se reconocen los puntos de apoyo naturales. Es recomendable preparar un croquis de campo para la identificación de los puntos de apoyo en el proceso de orientación.

Para medir la base se realiza mediante la técnica de post proceso (montando el equipo en un trípode) el equipo está midiendo durante todo el trabajo para un posterior calculo de coordenadas y a la vez emite correcciones para el cálculo de las coordenadas de los puntos de apoyo (**Figura 13 – Equipo GNSS colocado sobre trípode midiendo en post-proceso y emitiendo correcciones**).

Para la medición de los puntos de apoyo se monta el equipo GNSS en un jalón, midiendo los puntos de apoyo con el método RTK, el procedimiento es el siguiente:

- situar y nivelar el jalón sobre el punto
- ocupar el punto una medida de 5 segundos
- almacenar y pasar al siguiente punto de apoyo

Tras la colocación de las dianas algunas de estas no se pudieron medir ya que se encontraban muy próximas a los muros de la fortaleza y el equipo GNSS no recibía buena señal.



**Figura 13 – Equipo GNSS colocado sobre trípode midiendo en post proceso y emitiendo correcciones**

#### 4.3.2.2 Adquisición de los escaneos.

Se realizan dos visitas ya que en una sola jornada no se pudo escanear todo el castillo. En la primera visita se realiza 6 escaneos (**Figura 14 – Escaneo 1**) que ocupa la zona de la puerta principal del castillo. En la segunda visita se realizan 14 escaneos más para completar el exterior del castillo. En ambas visitas en el mes de Junio y Diciembre del 2014 las condiciones meteorológicas eran favorables.

| Estación | Nº de puntos | Angulo de barrido horizontal | Nº de puntos de control |
|----------|--------------|------------------------------|-------------------------|
| 1        | 9096855      | 93,0053 <sup>g</sup>         | 5                       |
| 2        | 10152159     | 96,1253 <sup>g</sup>         | 2                       |
| 3        | 11725791     | 103,0212 <sup>g</sup>        | 1                       |
| 4        | 13160637     | 105,1044 <sup>g</sup>        | 1                       |
| 5        | 11158191     | 103,0013 <sup>g</sup>        | 1                       |
| 6        | 7877839      | 75,0081 <sup>g</sup>         | 4                       |
| 7        | 909378       | 91,0000 <sup>g</sup>         | 2                       |
| 8        | 1223452      | 99,8883 <sup>g</sup>         | 4                       |
| 9        | 1883306      | 95,0754 <sup>g</sup>         | 3                       |
| 10       | 2141775      | 93,0085 <sup>g</sup>         | 2                       |
| 11       | 2321101      | 100,0013 <sup>g</sup>        | 3                       |
| 12       | 2215004      | 101,0012 <sup>g</sup>        | 1                       |
| 13       | 2021739      | 99,9953 <sup>g</sup>         | 3                       |
| 14       | 2020015      | 97,8835 <sup>g</sup>         | 3                       |
| 15       | 2077686      | 98,0001 <sup>g</sup>         | 1                       |
| 16       | 385004       | 23,0010 <sup>g</sup>         | 3                       |
| 17       | 217492       | 19,0032 <sup>g</sup>         | 1                       |

|       |          |                      |   |
|-------|----------|----------------------|---|
| 18    | 841137   | 42,0151 <sup>9</sup> | 1 |
| 19    | 903081   | 45,9038 <sup>9</sup> | 1 |
| 20    | 846904   | 44,9521 <sup>9</sup> | 1 |
| Total | 83183595 |                      |   |

Tabla 8 – Tabla Resumen escaneos realizados

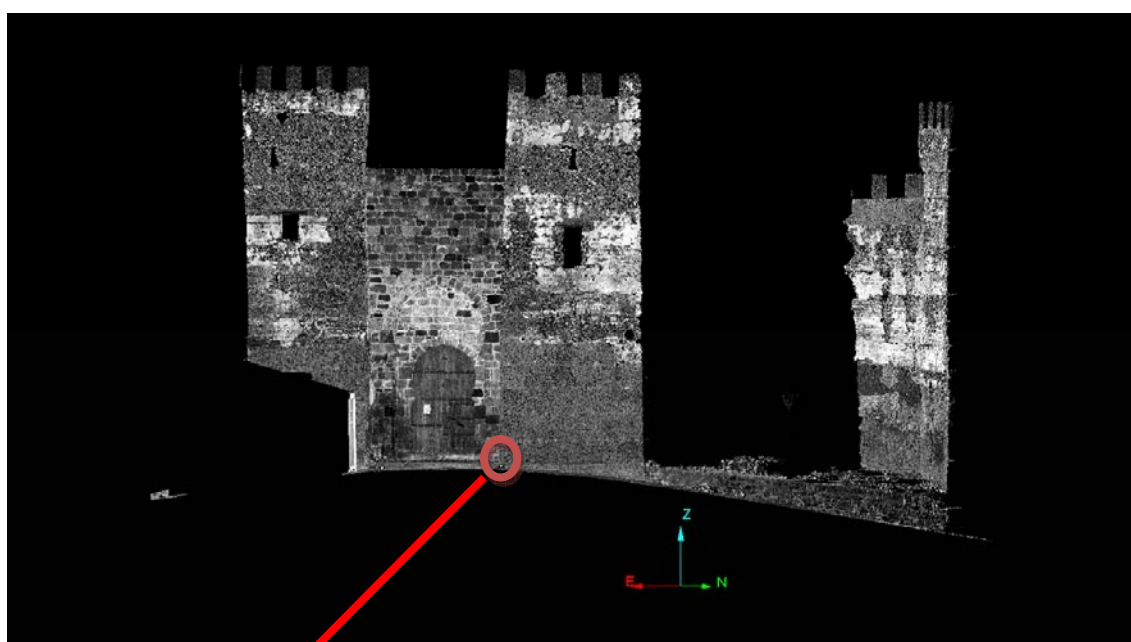


Figura 14 – Escaneo 1 9096855 puntos

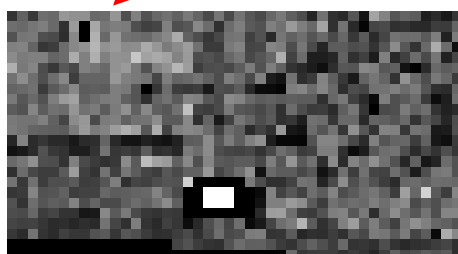


Figura 15 – Diana de punto de apoyo escaneada

#### 4.3.2.3 Ejecución del vuelo fotogramétrico.

La ejecución del vuelo se realiza mediante lo establecido en la planificación del vuelo, según se mencionó se planifica con un software específico “AscTec AutoPilot Control”, este software permite programar las características del vuelo y la ejecución automática del mismo.

Primero se debe tener en cuenta que las condiciones exteriores son las idóneas para la ejecución del vuelo:

Se realiza a una hora en que el sol está a una altura tal y que sea mayor a 40° sobre el horizonte. Así se consiguió poca sombra en las fotografías.

El modo elegido de vuelo es “GPS Mode”, el cual permite:

- ↯ control automático (realiza el vuelo de forma automática)
- ↯ mantiene la orientación en el aire
- ↯ mantiene la posición dentro de los límites de la precisión GPS que se le indique al sistema
- ↯ mantiene la altura dentro de los límites de control
- ↯ compensa la velocidad del viento hasta un límite de 10 m/s
- ↯ en el supuesto de que falle el funcionamiento GPS, se puede manipular desde la estación de control.

Pulsando el botón "Start Mission" el UAV se desplazara al primer punto de disparo. Desplazándose automáticamente de un punto de disparo al siguiente hasta acabar la misión. El tiempo de espera en cada disparo es de 3 segundos (valor modificable en el propio programa). Esto lo realiza para cada proyecto de vuelo en este caso dos proyectos de vuelo el cenital y el inclinado.





**Tabla 9 – Tabla Con algunas de las fotografías obtenidas desde el UAV**

Al revisar las fotografías en campo se observa que la puerta principal del castillo no se ve bien desde las fotografías obtenidas con el Falcon y se procede a tomar 8 fotografías adicionales del pórtico de entrada a la fortaleza desde el suelo con una cámara digital Canon PowerShot G10.



**Tabla 10 – Tabla Con algunas de las fotografías obtenidas desde el suelo**



### 4.3.3 Trabajo de Gabinete.

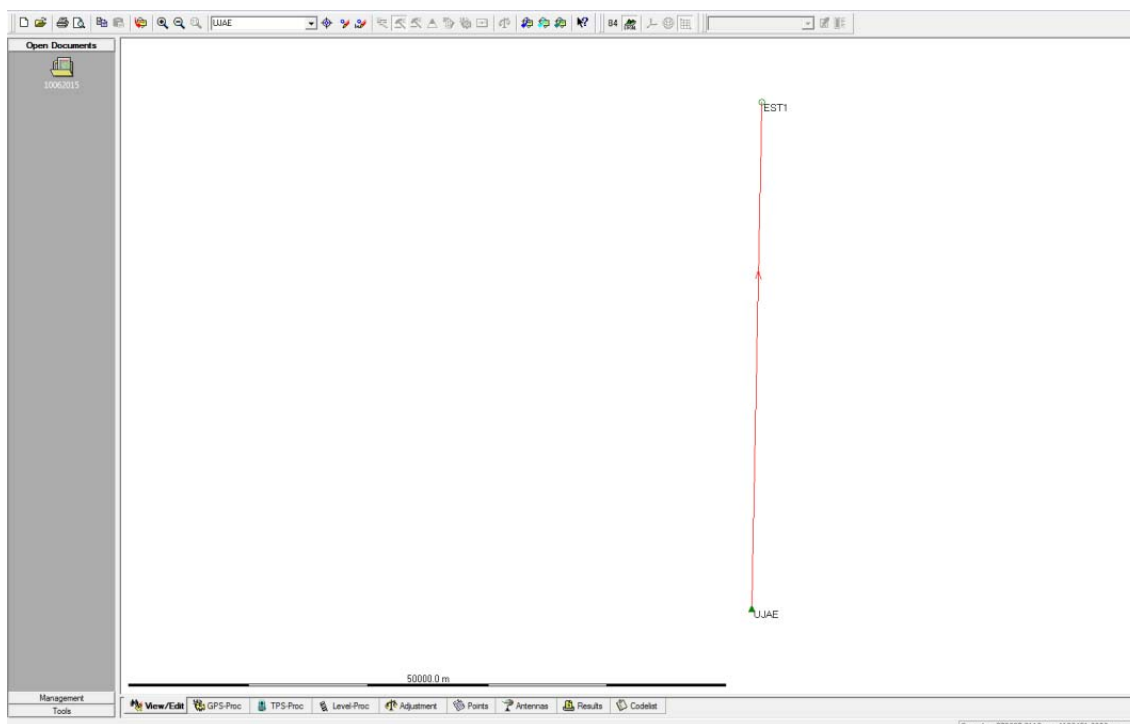
En este punto se realizan los productos que el trabajo requiere.

#### 4.3.3.1 Puntos de Apoyo.

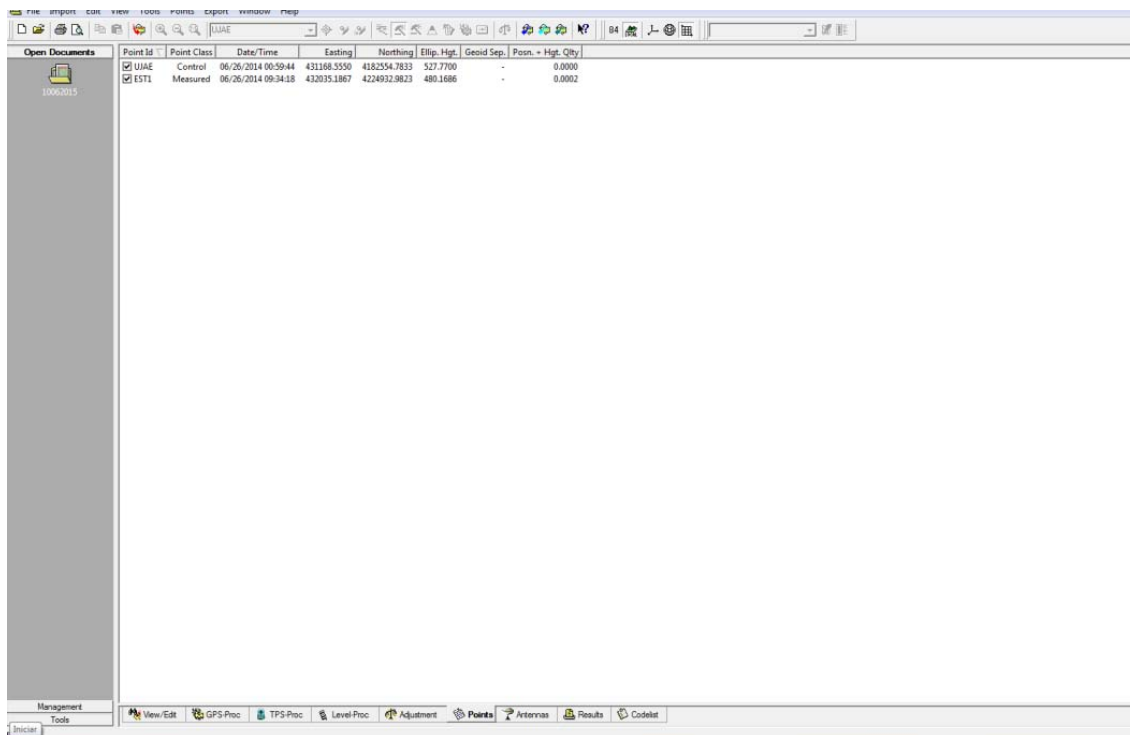
En primer lugar hay que calcular las coordenadas de la base que hemos puesto en la zona de estudio para ello se procede al cálculo de las coordenadas XYZ en ETRS89 por el método de post-proceso.

Se utiliza el software Leica Geo Office y para ello se descargan de la web de la RAP (Red andaluza de posicionamiento - <http://www.ideandalucia.es/portal/web/portal-posicionamiento/rap/descarga-rinex>) los Rinex de la estación de la universidad de Jaén (**Figura 16 – Línea Base procesada**).

Junto con los Rinex y las observaciones del equipo base se calcula las coordenadas de la base (**Figura 17 – Coordenadas de la base**).



**Figura 16 – Línea Base procesada desde la universidad de Jaén hasta la Estación 1**



The screenshot shows the Leica Geo Office software interface. On the left is a sidebar with 'Open Documents' and a file icon. The main window displays a table with the following data:

| Point Id | Point Class | Date/Time           | Easting     | Northing     | Ellip. Hgt. | Geoid Sep. | Posn. - Hgt. Qty |
|----------|-------------|---------------------|-------------|--------------|-------------|------------|------------------|
| UJAE     | Control     | 06/26/2014 00:59:44 | 431168.5550 | 4182554.7833 | 527.7700    | -          | 0.0000           |
| EST1     | Measured    | 06/26/2014 09:34:18 | 432035.1867 | 4224932.9823 | 480.1686    | -          | 0.0002           |

At the bottom, there is a 'Management' tab and a toolbar with icons for View/Edit, GPS Proc, TPS Proc, Level Proc, Adjustment, Points, Antennas, Results, and CodeList.

