

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA**

ESCUELA TECNIA SUPERIOR

DE INGENIEROS AGRONOMOS

**Trabajo de Fin de Máster - Máster Universitario en Sistemas de  
Información Geográfica y Teledetección (MUSIGT)**

**Obtención de la cartografía de detalle y productos  
derivados en zonas urbanas.**

Presentado por

**Faten Zouaghi**

**Director:** Dr. Jesús Álvarez Mozos, UPNA

**Co-director:** Dr. Alejandro Martínez de Aguirre, UPNA

**Tutor:** Ing. Víctor García Morales, Tracasa

Proyecto realizado con la colaboración de la empresa Tracasa.



Año académico: 2018-2019



## Prefacio



Tracasa es una empresa del Gobierno de Navarra constituida en el año 1982 con el objeto de implantar, conservar y gestionar el catastro de la Comunidad foral de Navarra.

En estos años de historia de la compañía, Tracasa se ha convertido en una organización con presencia internacional capaz de ofrecer servicios integrales basados en tecnologías de la información y las comunicaciones, a partir de una competencia central de gestión de la información territorial y su representación gráfica.

La amplitud de la oferta y el grado de especialización alcanzado permiten, en sucesivos años, la presencia de la empresa en el mercado nacional e internacional. Los servicios ofertados abarcan diferentes áreas como, por ejemplo, urbanismo, infraestructuras, industria, agricultura, etc...

Las tres líneas básicas de actividad de Tracasa que se complementan son:

- Ingeniería de Software, sistemas de información y tecnologías de la información y la comunicación.
- Ingeniería rural, catastro y cartografía.
- Ingeniería territorial y sistemas de información geográfica.

Los servicios ofertados por Tracasa abarcan diferentes áreas tanto a nivel nacional como internacional como agricultura, urbanismo, industria, medio ambiente, etc.

Como prueba de la consolidada posición de Tracasa a lo largo de los últimos años y de la experiencia y prestigio adquiridos se pueden mencionar diversos trabajos relevantes desarrollados a nivel regional, nacional, europeo e internacional.

### **Los principales trabajos realizados en Navarra:**

- Constitución y mantenimiento Catastro de Navarra.
- Construcción y operación del sistema informático de Gestión Catastral.
- Sistema de Información Territorial de Navarra (SITNA).
- Producción y actualización de la cartografía de Navarra.

### **Los principales trabajos realizados en España:**

- Mantenimiento del Inventario de Suelo de la Comunidad de Madrid (GeoMadrid).
- Georreferenciación del Vuelo Histórico de Ruiz de Alda (1929). Región de Murcia.
- Operación del Sistema de Información Geográfica Corporativo en Red de Menorca
- Implantación del Sistema de Gestión Tributaria de los Ayuntamientos de Santa Cruz de Tenerife y Santander.

### **Los principales proyectos Europeos:**

- **CROSS - SIS** Avivar el uso de datos espaciales para la toma de decisiones en el marco transfronterizo.

- **GRISI** Manifestar el valor añadido que supone la georreferenciación de la información de cara a su uso por Internet.
- **NATURE SDIPlus** Definir una Red de Buenas Prácticas para la creación de una infraestructura de datos espaciales sobre Conservación de la Naturaleza a nivel europeo.

#### **Los principales proyectos a nivel internacional:**

Tracasa ha realizado diversos trabajos importantes en Latinoamérica entre los que destacan:

- **Argentina:** Recaudación catastral de Buenos aires.
- **Nicaragua:** Obtención de ortofotos, actualización catastral e implantación de S.I.G.
- **Guatemala y Paraguay:** Proyectos de actualización catastral, acompañada de una realización previa de vuelo fotogramétrico y producción de ortofotos.
- **Costa Rica:** Catastro urbano y rústico y conciliación con el registro de la propiedad.
- **Mexico D.F.:** Levantamiento catastral urbano, cartografía, ortofoto y Sistema informático de gestión catastral y tributaria.



## RESUMEN

Una ortofoto se consigue mediante un conjunto de imágenes aéreas que han sido corregidas para representar una proyección ortogonal sin efectos de perspectiva. Tradicionalmente, los modelos digitales de terreno (MDT) se han utilizado como modelos de elevación para la generación de ortofotos. Dado que un MDT no representa los objetos sobre el suelo, el uso de la ortofoto tradicional tiene limitaciones sobre todo en zonas urbanas, donde los objetos situados en altura (edificios, etc.) pueden tener un desplazamiento respecto a su posición real. Para evitar estos problemas, habría que recurrir a lo que se conoce como ortofoto verdadera, utilizando un modelo digital de superficie (MDS) que contenga al menos todos los objetos sobre el suelo.