Figura 17 – Coordenadas que el Leica Geo office calcula al procesar la línea base

| ID_PUNTO | COORD X     | COORD Y      | COORD Z  | PRECISIÓN |
|----------|-------------|--------------|----------|-----------|
| UJAEN    | 431168,5550 | 4182554,7833 | 527,7700 | 0,0000    |
| EST1     | 432035,1867 | 4224932,9823 | 480,1686 | 0,0002    |

Tabla 11 – Tabla con las coordenadas del post-proceso

En segundo lugar se procede a introducir las observaciones RTK en el software Leica Ge Office manteniendo las coordenadas calculadas con Post Proceso como coordenadas de control (**Figura 18 – Líneas Base RTK**).

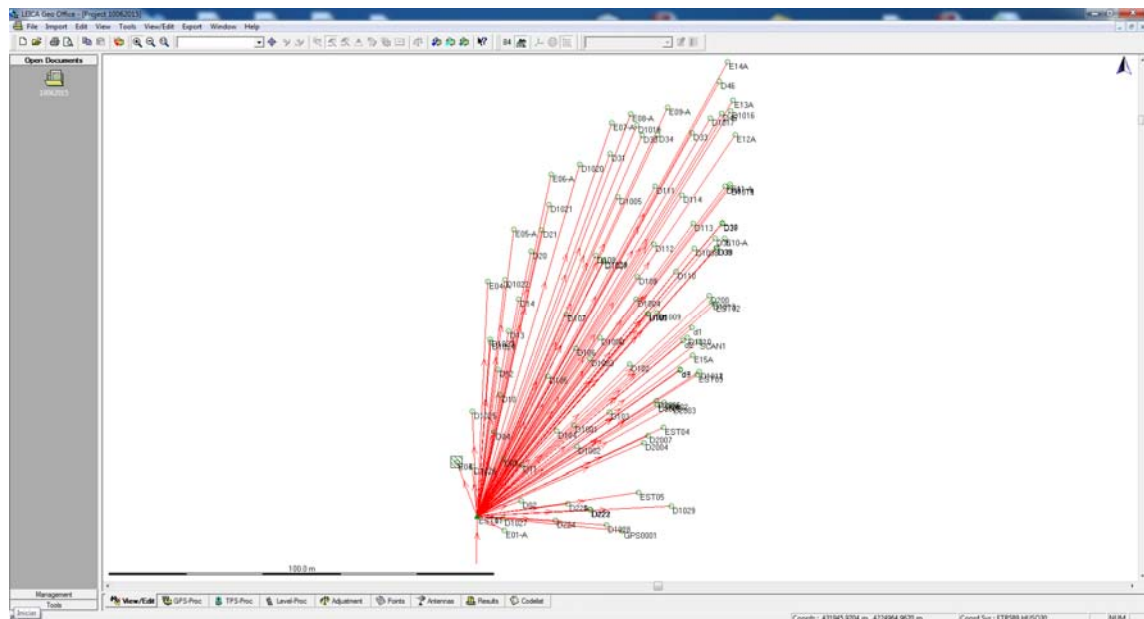


Figura 18 – Líneas base de las observaciones RTK en el Leica Geo Office

| ID   | COORD X     | COORD Y      | COORD Z  | CODIGO        |
|------|-------------|--------------|----------|---------------|
| D46  | 432099,1835 | 4225045,5270 | 480,1078 | diana escáner |
| D45  | 432099,6956 | 4225037,1829 | 481,2468 | diana escáner |
| D40  | 432100,6591 | 4225018,2966 | 481,8888 | diana escáner |
| D39  | 432098,3366 | 4225002,2743 | 482,6637 | diana escáner |
| D38  | 432098,4435 | 4225002,2588 | 482,8515 | diana escáner |
| D37  | 432099,9196 | 4225008,6392 | 482,2563 | diana escáner |
| D36  | 432099,8816 | 4225008,6510 | 482,3027 | diana escáner |
| D35  | 432098,0625 | 4225004,6670 | 483,7430 | diana escáner |
| D34  | 432083,1755 | 4225031,7118 | 483,5638 | diana escáner |
| D33  | 432092,0950 | 4225032,2026 | 483,7665 | diana escáner |
| D31  | 432070,7344 | 4225026,6875 | 482,3601 | diana escáner |
| D30  | 432079,0509 | 4225031,4981 | 483,0017 | diana escáner |
| D21  | 432053,0525 | 4225006,8195 | 481,4111 | diana escáner |
| D20  | 432050,3331 | 4225001,3491 | 481,7122 | diana escáner |
| D14  | 432047,0058 | 4224988,8779 | 483,4127 | diana escáner |
| D13  | 432044,4392 | 4224980,4185 | 483,6293 | diana escáner |
| D12  | 432041,6245 | 4224970,3969 | 484,3025 | diana escáner |
| D11  | 432047,8334 | 4224945,5126 | 485,4902 | diana escáner |
| D10  | 432042,2569 | 4224963,7825 | 485,1123 | diana escáner |
| D05  | 432042,8464 | 4224947,0188 | 484,4814 | diana escáner |
| D04  | 432040,6967 | 4224954,0437 | 484,4491 | diana escáner |
| D02  | 432047,6908 | 4224936,3578 | 482,7292 | diana escáner |
| d1   | 432090,8360 | 4224981,9160 | 485,5810 | diana escáner |
| D224 | 432055,5130 | 4224931,8470 | 481,3600 | diana escáner |
| D223 | 432064,4690 | 4224934,6970 | 481,6910 | diana escáner |

| ID    | COORD X     | COORD Y      | COORD Z  | CODIGO        |
|-------|-------------|--------------|----------|---------------|
| d4    | 432087,7690 | 4224971,0550 | 484,5700 | diana escáner |
| d3    | 432087,7740 | 4224970,8760 | 484,5410 | diana escáner |
| D222  | 432064,4810 | 4224934,7070 | 481,6920 | diana escáner |
| D220  | 432058,6260 | 4224936,1800 | 482,7330 | diana escáner |
| d2    | 432088,5420 | 4224978,6420 | 485,5110 | diana escáner |
| D112  | 432080,9840 | 4225003,8510 | 491,2520 | diana UAV     |
| D113  | 432091,2040 | 4225009,2770 | 492,3950 | diana UAV     |
| D106  | 432060,7650 | 4224976,5850 | 489,3780 | diana UAV     |
| D109  | 432076,6790 | 4224995,3430 | 487,6530 | diana UAV     |
| D111  | 432081,3640 | 4225018,9940 | 488,0390 | diana UAV     |
| D1004 | 432076,3880 | 4224989,5470 | 487,8940 | diana UAV     |
| D1029 | 432085,5230 | 4224935,5440 | 480,7560 | diana UAV     |
| D108  | 432065,8750 | 4225000,9310 | 486,8710 | diana UAV     |
| D1003 | 432064,4780 | 4224973,8420 | 489,4160 | diana UAV     |
| D1027 | 432041,8970 | 4224932,3960 | 480,4930 | diana UAV     |
| D105  | 432053,4900 | 4224969,3910 | 489,6560 | diana UAV     |
| D1007 | 432067,9760 | 4224999,4110 | 486,8800 | diana UAV     |
| D1001 | 432060,2560 | 4224956,4760 | 489,6140 | diana UAV     |
| D1018 | 432076,6300 | 4225034,7990 | 480,9310 | diana UAV     |
| D1000 | 432067,0060 | 4224979,3830 | 489,0360 | diana UAV     |
| D103  | 432069,4470 | 4224959,9500 | 489,0820 | diana UAV     |
| D1025 | 432033,9210 | 4224960,0690 | 481,1200 | diana UAV     |
| D107  | 432058,1860 | 4224985,5100 | 487,9270 | diana UAV     |
| D1026 | 432033,9250 | 4224945,6940 | 481,0420 | diana UAV     |
| D100  | 432079,3180 | 4224985,5970 | 487,3940 | diana UAV     |
| D1028 | 432068,6460 | 4224930,5920 | 480,8370 | diana UAV     |
| D1019 | 432076,6310 | 4225034,7940 | 480,9320 | diana UAV     |
| D101  | 432079,4550 | 4224985,6080 | 487,3810 | diana UAV     |
| D1011 | 432092,8180 | 4224970,4590 | 484,6510 | diana UAV     |
| D1024 | 432038,6790 | 4224978,0750 | 480,8200 | diana UAV     |
| D104  | 432055,6990 | 4224954,9520 | 488,4820 | diana UAV     |
| D1016 | 432100,9420 | 4225038,4740 | 482,4190 | diana UAV     |
| D1023 | 432038,5150 | 4224978,8900 | 481,2580 | diana UAV     |
| D102  | 432074,6980 | 4224972,3690 | 487,8730 | diana UAV     |
| D1002 | 432061,0510 | 4224950,9380 | 488,6720 | diana UAV     |
| D1017 | 432095,6800 | 4225036,7110 | 482,4510 | diana UAV     |
| D110  | 432086,7510 | 4224996,7990 | 486,9820 | diana UAV     |
| D1012 | 432092,8280 | 4224970,4530 | 484,6550 | diana UAV     |
| D1021 | 432053,7820 | 4225014,1890 | 479,6370 | diana UAV     |
| D114  | 432088,2110 | 4225016,6900 | 486,4020 | diana UAV     |
| D1022 | 432042,3860 | 4224994,5630 | 479,7130 | diana UAV     |
| D1015 | 432100,7360 | 4225018,6310 | 482,6870 | diana UAV     |
| D1014 | 432100,7340 | 4225018,6260 | 482,6850 | diana UAV     |

| ID    | COORD X     | COORD Y      | COORD Z  | CODIGO      |
|-------|-------------|--------------|----------|-------------|
| D1020 | 432061,7510 | 4225024,5980 | 479,9230 | diana UAV   |
| D221  | 432058,6380 | 4224936,1850 | 482,7700 | diana UAV   |
| D1008 | 432091,5480 | 4225002,7030 | 486,6260 | diana UAV   |
| D1009 | 432081,7670 | 4224986,0330 | 487,5150 | diana UAV   |
| E15A  | 432092,2472 | 4224974,1219 | 487,3546 | est escáner |
| E14A  | 432101,2217 | 4225050,5872 | 481,3735 | est escáner |
| E13A  | 432102,6282 | 4225040,5994 | 482,5948 | est escáner |
| E12A  | 432103,2542 | 4225031,6383 | 483,2440 | est escáner |
| E11-A | 432101,9678 | 4225018,7899 | 483,6214 | est escáner |
| E11   | 432101,9734 | 4225018,7859 | 483,6031 | est escáner |
| E10-A | 432100,4409 | 4225004,7055 | 484,4295 | est escáner |
| E09-A | 432085,7537 | 4225038,7982 | 484,1536 | est escáner |
| E08-A | 432076,1305 | 4225037,0770 | 483,1644 | est escáner |
| E07-A | 432071,1773 | 4225034,7891 | 482,9503 | est escáner |
| E06-A | 432055,5823 | 4225021,3100 | 481,9294 | est escáner |
| E05-A | 432045,8144 | 4225007,0134 | 481,7502 | est escáner |
| E04-A | 432039,0378 | 4224993,4128 | 482,0201 | est escáner |
| E04   | 432031,0600 | 4224946,2030 | 483,2388 | est escáner |
| E03   | 432031,0604 | 4224946,2054 | 483,2344 | est escáner |
| E01-A | 432043,3653 | 4224928,5944 | 482,7441 | est escáner |
| E01   | 432043,3651 | 4224928,5955 | 482,7372 | est escáner |
| SCAN1 | 432092,6570 | 4224978,2600 | 487,3500 | est escáner |
| EST03 | 432092,3450 | 4224969,5950 | 486,3320 | est escáner |
| EST06 | 432061,9700 | 4224927,1520 | 482,5770 | est escáner |
| EST05 | 432076,9970 | 4224939,0470 | 482,9100 | est escáner |
| EST04 | 432083,5390 | 4224955,8450 | 484,3640 | est escáner |

**Tabla 12 – Tabla con las coordenadas del procesamiento RTK**

El sistema de coordenadas en ETRS89 tiene un factor de escala (k) en esa zona de 0,99965682 obtenidas de una calculadora geodésica llamada PAG.

#### 4.3.3.2 Tratamiento de los datos del laser escáner 3D.

Se descargan los datos del escáner laser 3D y mediante el software Cyclone se realiza una transformación de ficheros compatibles con el software I-site.

Una vez obtenidos los ficheros compatibles para I-site se procede a la búsqueda de las dianas (puntos de apoyo observados con GPS) en los escaneos creando un punto en el centro de las dianas con coordenadas relativas. Se crea un punto de estación ya que se tiene sus coordenadas medidas con GPS y se puede utilizar como punto de apoyo.

Seguidamente se procede a la orientación de las nubes de puntos mediante I-site (Figura 19 – Escaneos desorientados, Figura 20 – Herramientas para la orientación de los escaneos).

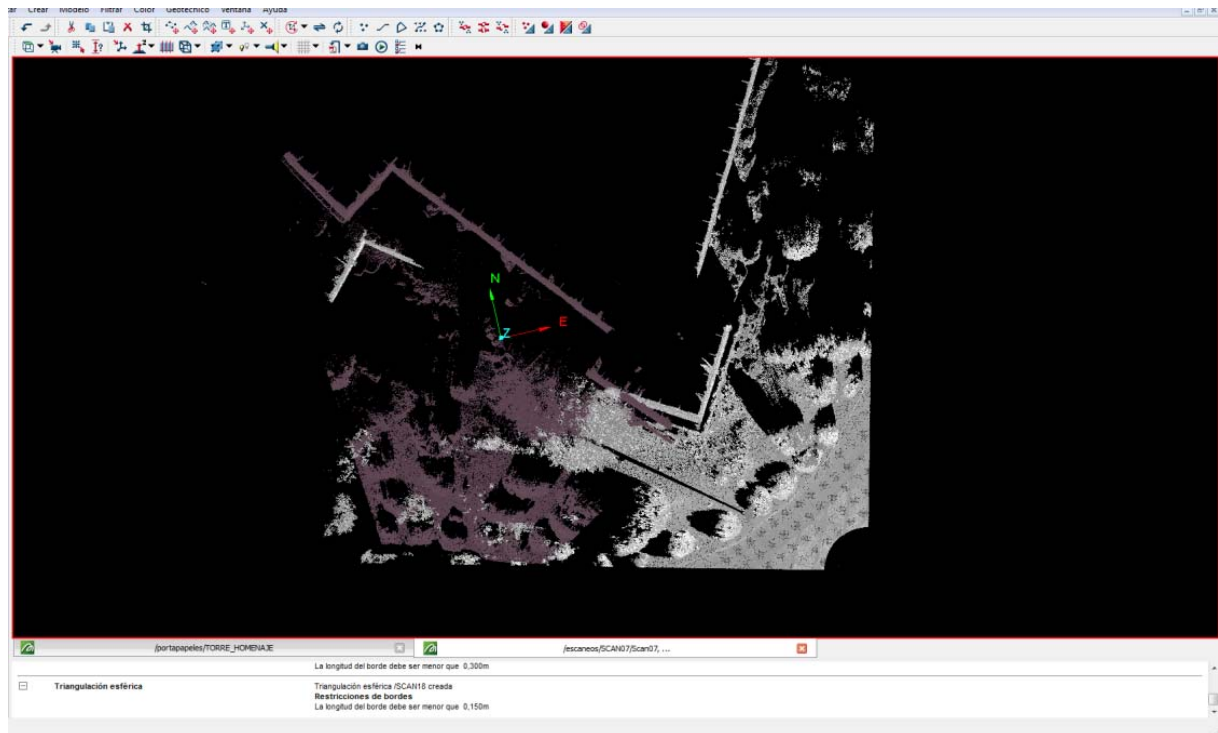
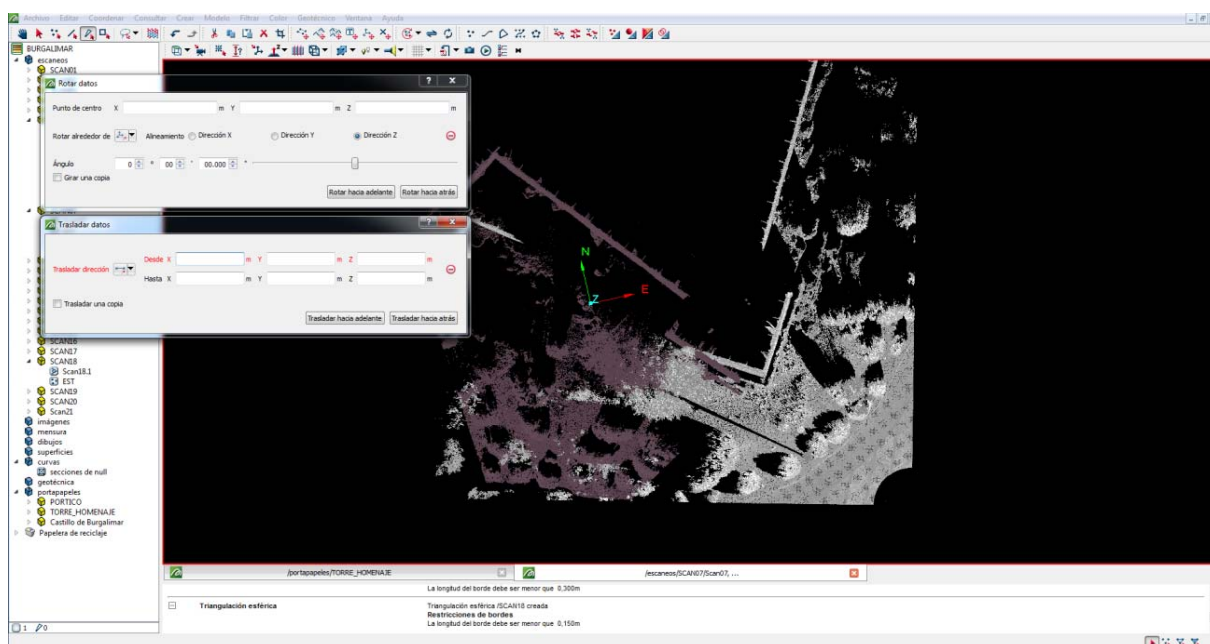


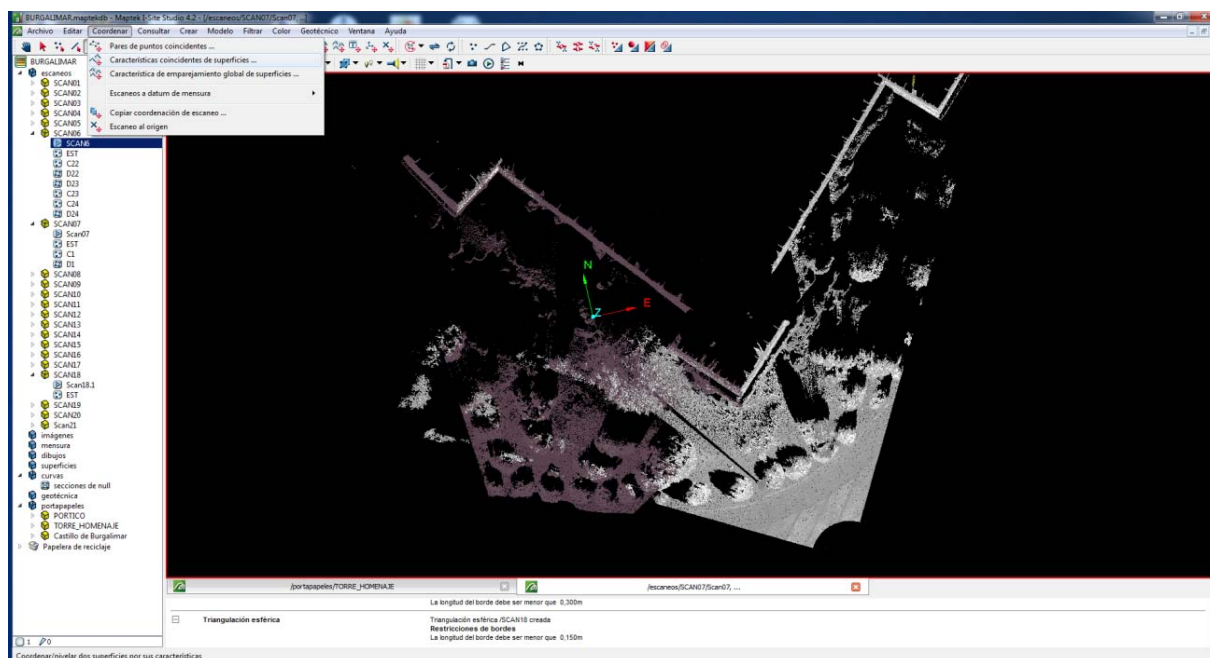
Figura 19 – Escaneos desorientados





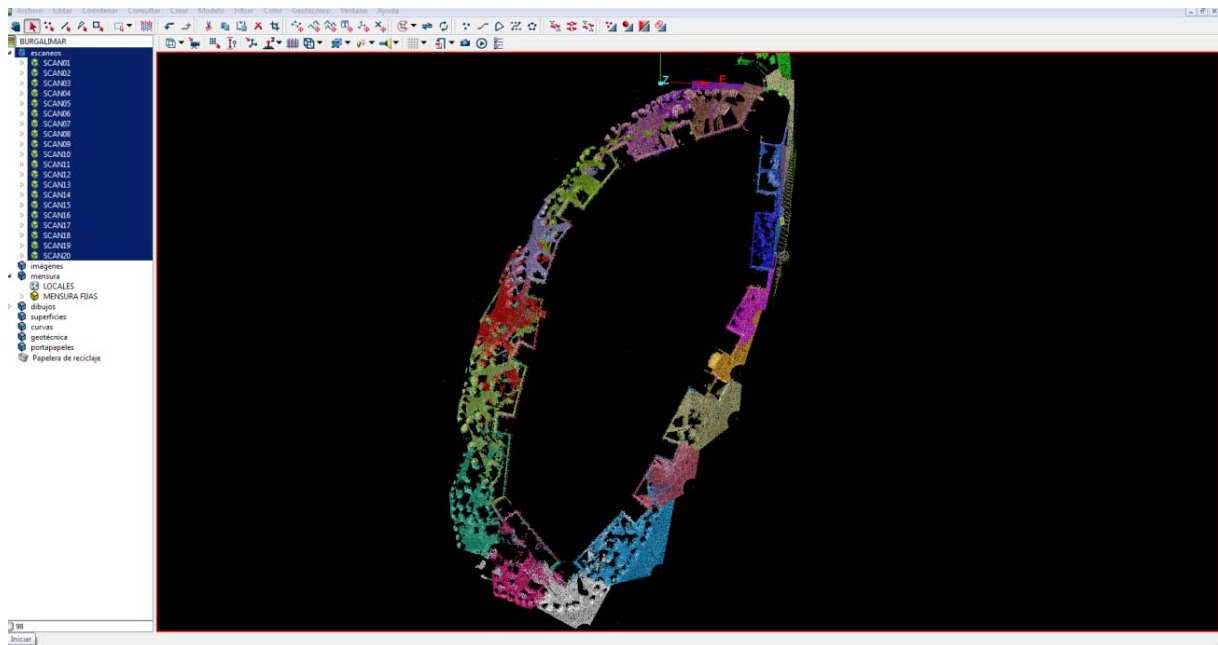
**Captura 20 – Escaneos desorientados con herramientas de orientación**

Una vez orientados los escaneos se procede a fusionar los escaneos cuando se fusiona los escaneos se obtiene un RMS se realizara iteraciones hasta que este RMS sea inferior a 3 mm (Figura 21 – Escaneos orientados y listos para fusionar).



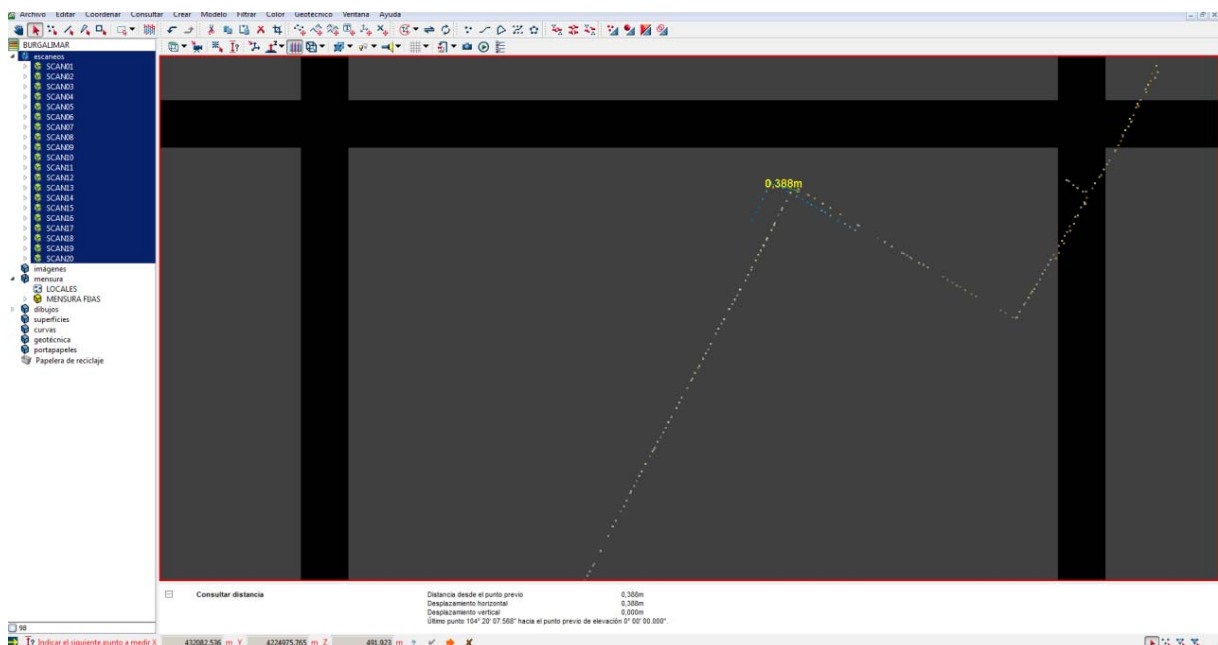
**Figura 21 – Escaneos orientados listos para fusionar**

Estos pasos se realizan para todos los escaneos obtenidos en la fase de campo (**Figura 22 – Escaneos orientados y Fusionados**).



**Figura 22 – Escaneos orientados y Fusionados**

Al revisar los escaneos se observa que en la unión de los escaneos se tiene un error de cierre de 40 cm (**Figura 23 – Error de cierre en la zona de escaneos**).



**Figura 23 – Error de cierre en la zona de escaneos.**



[illegible]

Escuela Politécnica Superior de Jaén

### 4.3.3.3 Tratamiento de los datos fotogramétricos.

Las fotografías obtenidas se introducen en el software PhotoScan así como los puntos de control modificados del factor de escala que el sistema de coordenadas tiene en la zona.

En primer lugar se orientan todas las fotografías entre sí por medio de matching automático en un sistema de coordenadas arbitrario.

Cada grupo de fotografías se orientan entre sí es decir: las fotografías cenitales entre sí, las fotografías inclinadas entre sí y las fotografías del pórtico entre sí.

Seguidamente se procede a medir los puntos de control en las fotografías para georreferenciar dichas fotografías (**Figura 26 – Puntos de apoyo posados en las fotografías del trabajo**).

Para el pórtico se utilizan puntos de control obtenidos de la orientación de las otras fotografías (**Figura 27 – Puntos de apoyo medidos en las fotografías del trabajo**).

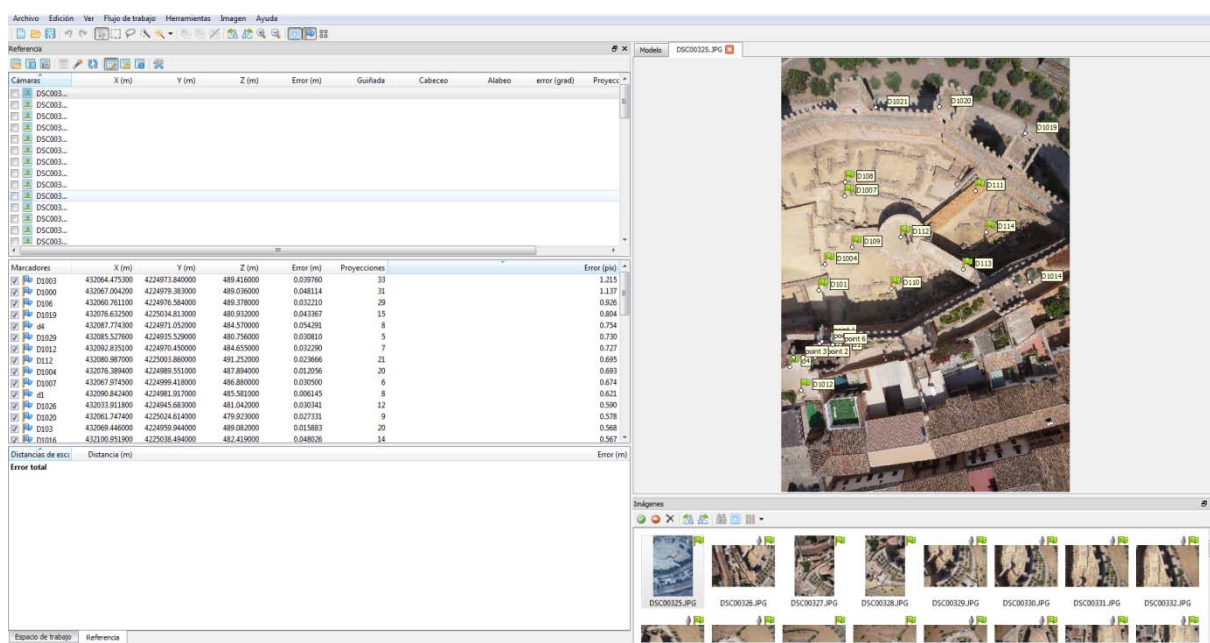


Figura 26 – Puntos de apoyo medidos en fotografía del trabajo.