En este trabajo se aborda un método para la obtención de una ortofoto verdadera de alto detalle en una zona urbana del municipio de Pamplona. Se investigan distintas fuentes de datos para la creación del MDS, como nubes de puntos LiDAR, cartografía vectorial o nubes de puntos densas resultantes del proceso automático de correlación estereoscópica. También se investigan distintos softwares fotogramétricos que utilizan procesos fotogramétricos distintos como Inpho versión 5, Inpho versión 9 y MetaShape.

Por último, se realiza la comparación y análisis de la exactitud y precisión de la ortofoto verdadera resultante de cada fuente de datos y de cada software. Se ha observado que Inpho 9 ha sido la herramienta más precisa en la generación de la ortofoto verdadera mediante un proceso automático usando solo las imágenes del vuelo fotogramétrico.

**Palabras clave:** LiDAR, clasificación, Ortofoto verdadera, MDS, Fotogrametría aérea.

## ABSTRACT

An orthophoto is achieved by a set of aerial images that have been corrected to represent an orthogonal projection without perspective effects. Traditionally, digital terrain models (DTM) have been used as elevation models for orthophoto generation. Since a DTM does not represent objects on the ground, the use of traditional orthophoto has its limitations especially in urban areas, since objects that are located higher than the terrain (e.g. upper parts of buildings) may appear displaced. To avoid these problems, a true orthophoto should be built by using a digital surface model (DSM) that contains at least all objects above the ground.

In this work we address a method through which a true orthophoto of high detail is obtained in an urban area of the municipality of Pamplona (Spain). Different information sources for the obtention of the DSM were investigated: LiDAR point clouds, vector cartography or dense point clouds resulting from automatic stereoscopic correlation. In addition, different photogrammetric software have been compared: Inpho version 5, Inpho version 9 and MetaShape.

Finally, a comparison and analysis of the accuracy and precision of the true orthophoto resulting from each data source and each software is performed. Results show that Inpho 9 has been the most accurate tool in the generation of the definitive true orthophoto by an automatic process using only the images of the photogrammetric flight.

**Keywords:** LiDAR, Classification, True Orthophoto, DSM, Aerial photogrammetry.

## **Dedicación**

A mis padres

Latifa & Ali

A mis hermanas

Ferdaous & Farah

A mis hermanos

Bechir & Mohamed Salah

A mi cuñado

Youssef

A mi novio

Sedik

¡Este trabajo honorable es un signo de mi amor hacia  
vosotros!

## **Agradecimientos**

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento al Sr. Jesús Álvarez Mozos; Director del Máster MUSIGT, Titular Universidad de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, UPNA y mi tutor académico del proyecto por la paciencia, la orientación y el asesoramiento que me ha brindado.

Quisiera agradecer al Sr. Alejandro Martínez de Aguirre Escobar; colaborador Dr. pyto. Tipo 1, UPNA y mi cotutor académico del proyecto por su colaboración y dedicación en este trabajo.

Quisiera expresar mi agradecimiento especial a mi supervisor, el Sr. Víctor García Morales, Ingeniero en Geodesia y Cartografía de Tracasa, por su amable apoyo y orientación para completar con éxito mi trabajo de fin de Máster.

Quisiera aprovechar la oportunidad para agradecer a mis compañeros de trabajo en Tracasa; Marian Erro, Santiago, Mariaje y Fermin por sus apoyos y sus ayudas para resolver los problemas que he encontrado en numerosas ocasiones.

Muchas gracias a todo el equipo de la empresa Tracasa y a todos mis profesores de la UPNA porque gracias a ellos aprendí nuevos conceptos que me ayudaron a tener éxito en este trabajo.

Simplemente gracias a todos los que contribuyeron al éxito de este trabajo.





# Índice

<b>Prefacio</b> .....	<b>3</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>12</b>
<b>Índices de tablas</b> .....	<b>14</b>
1. Introducción y objetivos del proyecto .....	<b>1</b>
1.1 Motivación .....	1
1.2 Definición del problema .....	1
1.3 Esquema y estructura .....	2
<b>Estudio teórico</b> .....	<b>2</b>
2. Ortofoto tradicional .....	<b>2</b>
2.1 Creación de ortofotos .....	3
2.2 Algoritmos de ortorectificación .....	3
2.3 Reproyección de ortorectificación .....	5
2.4 Generacion del mosaico .....	6
3. Ortofoto verdadera.....	<b>7</b>
3.1 Definición .....	7
3.2 Precisión y calidad de la ortofoto verdadera.....	10
4. El Sistema LiDAR .....	<b>12</b>
4.1 Definición .....	12
4.2 Tipos de sistemas LiDAR .....	13
4.2 Toma de datos LiDAR .....	13
4.3 Ventajas de la fusión de datos LiDAR con las imágenes áreas .....	15
<b>Estudio experimental</b> .....	<b>15</b>
5. Localización de la zona de estudio .....	<b>15</b>
6. Material y datos .....	<b>16</b>
7. Metodología.....	<b>16</b>
7.1 Clasificación de los puntos LiDAR.....	17
7.2 Vectorización de los edificios .....	19
7.3 Generacion de la ortofoto verdadera .....	21
6. Resultados.....	<b>43</b>
6.1 Resultados obtenidos con MetaShape.....	43