**Figura 28 – Flujo de trabajo de PhotoScan.**

## 5. RESULTADOS, PRODUCTO OBTENIDO Y CONCLUSIONES.

### 5.1 Resultados.

En primer lugar se debe de hacer un estudio de errores obtenidos en los puntos de apoyo partiendo de la precisión ( $\sigma$ ) con la cual el software Leica Ge Office calcula las coordenadas de los puntos de apoyo (**Tabla 13 – precisión de las coordenadas de los puntos de apoyo**)

| ID   | $\sigma$ (m) | ID    | $\sigma$ (m) | ID    | $\sigma$ (m) |
|------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|
| D46  | 0,012        | D111  | 0,036        | D1020 | 0,012        |
| D45  | 0,017        | D1004 | 0,037        | D221  | 0,012        |
| D40  | 0,033        | D1029 | 0,040        | D1008 | 0,012        |
| D39  | 0,037        | D108  | 0,045        | D1009 | 0,032        |
| D38  | 0,029        | D1003 | 0,046        | E15A  | 0,032        |
| D37  | 0,045        | D1027 | 0,050        | E14A  | 0,009        |
| D36  | 0,040        | D105  | 0,026        | E13A  | 0,012        |
| D35  | 0,035        | D1007 | 0,029        | E12A  | 0,021        |
| D34  | 0,026        | D1001 | 0,029        | E11-A | 0,022        |
| D33  | 0,037        | D1018 | 0,032        | E11   | 0,034        |
| D31  | 0,022        | D1000 | 0,032        | E10-A | 0,018        |
| D30  | 0,017        | D103  | 0,033        | E09-A | 0,013        |
| D21  | 0,050        | D1025 | 0,013        | E08-A | 0,015        |
| D20  | 0,032        | D107  | 0,014        | E07-A | 0,019        |
| D14  | 0,033        | D1026 | 0,015        | E06-A | 0,012        |
| D13  | 0,024        | D100  | 0,015        | E05-A | 0,021        |
| D12  | 0,020        | D1028 | 0,017        | E04-A | 0,014        |
| D11  | 0,026        | D1019 | 0,017        | E04   | 0,010        |
| D10  | 0,046        | D101  | 0,018        | E03   | 0,010        |
| D05  | 0,023        | D1011 | 0,019        | E01-A | 0,020        |
| D04  | 0,019        | D1024 | 0,019        | E01   | 0,012        |
| D02  | 0,015        | D104  | 0,020        | SCAN1 | 0,020        |
| d1   | 0,009        | D1016 | 0,020        | EST03 | 0,021        |
| D224 | 0,010        | D1023 | 0,021        | EST06 | 0,021        |
| D223 | 0,010        | D102  | 0,021        | EST05 | 0,022        |
| d4   | 0,012        | D1002 | 0,022        | EST04 | 0,022        |
| d3   | 0,012        | D1017 | 0,022        |       |              |
| D222 | 0,012        | D110  | 0,023        |       |              |
| D220 | 0,012        | D1012 | 0,024        |       |              |
| d2   | 0,013        | D1021 | 0,009        |       |              |
| D112 | 0,014        | D114  | 0,010        |       |              |
| D113 | 0,033        | D1022 | 0,010        |       |              |
| D106 | 0,034        | D1015 | 0,012        |       |              |
| D109 | 0,035        | D1014 | 0,012        |       |              |

Tabla 13 – Precisión con la que se obtienen los puntos de apoyo

Se obtiene un promedio de 0.022 m en la precisión de los puntos. Se calcula una tolerancia con la cual daremos como bueno o malo los productos que se obtendrán utilizando la formula de  $T = 3\sigma = 3 * 0.022 = 0.067$ .

A partir de ahora trataremos cada técnica geomática por separado para el estudio de errores.

### 5.1.1 Laser escáner 3D.

En primer lugar hay que obtener una tolerancia para la fusión de los escaneos para ello se utilizara las siguiente información obtenida de las características técnicas del instrumento utilizado.

| Distancia (m) | $\sigma$ (m) | T (m) |
|---------------|--------------|-------|
| 0.10          | 0.000        | 0.000 |
| 35            | 0.004        | 0.012 |
| 100           | 0.012        | 0.036 |

**Tabla 14 – Precisión del Laser escáner 3D**

Al observar la **Tabla 14 – Precisión del laser escáner 3D** obtenemos una tolerancia de 0.012 m para la fusión entre escaneos.

Los resultados obtenidos en cada fusión de escaneos es inferior a 0.01 m por lo tanto se puede decir que la fusión de escaneos esta en tolerancia (**Tabla 15 – RMS de fusión de escaneos con I-Site**).

| Nº de Escaneo (fijo) | Nº de Escaneo (mueve) | ERMS (m) | Nº de Escaneo (fijo) | Nº de Escaneo (mueve) | ERMS (m) |
|----------------------|-----------------------|----------|----------------------|-----------------------|----------|
| 1                    | 2                     | 0.003    | 14                   | 15                    | 0.008    |
| 1                    | 3                     | 0.001    | 15                   | 16                    | 0.007    |
| 3                    | 4                     | 0.008    | 16                   | 17                    | 0.009    |
| 4                    | 5                     | 0.009    | 17                   | 18                    | 0.006    |
| 5                    | 6                     | 0.010    | 18                   | 19                    | 0.008    |
| 6                    | 7                     | 0.008    | 19                   | 20                    | 0.008    |
| 7                    | 8                     | 0.004    | 20                   | 1                     | 0.005    |
| 8                    | 9                     | 0.007    |                      |                       |          |
| 9                    | 10                    | 0.003    |                      |                       |          |
| 10                   | 11                    | 0.005    |                      |                       |          |
| 11                   | 12                    | 0.008    |                      |                       |          |
| 12                   | 13                    | 0.005    |                      |                       |          |
| 13                   | 14                    | 0.003    |                      |                       |          |

**Tabla 15 – RMS de fusión entre escaneos con I-Site**

Ahora se estudia la tabla con los errores que el software ha detectado al georreferenciar los escaneos. Para ello utiliza los puntos de apoyo y la tolerancia a tener en cuenta es la calculada para los puntos de apoyo  $T = 0.067$  m.

| ID    | Separación Inicial Promedio (m) | Separación final (m) |
|-------|---------------------------------|----------------------|
| D46   | 4247022,907                     | 0,012                |
| D45   | 4247022,907                     | 0,044                |
| D40   | 4247022,907                     | 0,002                |
| D39   |                                 |                      |
| D38   | 4247022,907                     | 0,001                |
| D37   | 4247022,907                     | 0,003                |
| D36   | 4247022,907                     | 0,002                |
| D35   | 4247022,907                     | 0,007                |
| D34   | 4247022,907                     | 0,032                |
| D33   |                                 |                      |
| D31   | 4247022,907                     | 0,004                |
| D30   | 4247022,907                     | 0,001                |
| D21   | 4247022,907                     | 0,001                |
| D20   | 4247022,907                     | 0,002                |
| D14   | 4247022,907                     | 0,001                |
| D13   | 4247022,907                     | 0,000                |
| D12   | 4247022,907                     | 0,000                |
| D11   |                                 |                      |
| D10   |                                 |                      |
| D05   | 4247022,907                     | 0,003                |
| D04   | 4247022,907                     | 0,003                |
| D02   |                                 |                      |
| d1    | 4247022,907                     | 0,001                |
| D224  | 4247022,907                     | 0,002                |
| D223  |                                 |                      |
| d4    | 4247022,907                     | 0,01                 |
| d3    | 4247022,907                     | 0,009                |
| D222  |                                 |                      |
| D220  | 4247022,907                     | 0,008                |
| d2    |                                 |                      |
| E15A  | 4247022,907                     | 0,002                |
| E14A  | 4247022,907                     | 0,003                |
| E13A  | 4247022,907                     | 0,001                |
| E12A  | 4247022,907                     | 0,002                |
| E11-A |                                 |                      |
| E11   | 4247022,907                     | 0,001                |
| E10-A | 4247022,907                     | 0,006                |
| E09-A |                                 |                      |
| E08-A | 4247022,907                     | 0,001                |

| <b>ID</b>    | <b>Separación Inicial Promedio (m)</b> | <b>Separación final (m)</b> |
|--------------|----------------------------------------|-----------------------------|
| <b>E07-A</b> | 4247022,907                            | 0,002                       |
| <b>E06-A</b> |                                        |                             |
| <b>E05-A</b> | 4247022,907                            | 0                           |
| <b>E04-A</b> |                                        |                             |
| <b>E04</b>   | 4247022,907                            | 0,002                       |
| <b>E03</b>   | 4247022,907                            | 0,003                       |
| <b>E01-A</b> |                                        |                             |
| <b>E01</b>   | 4247022,907                            | 0,015                       |
| <b>SCAN1</b> | 4247022,907                            | 0,003                       |
| <b>EST03</b> |                                        |                             |
| <b>EST06</b> | 4247022,907                            | 0,002                       |
| <b>EST05</b> |                                        |                             |
| <b>RMS</b>   | 4247022,907                            | 0,005                       |

**Tabla 16 – RMS de georreferenciación de los escaneos coordinados**

En la tabla 16 se observa que ningún punto de apoyo que el software I-Site ha reconocido para la georreferenciación de los escaneos tiene un error superior a la tolerancia. Por lo tanto se puede decir que los escaneos están bien georreferenciados y listos para obtener los productos deseados.



### 5.1.2. Fotogrametría.

Como no se han utilizado cámaras métricas en primer lugar hay que hablar de la calibración de las cámaras utilizadas en la tabla 17 aparecerán los parámetros de calibración que el software PhotoScan ha calculado para las cámaras utilizadas.

| Cámara    | NEX 5N (cenital) | NEX 5N (inclinada) | Cannon G10   |
|-----------|------------------|--------------------|--------------|
| Parámetro |                  |                    |              |
| Fx        | 3346.83 px       | 3341.96 px         | 3707.85 px   |
| Fy        | 3346.83 px       | 3341.96 px         | 3707.85 px   |
| Cx        | 2447.37 px       | 2447.16 px         | 2232.07 px   |
| Cy        | 1606.28 px       | 1617.68 px         | 1615.58 px   |
| K1        | -7.48824e-005 m  | 0.00345842 m       | -0.158653 m  |
| K2        | -0.00829894 m    | -0.0241598 m       | 0.156664 m   |
| K3        | 0.00668843 m     | 0.0228967 m        | -0.0473115 m |
| f         | 16 mm            | 16 mm              | 6.1 mm       |

Tabla 17 – Parámetros de calibración de las cámaras fotográficas

A continuación se comprobará la precisión con la que los puntos de control se han apoyado en las fotografías en el software PhotoScan (Tabla 18 – Errores cometidos al apoyo de los puntos de control con PhotoScan) teniendo en cuenta la tolerancia calculada anteriormente  $T = 0.067$  m.



Figura 29 – Situación de los puntos de control utilizados en PhotoScan.

| Label        | X error (m)   | Y error (m)   | Z error (m)   | error (m)     | Nº de fotografías | Error (px)  |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------------|
| D101         | -0,0128       | -0,0099       | 0,0001        | 0,0162        | 18                | 0,56        |
| D102         | 0,0068        | 0,0035        | -0,0187       | 0,0202        | 21                | 0,51        |
| D103         | -0,0137       | 0,0020        | 0,0078        | 0,0159        | 20                | 0,57        |
| D104         | -0,0108       | 0,0129        | -0,0089       | 0,0191        | 13                | 0,39        |
| D105         | -0,0078       | 0,0079        | -0,0175       | 0,0207        | 21                | 0,50        |
| D106         | 0,0206        | 0,0190        | -0,0158       | 0,0322        | 29                | 0,93        |
| D107         | -0,0091       | 0,0087        | 0,0004        | 0,0126        | 22                | 0,51        |
| D108         | 0,0002        | -0,0014       | -0,0017       | 0,0022        | 26                | 0,50        |
| D109         | 0,0024        | -0,0074       | 0,0016        | 0,0079        | 28                | 0,41        |
| D110         | 0,0363        | -0,0072       | -0,0886       | 0,0960        | 6                 | 0,29        |
| D111         | -0,0007       | 0,0107        | -0,0105       | 0,0150        | 16                | 0,54        |
| D112         | 0,0058        | 0,0220        | 0,0065        | 0,0237        | 21                | 0,70        |
| D113         | 0,0093        | 0,0087        | -0,0117       | 0,0173        | 17                | 0,48        |
| D114         | -0,0133       | -0,0017       | 0,0367        | 0,0391        | 10                | 0,41        |
| D1000        | -0,0478       | -0,0047       | 0,0025        | 0,0481        | 31                | 1,14        |
| D1001        | -0,0071       | -0,0008       | 0,0019        | 0,0074        | 6                 | 0,30        |
| D1002        | 0,0173        | -0,0499       | -0,0182       | 0,0559        | 7                 | 0,43        |
| D1003        | -0,0184       | 0,0293        | 0,0196        | 0,0398        | 33                | 1,22        |
| D1004        | 0,0052        | -0,0093       | 0,0056        | 0,0121        | 20                | 0,69        |
| D1007        | -0,0053       | -0,0076       | 0,0291        | 0,0305        | 6                 | 0,67        |
| D1012        | 0,0041        | -0,0071       | 0,0312        | 0,03233       | 7                 | 0,73        |
| D1014        | -0,0608       | 0,0704        | -0,0290       | 0,0975        | 1                 | 0,00        |
| D1016        | -0,0128       | 0,0002        | -0,0463       | 0,0480        | 14                | 0,57        |
| D1017        | 0,0111        | 0,0031        | -0,0077       | 0,0139        | 12                | 0,25        |
| D1019        | -0,0105       | -0,0102       | 0,0408        | 0,0434        | 15                | 0,80        |
| D1020        | 0,0229        | -0,0149       | 0,0015        | 0,0273        | 9                 | 0,58        |
| D1021        | 0,0008        | 0,0117        | 0,0108        | 0,0159        | 5                 | 0,20        |
| D1022        | -0,0098       | 0,0249        | 0,0348        | 0,0440        | 6                 | 0,30        |
| D1023        | -0,0144       | 0,0017        | -0,0448       | 0,0472        | 3                 | 0,33        |
| D1025        | 0,0092        | -0,0089       | 0,0130        | 0,0183        | 15                | 0,52        |
| D1026        | 0,0235        | -0,0110       | -0,0157       | 0,0303        | 12                | 0,59        |
| D1027        | 0,0174        | 0,0123        | -0,0118       | 0,0244        | 5                 | 0,34        |
| D1028        | 0,0304        | 0,0110        | 0,0069        | 0,0330        | 10                | 0,46        |
| D1029        | -0,0243       | -0,0179       | 0,0063        | 0,0308        | 5                 | 0,73        |
| d1           | -0,0057       | 0,0006        | -0,0022       | 0,0061        | 8                 | 0,62        |
| d2           | -0,0033       | -0,0121       | -0,0125       | 0,0177        | 4                 | 0,42        |
| d4           | 0,0020        | -0,0172       | 0,0514        | 0,0543        | 8                 | 0,75        |
| <b>total</b> | <b>0,0178</b> | <b>0,0173</b> | <b>0,0242</b> | <b>0,0347</b> | <b>533</b>        | <b>0,67</b> |

Tabla 18 – Tabla de errores obtenidos de PhotoScan

En la tabla 18 se observa que aunque hay un punto de control que esta fuera de tolerancia el promedio de los puntos está por debajo de la tolerancia. Por lo tanto se puede decir que los productos obtenidos con esta técnica tienen buena calidad y son fiables.

## **5.2 Producto Obtenido.**

Los productos que se entregan en este trabajo tienen los siguientes formatos:

- Txt: Este formato es idóneo ya que la mayoría de los softwares de entorno de CAD, así como los software específicos para los laser escáner 3d pueden interpretar este formato.
- Tiff: Es un formato convencional de imagen georreferenciada empleado en ortoimágenes.
- Pdf: este formato es universal y con las nuevas versiones es capaz de reproducir modelos 3D, que en este trabajo es algo importante.
- Obj: es un formato reciente y guarda superficies (mallas) es ideal para este trabajo con vistas a la virtualización del castillo o si se decide imprimir alguna maqueta con las nuevas técnicas de impresión 3D.

### 5.2.1 Laser escáner 3d (I-Side).

Con laser escáner 3d se han obtenido los siguientes productos:

- Nube de puntos con un filtrado de 5mm de separación entre puntos el cual se podrá encontrar en formato txt en la carpeta de productos del proyecto este fichero se llama: **escaneos filtrados 5cm.txt (Figura 30 – Nube de puntos filtrada a 5 mm vista desde I-Side)**.

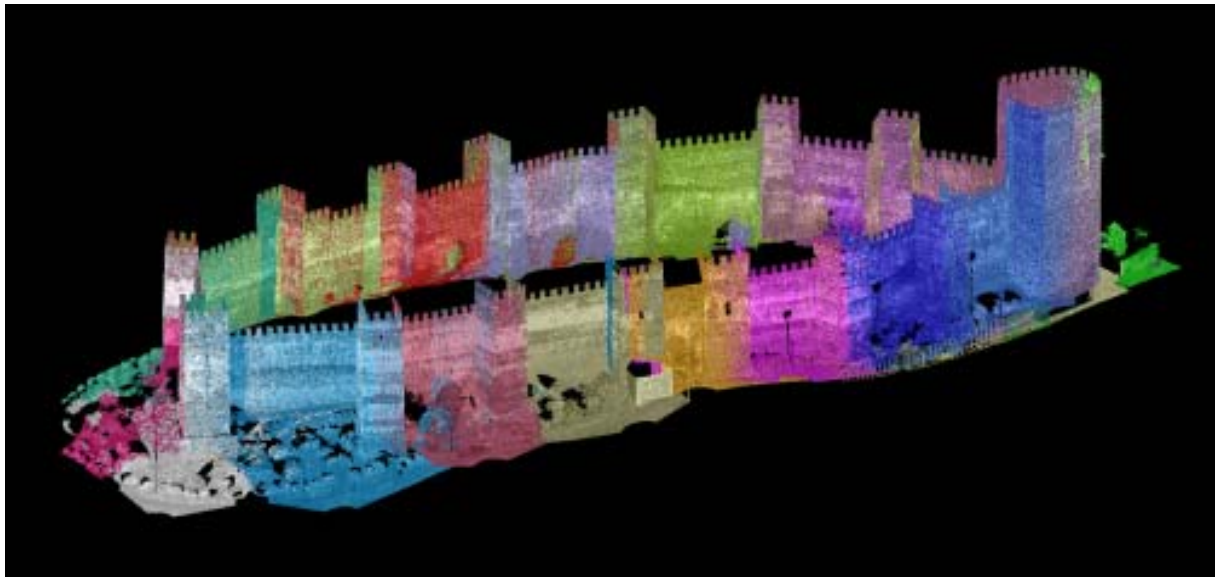


Figura 30 – Nube de puntos filtrada a 5 mm vista desde I-Side

- Superficie del pórtico de entrada a la fortaleza (**Figura 31 – Superficie del pórtico de la fortaleza**) y superficie de la torre del homenaje (**Figura 32 – Superficie de la torre del homenaje**) es el torreón de más altura de la fortaleza estas superficies vienen dadas en formato .obj y .pdf3d. Y se encuentran en la carpeta de productos con los nombres portico.pdf, portico.obj, torre\_homenaje.pdf y torre\_homenaje.obj

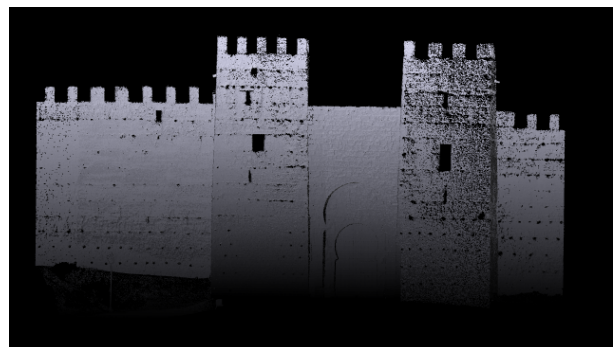
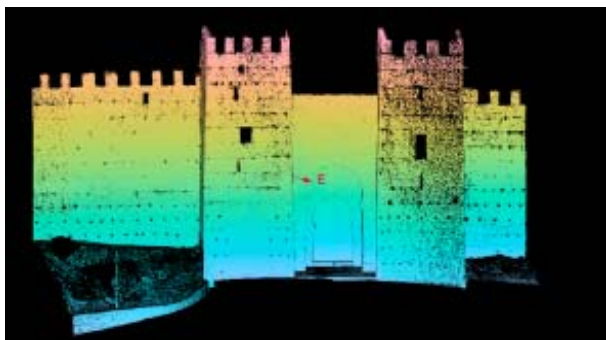
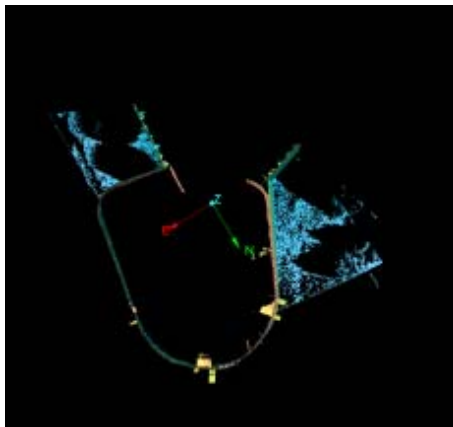
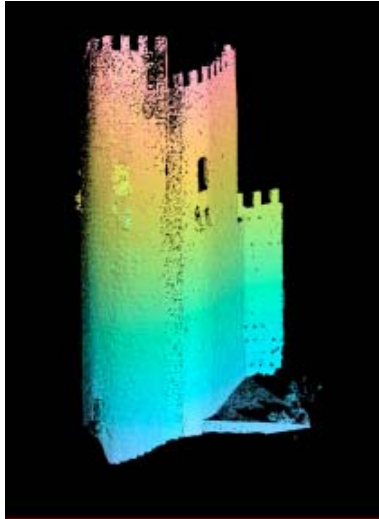


Figura 31 – Superficie del pórtico de la fortaleza a la izquierda en formato obj y a la derecha en formato pdf3d



**Figura 32 – Superficie de la torre del homenaje visto en planta y en alzado a la izquierda en formato obj y a la derecha en formato pdf3d**

### 5.2.3. Fotogrametría (PhotoScan).

- Informe que emite PhotoScan con los resultados obtenidos en la orientación del bloque fotogramétrico este informe se entrega en formato pdf y viene dado en el anexo 3 de esta memoria.
- Nube de puntos densa creada por matching el cual se podrá encontrar en formato txt en la carpeta de productos del proyecto el fichero se llama: Nube de Puntos Castillo de Buralimar.txt
- Superficie del Castillo interior y exterior (**Figura 33 – Modelo del Castillo de Buralimar**) en formato pdf3d y obj estos archivos se encuentran en la carpeta del trabajo productos y se llaman: Modelo del Castillo de buralimar.pdf y Castillo de Buralimar.obj.
- Ortofoto de la zona del castillo con un gsd de 10 mm, este producto se encuentra en la carpeta de productos y se llama Ortofoto\_gsd10mm.tiff (**Figura 34 – Ortofoto del castillo de buralimar**) así como en el anexo 2 en forma de plano.



Figura 33 – Modelo del castillo de Buralimar en formato pdf3d





**Figura 34 – Ortofoto del castillo de Buralimar**

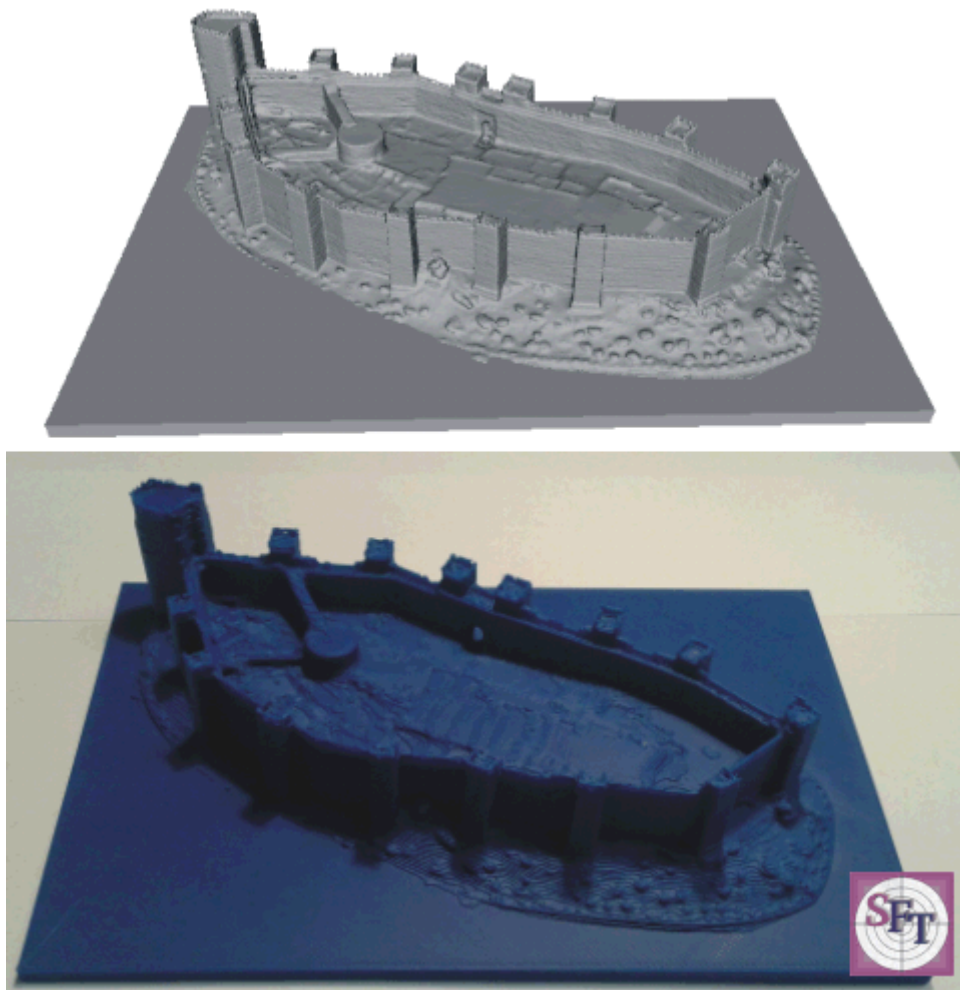


#### 5.2.4 Productos con impresoras 3D.

Este producto resulta interesante ya que se puede obtener un prototipo del objeto de estudio de forma rápida y barata gracias a impresoras 3D.

Se trata de un producto novador y es obtenido con la colaboración del grupo de investigación de sistemas fotogramétricos de la Universidad de Jaén.

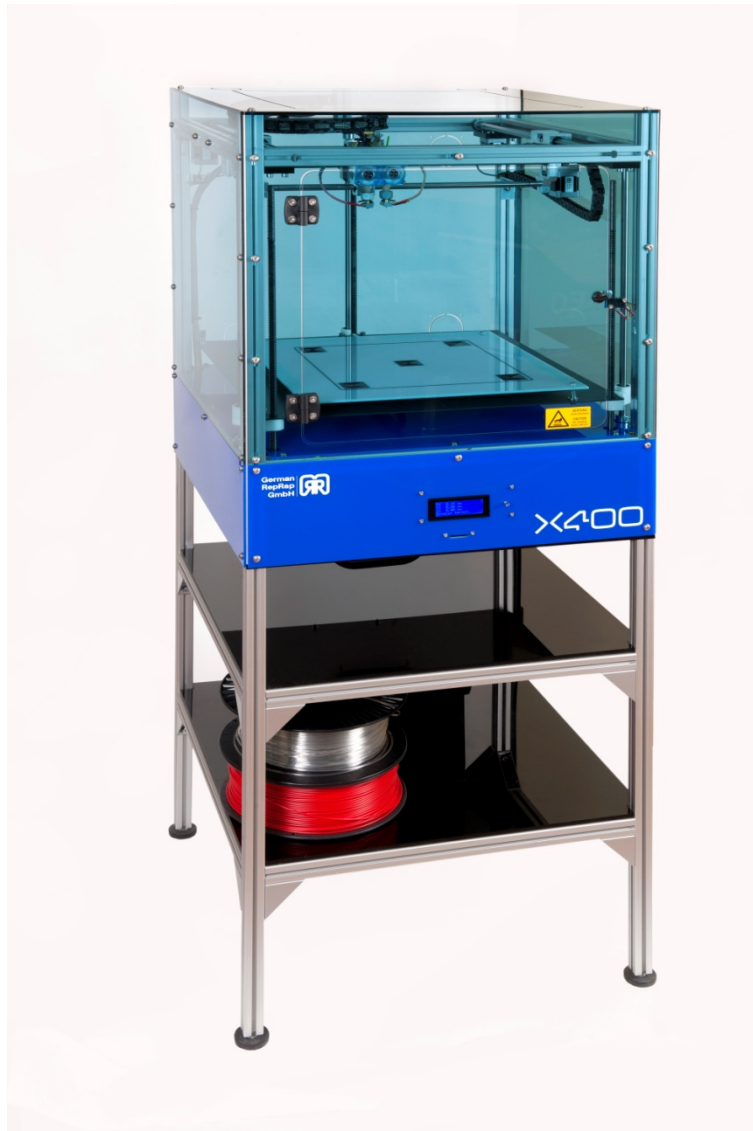
Se trata de una maqueta hecha de (No sé cómo se llama el material) (**Figura 35 – Modelado e impresión del castillo de Buralimar**)



**Figura 35 – Modelado e Impresión del castillo de Buralimar**

La impresora utilizada pertenece al departamento de Ingeniería Cartográfica y Geodésica de la UJA y es el modelo X400 3D printer series (**Figura 36 – Impresora X400 3D printer series**).

Esta impresora tardo 10 horas aproximadamente en imprimir la maqueta del castillo de Buralimar.