6.2 Resultados obtenidos con Inpho 5 .....	43
6.3 Resultados obtenidos con Inpho versión 9 .....	44
7. Análisis de tiempo total de coste computacional .....	<b>45</b>
8. Conclusiones.....	<b>46</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>49</b>
<b>Anexo I: Análisis comparativa de softwares comerciales de fotogrametría .....</b>	<b>51</b>

## Índice de figuras

Figura 1: Perspectiva y geometría de la imagen ortográfica, ilustrando la causa del desplazamiento del relieve (Mikhail, 2001). .....	2
Figura 2: Proyecciones ortogonales versus perspectivas (Nagashree, 2016). .....	3
Figura 3: El esquema básico de ortorectificación. Fuente propia. ....	3
Figura 4: Ejemplo de colocación de línea de unión en seis ortofotos (Nielsen, 2004) . . .	7
Figura 5: Los objetos altos y los cambios rápidos de elevación ocultarán los objetos detrás de ellos debido a los desplazamientos en relieve causados por la proyección en perspectiva (Nielsen, 2004). .....	8
Figura 6: Combinando imágenes generales para obtener una cobertura total (Nielsen, 2004). .....	9
Figura 7: Fotografía aérea con 60% de superposición frontal y lateral. Las cuatro imágenes de arriba cubren la misma área amarilla, pero se ven desde diferentes puntos de vista (Nielsen, 2004) .....	9
Figura 8: A) Una ortofoto ordinaria rectificadas sobre un modelo de terreno. El edificio no se mueve a su posición correcta. B) Ortofoto verdadera donde el área oscurecida ha sido reemplazada por imágenes de otras imágenes. Fuente propia. ....	10
Figura 9: A) Combinación de la cartografía vectorial con una ortofoto tradicional B) Combinación de la cartografía vectorial con una ortofoto verdadera. ....	10
Figura 10: A) Ortofoto verdadera sobre una superficie irregular (iglesia gótica de techo con duplicaciones, etc.). B) Ortofoto tradicional correspondiente (Wiedemann and Beckmann, 2016). .....	12
Figura 11: Nube de puntos LiDAR de la zona de estudio. Fuente propia. ....	13
Figura 12: Generación de los puntos LiDAR sobre una zona determinada (Northern Advocate, 2017). .....	14
Figura 13: Retornos de un impulso laser sobre un árbol (GeoHub, 2017). .....	14
Figura 14 : Localización del área de estudio. Fuente propia .....	16
Figura 15: Ejemplo de clasificación, arriba (A) puntos LiDAR antes de la clasificación manual, abajo (B) puntos LiDAR tras la clasificación. (Rojo: tejado, blanco: fachadas, marrón: suelo y, verde: vegetación, violeta: porche). .....	19
Figura 16: Parámetros elegidos para la vectorización automática de los edificios. ....	19
Figura 17: Ejemplo de vectorización de los edificios tras la clasificación de los puntos LiDAR (rojo: tejado, marrón: suelo, azul: patio). .....	20

Figura 18: Resultado de vectorización de los edificios antes (izquierda) y después de la edición manual (derecha).Fuente propia. ....	21
Figura 19 : Vectores correspondientes a la zona que presenta la estructura compleja...	21
Figura 20: Carga de las fotografías en MetaShape.....	22
Figura 21: Resultado de la calibración de la cámara. ....	23
Figura 22 : Cuadro de diálogo. Alinear Fotos. ....	24
Figura 23: Resultado de la orientación de las imágenes con la nube de puntos de paso empleada.....	24
Figura 24: Distribución de puntos de apoyo medidos en una imagen.....	25
Figura 25: Error de los puntos de apoyo GCP.....	25
Figura 26: Parámetros de la orientación absoluta estimados después de la aerotriangulación definitiva y el error asociado. ....	26
Figura 27: Nube densa generada. ....	27
Figura 28: Visualización del MDS derivado en MetaShape. ....	28
Figura 29: Ortofoto verdadera de la prueba 1.1 derivada en MetaShape.....	29
Figura 30: Ortofoto verdadera de la prueba 1.2 derivada en MetaShape.....	29
Figura 31: Definición del Dátum.....	30
Figura 32: Parámetros de calibración. ....	30
Figura 33: Importación de los datos iniciales de la orientación externa. ....	31
Figura 34: Importación de fotografías.....	31
Figura 35: Puntos de control del proyecto.....	32
Figura 36: Localización de los puntos de control de manera aproximada. ....	33
Figura 37: Inicialización del proceso.....	33
Figura 38: Parámetros para realizar la orientación externa. ....	34
Figura 39: Conexiones posibles entre los fotocentros de las imágenes.....	34
Figura 40: Ventana principal de creación de MDS. ....	35
Figura 41: Ventana principal de creación de ortofotos. ....	36
Figura 42: Pasos a seguir para generar ortofotos verdaderas.....	36
Figura 43: Parámetros del mosaico. ....	37