**Figura 36 – Impresora X400 3D printer series**

### 5.3 Conclusiones.

Tras realizar este trabajo se llega a las siguientes conclusiones:

- Los trabajos con UAV son más rápidos ya que para realizar un trabajo más completo (interior y exterior de la fortaleza) se utiliza solo una jornada de campo y con laser escáner 3d utilizamos dos jornadas y solo se escanea el exterior de la fortaleza.
- Al tener que salir menos días a campo podemos decir que la técnica de UAV es más económica.
- El laser escáner es más preciso ya que al fusionar las nubes de punto por medio de puntos de apoyo obtenemos un RMS de 3mm por lo contrario al realizar los apoyos en las fotografías se comete más errores llegando incluso a 3cm de error.
- Con los trabajos realizados con UAV se obtienen los productos en color verdadero.

---

## **ANEXO 1 – RESEÑAS DE BASES Y PUNTOS DE APOYO**

---

# RED ANDALUZA DE POSICIONAMIENTO



Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía  
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA, INNOVACIÓN, CIENCIA Y EMPLEO

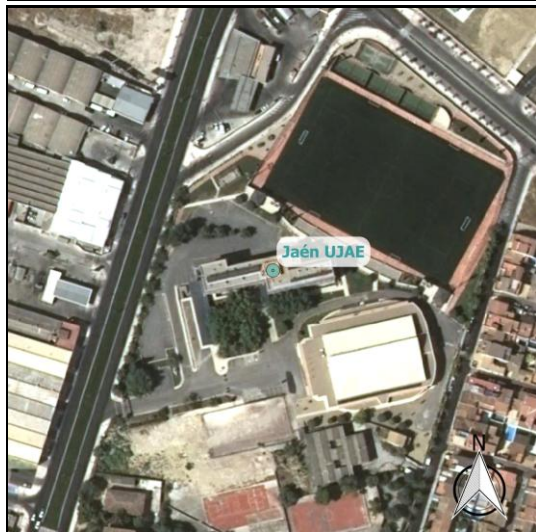


LABORATORIO DE ASTRONOMÍA,  
GEODESIA Y CARTOGRAFÍA  
Universidad de Cádiz

## Estación permanente de Jaén

(Fecha última actualización: 01/09/2007)

### ORTOFOTO



### FOTOGRAFÍA DE CAMPO



### MAPA DE SITUACIÓN



### PÁGINA WEB RAP:

<http://www.ideandalucia.es/portal/web/portal-posicionamiento>

### PÁGINA WEB LAGC:

<http://www.uca.es/grup-invest/geodesia/>

### SITUACIÓN

VERTICE: **UJAE** NOMBRE: **Jaén**  
ID DE RED: **0009** Nº IERS DOMES: **13458M001**  
PROVINCIA: **Jaén** MUNICIPIO: **Jaén**  
HOJA MTN-50: **947**

UBICACIÓN: Colegio Mayor Domingo Savio de la Universidad de Jaén. Campus Las Lagunillas. Ctra.de Madrid, s/n. C.P.: 23071 – Jaén.

CONSTRUCCIÓN Centrado forzado montado sobre monolito de hormigón con forma cilíndrica de 1m. de altura y 0.3 m de diámetro colocado sobre la cubierta del edificio.

### INSTRUMENTACIÓN

RECEPTOR: **Leica GRX 1200 Pro** ANTENA: **LEIAT504 LEIS**

ESTACIÓN METEOROLÓGICA: **Paroscientific MET3**  
REGISTROS: **Presión, humedad y temperatura**

### COORDENADAS ETRS-89

#### CARTESIANAS

X(m): **5036325.112** Y(m): **-332899.123** Z(m): **3887177.068**

#### GEODÉSICAS

##### DECIMAL

##### SEXAGESIMAL

LATITUD: **37.787760720** **37° 47' 15.93859" N**

LONGITUD: **-3.781727389** **3° 46' 54.21860" O**

H ELIPS (m): **527.770**

#### UTM

##### HUSO 30

X UTM 30 (m): **431168.555**

Y UTM 30 (m): **4182554.783**

### INFORMACIÓN ADICIONAL

#### INSTITUCIÓN RESPONSABLE:

Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA).  
Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo.  
C/ Leonardo Da Vinci, nº 21 (Pabellón de Nueva Zelanda) Isla de La Cartuja.  
41092 Sevilla. España

E-MAIL IECA: [cartografia@juntadeandalucia.es](mailto:cartografia@juntadeandalucia.es)

#### CONTROL GEODÉSICO:

Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía (LAGC). Departamento de Matemáticas. Facultad de Ciencias. Campus de Puerto Real. Universidad de Cádiz. 11510 Puerto Real (Cádiz). España.

E-MAIL LAGC: [geodesia@uca.es](mailto:geodesia@uca.es)

**NOMBRE DE LA BASE:** EST1

**SEÑALIZACIÓN:** Punta de acero en acerado

**PROVINCIA:** JAÉN

**TÉRMINO MUNICIPAL:** Baños de la Encina

### COORDENADAS GEOGRÁFICAS

**Sistema de Referencia:** ETRS 89

**Longitud:** -3° 46' 33.23455"

**Latitud:** 38° 10' 11.04121"

### COORDENADAS UTM (Huso 30)

**Sistema de Referencia:** ETRS 89

**X (m):** 432035,1867

**Y (m):** 4224932,9823

**Altitud Ortométrica (H):** 480,1686

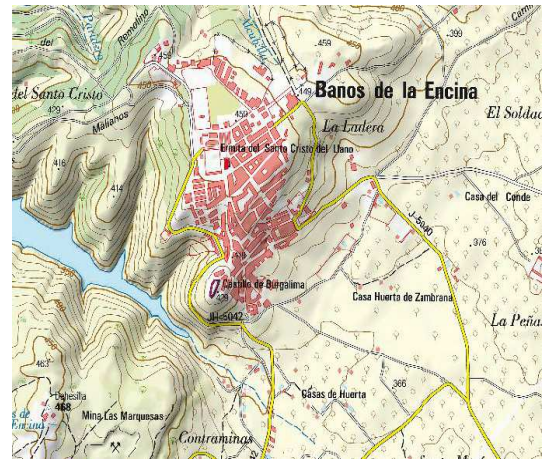
### FOTOGRAFIA



### ACCESO

Punta de acero clavada en una grieta en el acerado. Se encuentra en la parte sur-oeste en un camino que accede a una parcela de olivos en el pasillo peatonal que rodea la fortaleza.

### SITUACIÓN



### CROQUIS



**NOMBRE DEL PUNTO DE APOYO:** D101

**SEÑALIZACIÓN:** Esquina de baldosa

**PROVINCIA:** JAÉN

**TÉRMINO MUNICIPAL:** Baños de la Encina

### COORDENADAS GEOGRÁFICAS

**Sistema de Referencia:** ETRS 89

**Longitud:** -3° 46' 31.44460"

**Latitud:** 38° 10' 12.77260"

### COORDENADAS UTM (Huso 30)

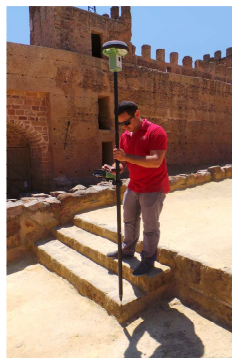
**Sistema de Referencia:** ETRS 89

**X (m):** 432079,458

**Y (m):** 4224985,610

**Altitud Ortométrica (H):** 487,381

### FOTOGRAFIA



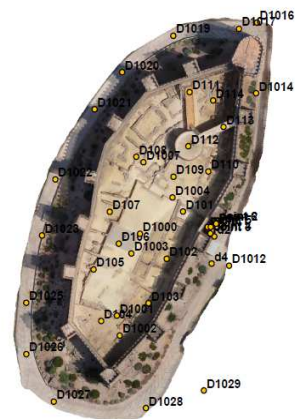
### ACCESO

En el interior de la fortaleza primer peldaño de la escalera situada frente al pórtico de entrada.

### SITUACIÓN



### CROQUIS



**NOMBRE DEL PUNTO DE APOYO:** D106

**SEÑALIZACIÓN:** Esquina de arqueta

**PROVINCIA:** JAÉN

**TÉRMINO MUNICIPAL:** Baños de la Encina

### COORDENADAS GEOGRÁFICAS

**Sistema de Referencia:** ETRS 89

**Longitud:** -3° 46' 32.22231"

**Latitud:** 38° 10' 12.47546"

### COORDENADAS UTM (Huso 30)

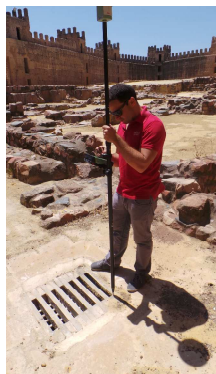
**Sistema de Referencia:** ETRS 89

**X (m):** 432060,761

**Y (m):** 4224976,584

**Altitud Ortométrica (H):** 489,378

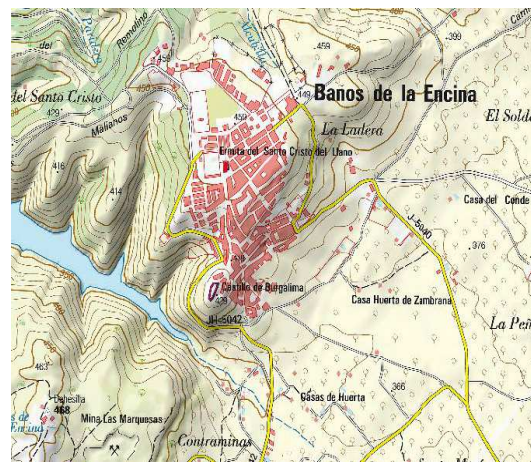
### FOTOGRAFIA



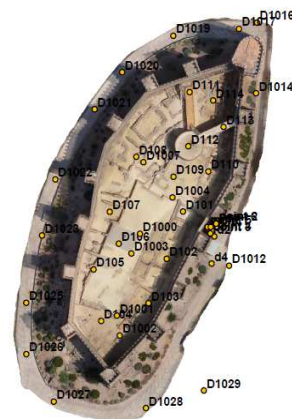
### ACCESO

En el interior del castillo rejilla pluviales situada al sur de la fortaleza.

### SITUACIÓN



### CROQUIS





**NOMBRE DEL PUNTO DE APOYO:** D1003

**SEÑALIZACIÓN:** Esquina de baldosa

**PROVINCIA:** JAÉN

**TÉRMINO MUNICIPAL:** Baños de la Encina

### COORDENADAS GEOGRÁFICAS

**Sistema de Referencia:** ETRS 89

**Longitud:** -3° 46' 32.03767"

**Latitud:** 38° 10' 12.40660"

### COORDENADAS UTM (Huso 30)

**Sistema de Referencia:** ETRS 89

**X (m):** 432064,475

**Y (m):** 4224973,840

**Altitud Ortométrica (H):** 489,416

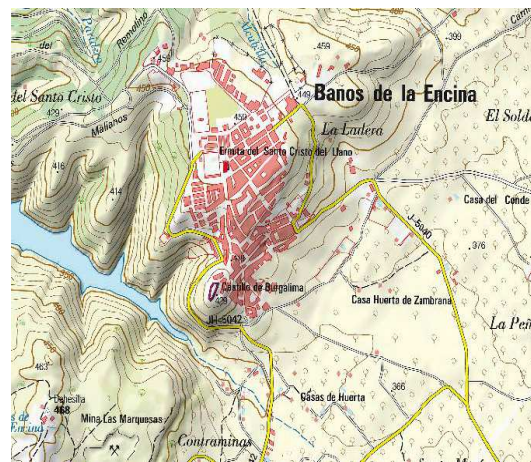
### FOTOGRAFIA



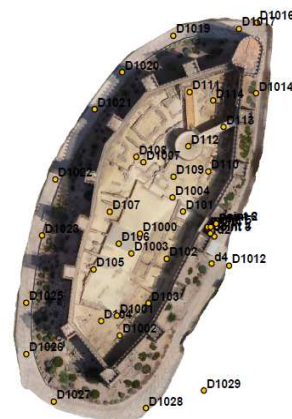
### ACCESO

En el interior de la fortaleza esquina de bordillo situado al sur de la fortaleza.

### SITUACIÓN



### CROQUIS



**NOMBRE DEL PUNTO DE APOYO:** D1016

**SEÑALIZACIÓN:** Esquina de baldosa

**PROVINCIA:** JAÉN

**TÉRMINO MUNICIPAL:** Baños de la Encina

### COORDENADAS GEOGRÁFICAS

**Sistema de Referencia:** ETRS 89

**Longitud:** -3° 46' 30.59982"

**Latitud:** 38° 10' 14.49775"

### COORDENADAS UTM (Huso 30)

**Sistema de Referencia:** ETRS 89

**X (m):** 432100,952

**Y (m):** 4225038,494

**Altitud Ortométrica (H):** 482,419

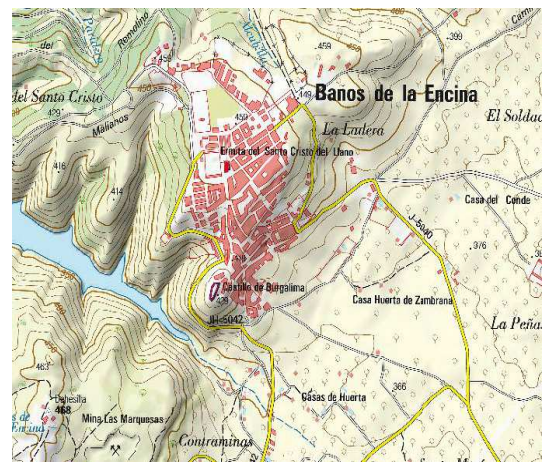
### FOTOGRAFIA



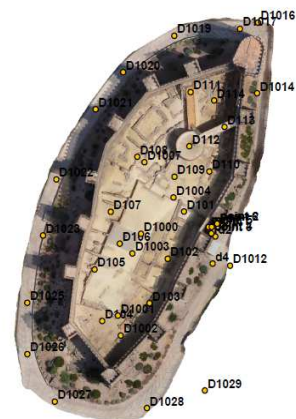
### ACCESO

En el camino peatonal que rodea la fortaleza en el lado norte hay una escalera la cabeza del muro de acceso a la escalera.

### SITUACIÓN



### CROQUIS





**NOMBRE DEL PUNTO DE APOYO:** D1020

**SEÑALIZACIÓN:** Esquina de baldosa

**PROVINCIA:** JAÉN

**TÉRMINO MUNICIPAL:** Baños de la Encina

### COORDENADAS GEOGRÁFICAS

**Sistema de Referencia:** ETRS 89

**Longitud:** -3° 46' 32.19772"

**Latitud:** 38° 10' 14.03298"

### COORDENADAS UTM (Huso 30)

**Sistema de Referencia:** ETRS 89

**X (m):** 432061,747

**Y (m):** 4225024,614

**Altitud Ortométrica (H):** 479,923

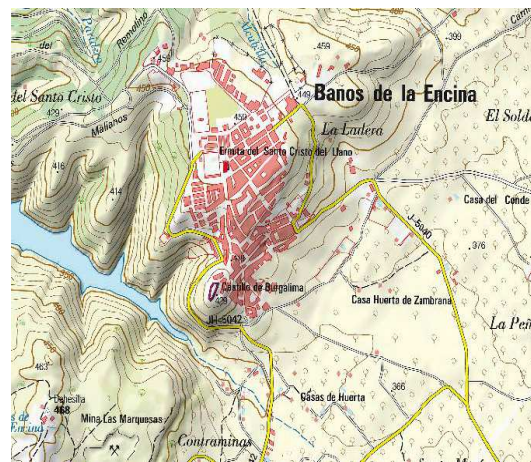
### FOTOGRAFIA



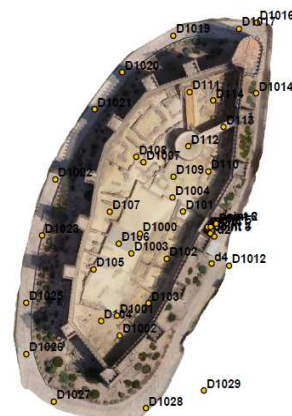
### ACCESO

En el camino peatonal que rodea la fortaleza en el lado oeste una junta de baldosas rosas.

### SITUACIÓN



### CROQUIS

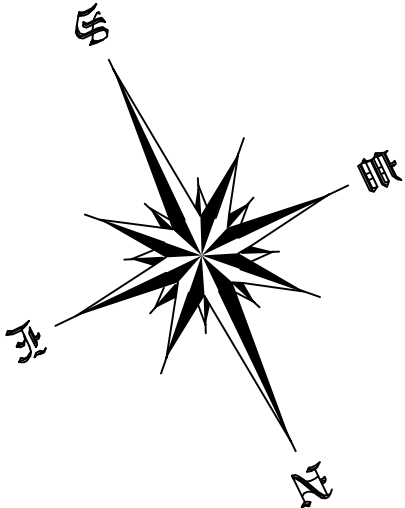


---

## **ANEXO 2 – PLANO DE ORTOFOTO**

---

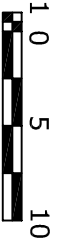




Universidad de Jaén  
*Escuela Politécnica Superior (Jaén)*

**TFG Aplicación de técnicas geomáticas a la documentación del patrimonio histórico:**  
**Castillo de Burguilimar [S. X, Baños de la Encina, Jaén]**

|         |  |                                                             |  |              |  |
|---------|--|-------------------------------------------------------------|--|--------------|--|
| Escala: |  | Autor:                                                      |  | Fecha:       |  |
| 1/400   |  | Juan Fco Alcántara Sánchez                                  |  | Julio - 2015 |  |
|         |  |                                                             |  | Firma:       |  |
|         |  | Título de plano:                                            |  | Nº de Plano: |  |
|         |  | Ortofotografía del Castillo de Burguilimar de GSD = 0,010 m |  | 01           |  |
|         |  |                                                             |  | Nº de Hoja:  |  |
|         |  |                                                             |  | 1 de 1       |  |





---

### **ANEXO 3 – INFORME GENERADO POR PHOTOSCAN**

---

# Agisoft PhotoScan

Processing Report

29 May 2015



# Survey Data

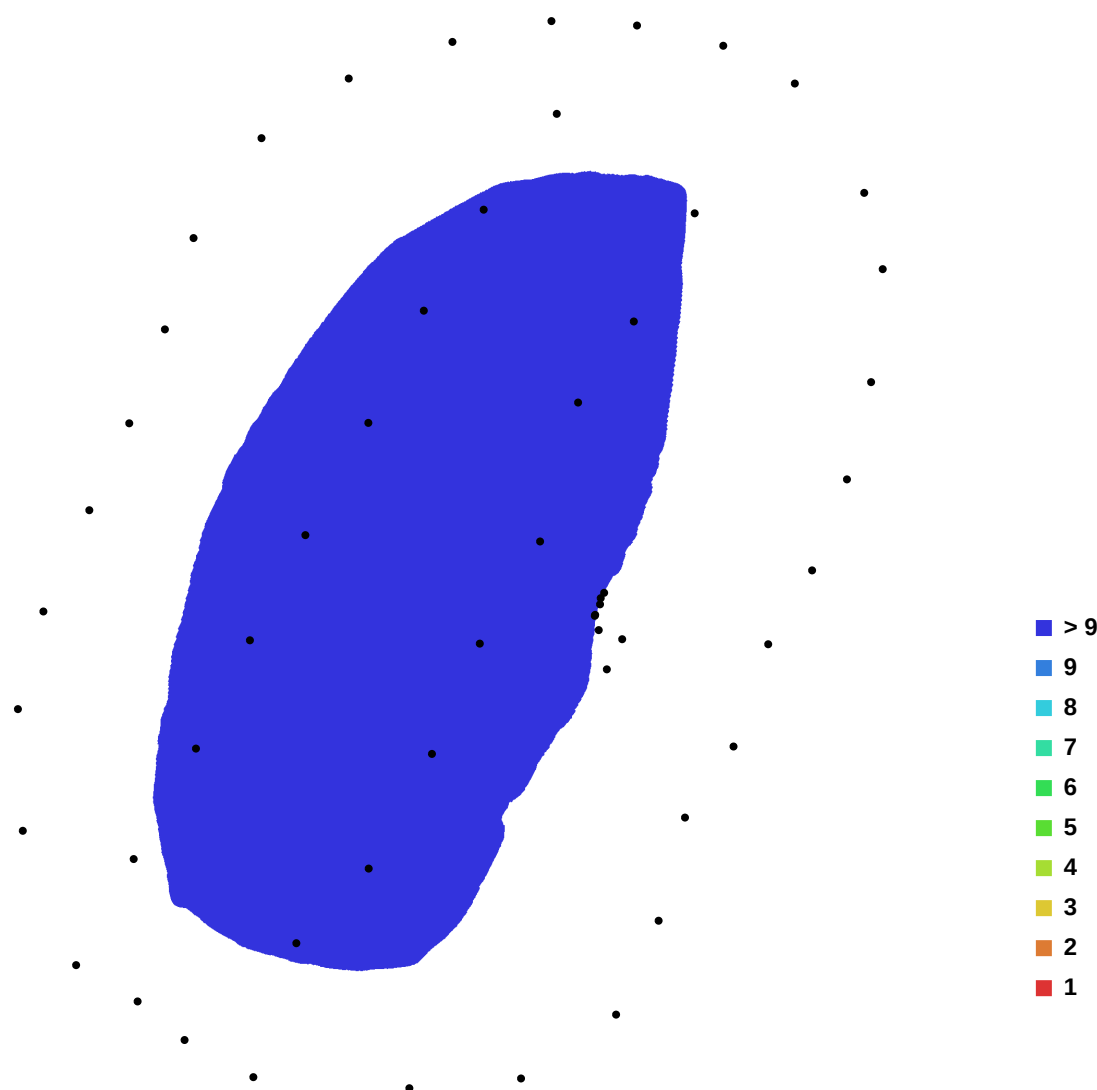


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

|                    |                  |                  |              |
|--------------------|------------------|------------------|--------------|
| Number of images:  | 54               | Camera stations: | 54           |
| Flying altitude:   | 62.9203 m        | Tie-points:      | 288276       |
| Ground resolution: | 0.0148216 m/pix  | Projections:     | 746089       |
| Coverage area:     | 0.00568813 sq km | Error:           | 0.476912 pix |

| Camera Model                 | Resolution  | Focal Length | Pixel Size           | Precalibrated |
|------------------------------|-------------|--------------|----------------------|---------------|
| NEX-5N (16 mm)               | 4912 x 3264 | 16 mm        | 4.89089 x 4.89089 um | No            |
| NEX-5N (16 mm)               | 4912 x 3264 | 16 mm        | 4.89089 x 4.89089 um | No            |
| Canon PowerShot G10 (6.1 mm) | 4416 x 3312 | 6.1 mm       | 1.67953 x 1.67953 um | No            |

Table. 1. Cameras.



# Camera Calibration

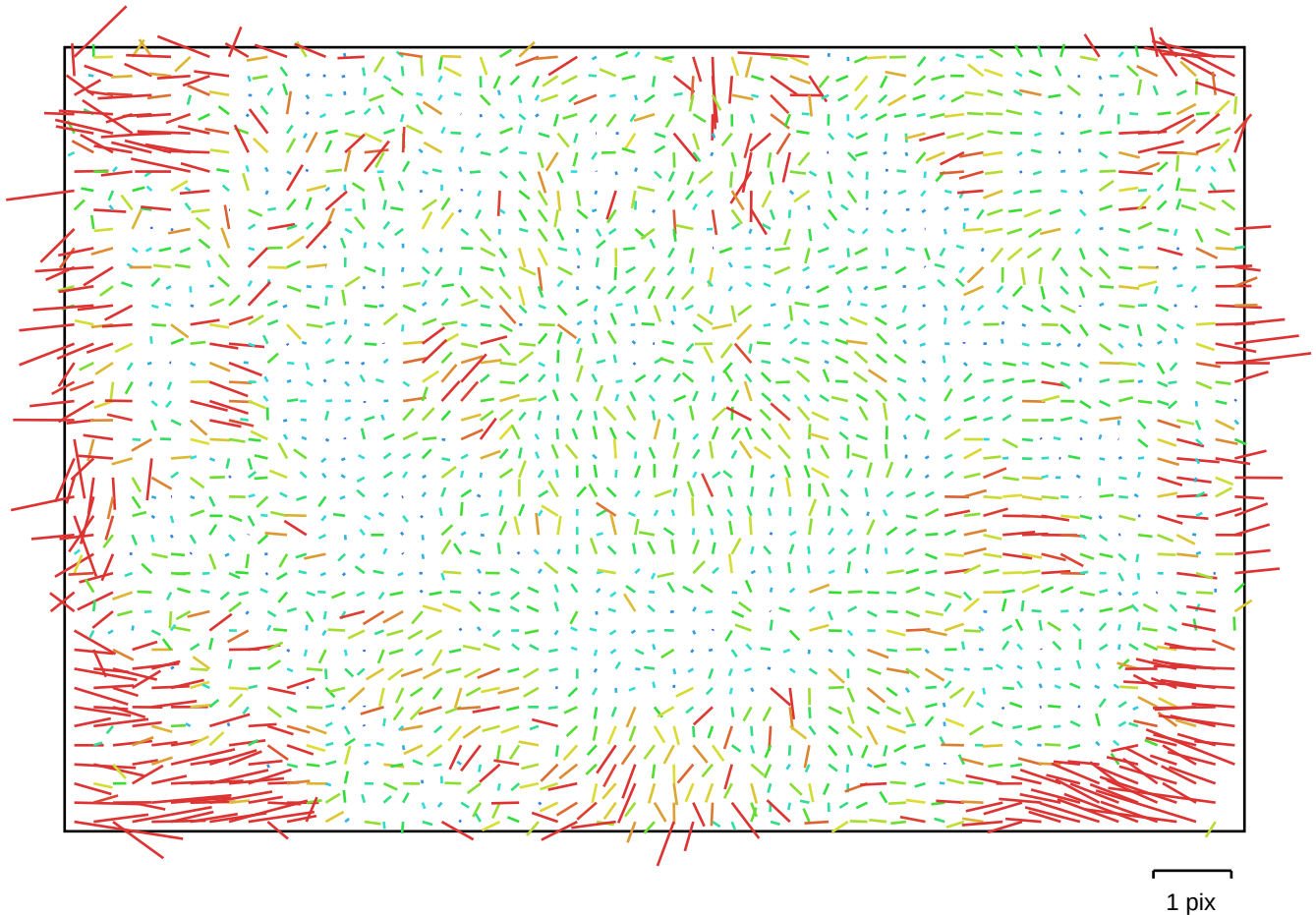


Fig. 2. Image residuals for NEX-5N (16 mm).

## NEX-5N (16 mm)

|       |         |     |               |
|-------|---------|-----|---------------|
| Type: | Frame   | K1: | -7.48824e-005 |
| Fx:   | 3346.83 | K2: | -0.00829894   |
| Fy:   | 3346.83 | K3: | 0.00668843    |
| Cx:   | 2447.37 | K4: | 0             |
| Cy:   | 1606.28 | P1: | 0             |
| Skew: | 0       | P2: | 0             |

# Camera Calibration

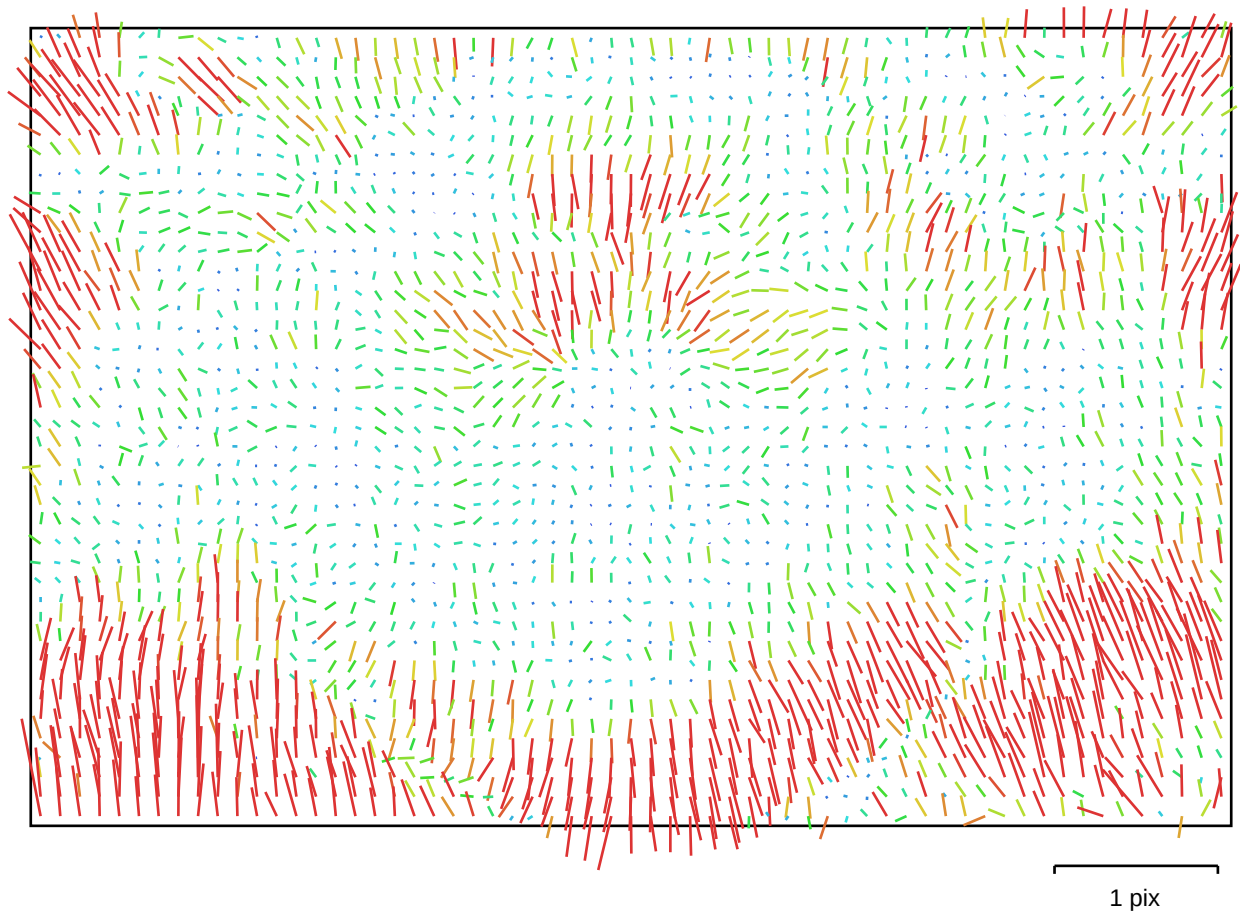


Fig. 3. Image residuals for NEX-5N (16 mm).

## NEX-5N (16 mm)

|       |         |     |            |
|-------|---------|-----|------------|
| Type: | Frame   | K1: | 0.00345842 |
| Fx:   | 3341.96 | K2: | -0.0241598 |
| Fy:   | 3341.96 | K3: | 0.0228967  |
| Cx:   | 2447.16 | K4: | 0          |
| Cy:   | 1617.68 | P1: | 0          |
| Skew: | 0       | P2: | 0          |

# Camera Calibration

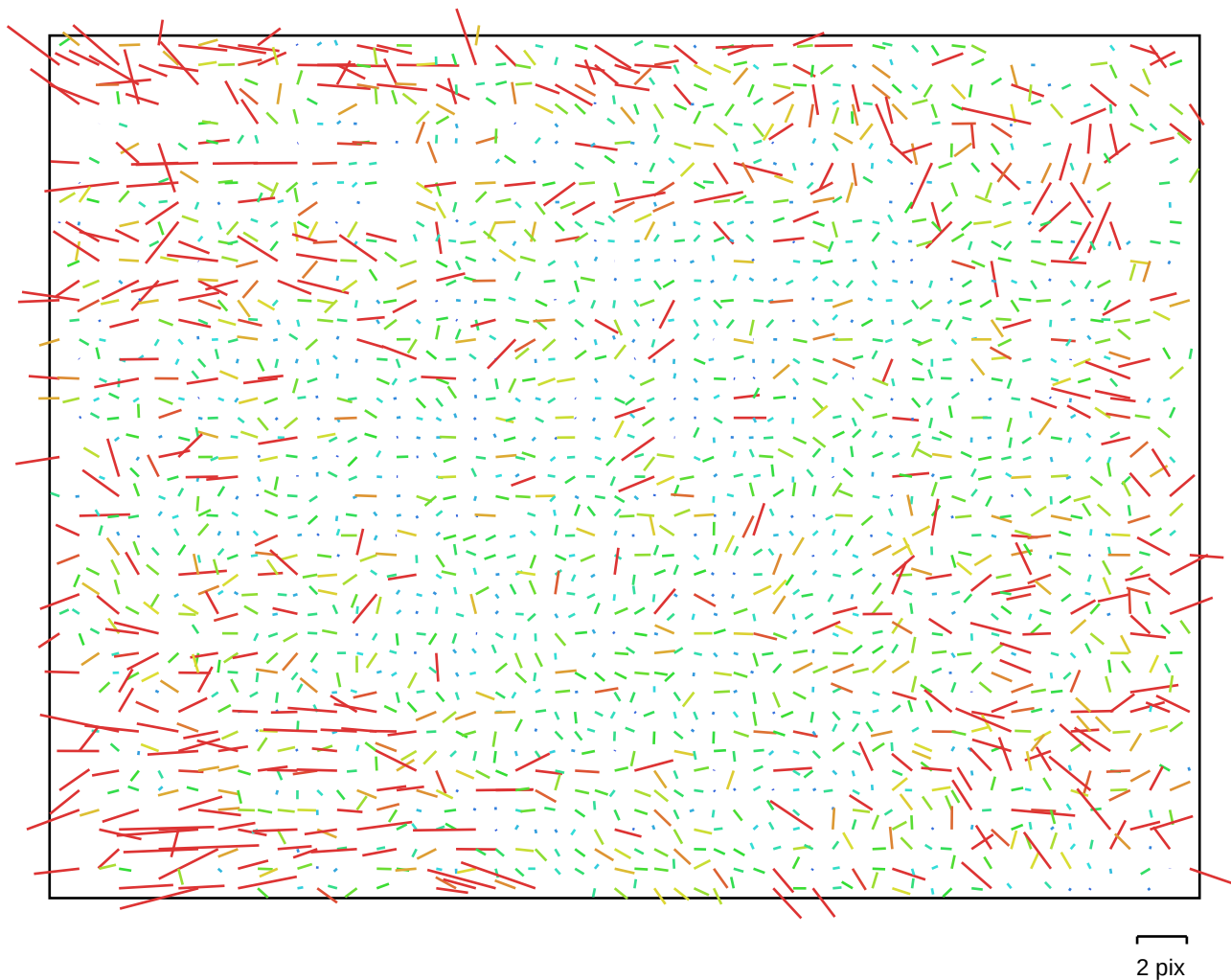


Fig. 4. Image residuals for Canon PowerShot G10 (6.1 mm).

## Canon PowerShot G10 (6.1 mm)

|       |         |     |            |
|-------|---------|-----|------------|
| Type: | Frame   | K1: | -0.158653  |
| Fx:   | 3707.85 | K2: | 0.156664   |
| Fy:   | 3707.85 | K3: | -0.0473115 |
| Cx:   | 2232.07 | K4: | 0          |
| Cy:   | 1615.58 | P1: | 0          |
| Skew: | 0       | P2: | 0          |

# Ground Control Points

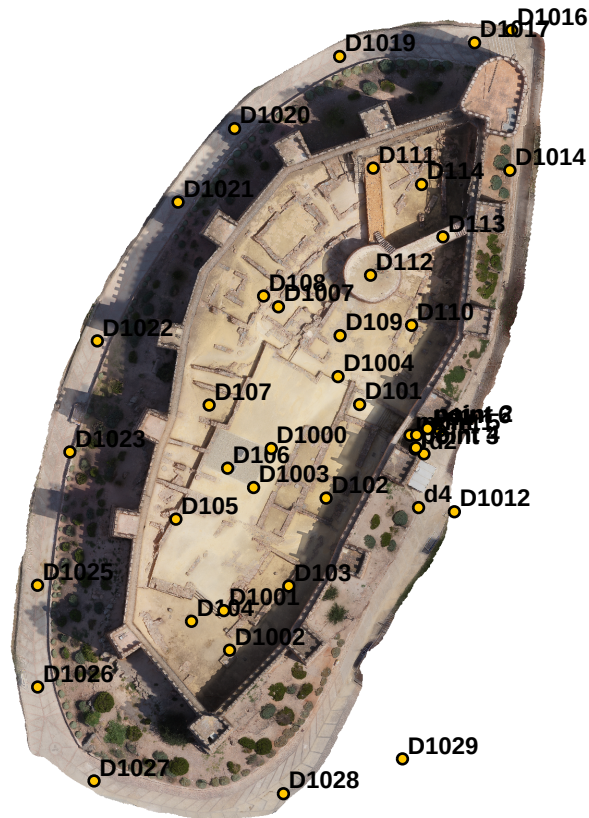


Fig. 5. GCP locations.

| Label | X error (m) | Y error (m) | Z error (m) | Error (m) | Projections | Error (pix) |
|-------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| D101  | -0.012805   | -0.009861   | 0.000123    | 0.016163  | 18          | 0.556150    |
| D102  | 0.006803    | 0.003457    | -0.018673   | 0.020172  | 21          | 0.509099    |
| D103  | -0.013662   | 0.002026    | 0.007842    | 0.015883  | 20          | 0.568450    |
| D104  | -0.010751   | 0.012943    | -0.008985   | 0.019075  | 13          | 0.389861    |
| D105  | -0.007821   | 0.007886    | -0.017458   | 0.020692  | 21          | 0.502271    |
| D106  | 0.020631    | 0.019018    | -0.015816   | 0.032210  | 29          | 0.925560    |
| D107  | -0.009146   | 0.008673    | 0.000449    | 0.012612  | 22          | 0.505363    |
| D108  | 0.000191    | -0.001419   | -0.001662   | 0.002194  | 26          | 0.500743    |
| D109  | 0.002400    | -0.007396   | 0.001563    | 0.007931  | 28          | 0.412965    |
| D110  | 0.036307    | -0.007193   | -0.088597   | 0.096017  | 6           | 0.287530    |

| Label   | X error (m) | Y error (m) | Z error (m) | Error (m) | Projections | Error (pix) |
|---------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| D111    | -0.000686   | 0.010739    | -0.010491   | 0.015029  | 16          | 0.536136    |
| D112    | 0.005834    | 0.021983    | 0.006542    | 0.023666  | 21          | 0.695244    |
| D113    | 0.009288    | 0.008714    | -0.011661   | 0.017268  | 17          | 0.476791    |
| D114    | -0.013313   | -0.001726   | 0.036689    | 0.039067  | 10          | 0.409609    |
| D1000   | -0.047824   | -0.004651   | 0.002485    | 0.048114  | 31          | 1.137023    |
| D1001   | -0.007065   | -0.000811   | 0.001899    | 0.007361  | 6           | 0.298917    |
| D1002   | 0.017287    | -0.049951   | -0.018221   | 0.055910  | 7           | 0.431430    |
| D1003   | -0.018379   | 0.029306    | 0.019603    | 0.039760  | 33          | 1.215006    |
| D1004   | 0.005150    | -0.009345   | 0.005612    | 0.012056  | 20          | 0.692559    |
| D1007   | -0.005251   | -0.007641   | 0.029057    | 0.030500  | 6           | 0.674133    |
| D1012   | 0.004071    | -0.007087   | 0.031239    | 0.032290  | 7           | 0.727007    |
| D1014   | -0.060833   | 0.070388    | -0.029029   | 0.097457  | 1           | 0.000000    |
| D1016   | -0.012794   | 0.000248    | -0.046290   | 0.048026  | 14          | 0.567325    |
| D1017   | 0.011095    | 0.003143    | -0.007694   | 0.013863  | 12          | 0.246726    |
| D1019   | -0.010521   | -0.010245   | 0.040805    | 0.043367  | 15          | 0.804069    |
| D1020   | 0.022885    | -0.014864   | 0.001528    | 0.027331  | 9           | 0.577543    |
| D1021   | 0.000783    | 0.011656    | 0.010784    | 0.015899  | 5           | 0.202132    |
| D1022   | -0.009831   | 0.024923    | 0.034844    | 0.043953  | 6           | 0.299817    |
| D1023   | -0.014420   | 0.001671    | -0.044872   | 0.047161  | 3           | 0.334993    |
| D1025   | 0.009153    | -0.008992   | 0.013038    | 0.018293  | 15          | 0.522240    |
| D1026   | 0.023514    | -0.010972   | -0.015725   | 0.030341  | 12          | 0.589733    |
| D1027   | 0.017414    | 0.012307    | -0.011758   | 0.024350  | 5           | 0.336357    |
| D1028   | 0.030386    | 0.011020    | 0.006850    | 0.033040  | 10          | 0.457165    |
| D1029   | -0.024303   | -0.017866   | 0.006280    | 0.030810  | 5           | 0.730273    |
| d1      | -0.005692   | 0.000591    | -0.002239   | 0.006145  | 8           | 0.620970    |
| d2      | -0.003273   | -0.012069   | -0.012520   | 0.017696  | 4           | 0.417600    |
| d4      | 0.002037    | -0.017224   | 0.051446    | 0.054291  | 8           | 0.754062    |
| point 1 | 0.002547    | -0.014207   | 0.013453    | 0.019732  | 5           | 0.207768    |
| point 2 | 0.015758    | 0.011279    | 0.006075    | 0.020308  | 4           | 0.257929    |
| point 3 | -0.015689   | -0.005622   | -0.015103   | 0.022491  | 4           | 0.257046    |
| point 4 | -0.001142   | -0.001136   | -0.006639   | 0.006832  | 4           | 0.175722    |
| point 5 | 0.000000    | 0.000000    | -0.000000   | 0.000000  |             |             |
| point 6 | -0.001446   | 0.009712    | 0.002231    | 0.010070  | 6           | 0.172514    |

| Label | X error (m) | Y error (m) | Z error (m) | Error (m) | Projections | Error (pix) |
|-------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| Total | 0.017838    | 0.017307    | 0.024167    | 0.034667  | 533         | 0.665310    |

Table. 2. Control points.

# Digital Elevation Model

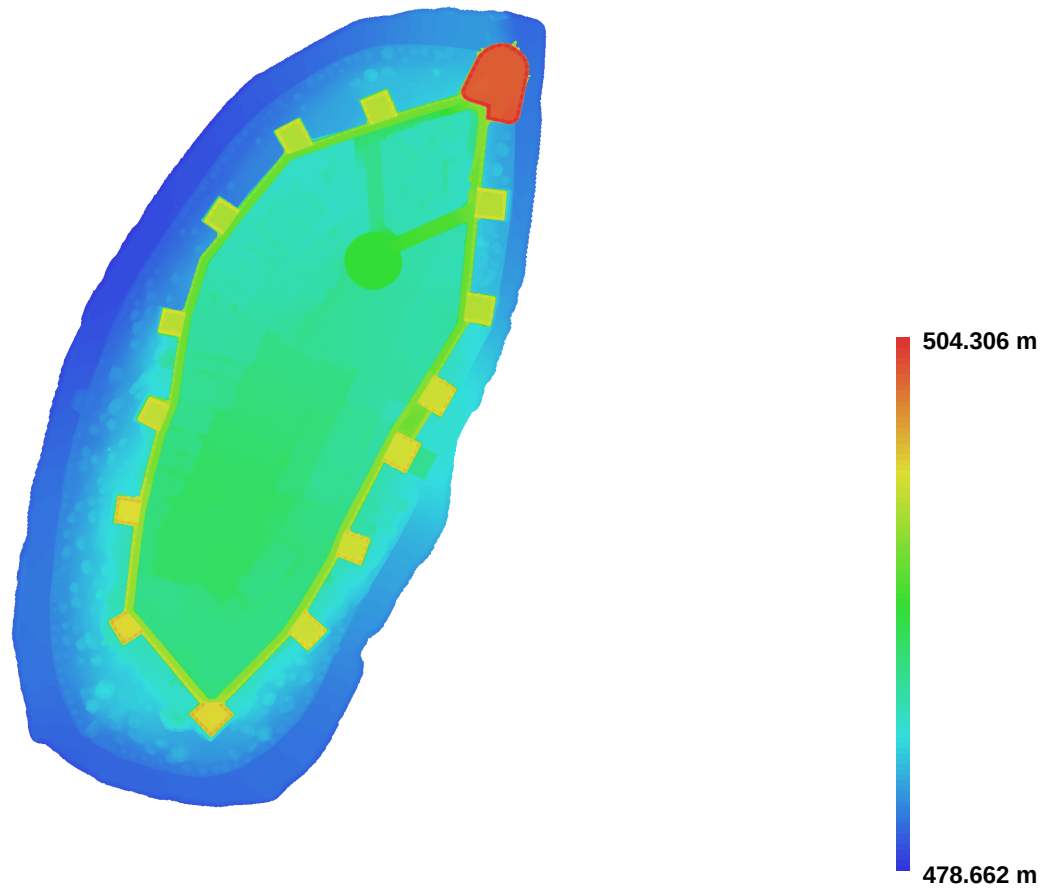


Fig. 6. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.0296433 m/pix  
Point density: 1138.01 points per sq m