Figura 44: Resultado final de las ortofotos verdaderas en la prueba 2.1 derivada en Inpho 5; a la izquierda, la zona con la estructura sencilla y, a la derecha, la zona con la estructura compleja.....	37
Figura 45: Resultado final de las ortofotos verdaderas en la prueba 2.2 derivada en Inpho 5; a la izquierda, la zona con la estructura sencilla y, a la derecha, la zona con la estructura compleja.....	38
Figura 46: Resultado final de la ortofoto verdadera en la prueba 2.3 derivada en Inpho 5. ....	39
Figura 47: Ventana principal de la realización de ortofotos.....	39
Figura 48: Parámetros de generación de la ortofoto verdadera con Inpho 9.1.....	40
Figura 49: Resultado final de la ortofoto verdadera en la prueba 3.1 derivada en Inpho 9. ....	41
Figura 50: Resultado final de la ortofoto verdadera en la prueba 3.2 derivada en Inpho 9. ....	41
Figura 51: Resultado final de la ortofoto verdadera en la prueba 3.3 derivada en Inpho 9. ....	42
Figura 52: Selección de las huellas de interés con Arcmap. ....	42
Figura 53: Resultado final de la ortofoto verdadera en la prueba 3.4 derivada en Inpho 9. ....	43

### **Índice de tablas**

Tabla 1: Aumento del costo debido a parámetros de vuelo optimizados (Wiedemann and Beckmann, 2016).....	11
Tabla 2 : Código de clasificación para la nube de puntos LiDAR (ASPRS, 2011). ....	17
Tabla 3: Tabla recapitulativa de los diferentes resultados.....	46



## 1. Introducción y objetivos del proyecto

Esta parte ofrece una visión general de los objetivos generales de este proyecto. La base y los objetivos del trabajo se presentan junto con una breve descripción de los contenidos de la tesis.

### 1.1 Motivación

Con los desarrollos actuales en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y procesamiento digital, la ortofotografía digital se ha convertido en una parte muy común de los conjuntos de datos espaciales. El grado de detalle y alta resolución de las imágenes está aumentando, lo que al mismo tiempo crea una demanda creciente de mayor calidad y precisión de las ortofotos.

Hoy en día, uno de los temas de más interés en el ámbito de la fotogrametría digital está enfocado hacia el desarrollo de metodologías, algoritmos y técnicas que permitan disponer de cartografía cada vez más precisa, rápida, económica y actualizada mediante una producción automática, ya que es una necesidad de la sociedad actual.

Es justamente esta característica la que lleva a efectuar este proyecto ya que desde hace algún tiempo la empresa Tracasa está investigando (entre otras cosas) la posibilidad de obtener cartografía de detalle y productos derivados mediante combinación de fotografía aérea con datos LiDAR (Light Detection And Ranging) en zonas urbanas.

La ortofoto tradicional tiene limitaciones que pueden causar problemas en su uso diario para distintas aplicaciones. La principal limitación, es que puede haber desplazamientos, principalmente en entornos urbanos, que resultan inconsistentes con la precisión y escala del producto, lo que se muestra especialmente cuando se combina con datos SIG vectorizados. Estas limitaciones pueden causar problemas para el usuario la naturaleza de este tipo de información, y la interpreta de forma incorrecta.

El creciente detalle de las ortofotos hace que estos desplazamientos sean cada vez más evidentes. Por lo tanto, la demanda de una alta precisión implica buscar procesos alternativos para superar las limitaciones mencionadas, entre los que se encuentra la generación de ortofotos verdaderas que se aborda en el presente trabajo.

### 1.2 Definición del problema

El propósito del siguiente trabajo fin de máster es evaluar la posibilidad de generación de una ortofoto verdadera de alto detalle, mediante la combinación de una serie de imágenes obtenidas con una cámara fotogramétrica digital y la aplicación de la tecnología LiDAR aerotransportado en una zona urbana del municipio de Pamplona donde existen edificios con una estructura compleja. Se tratará también de que el método de la creación de ortofoto verdadera sea lo más automático posible.

Este objetivo se aborda en dos fases:

- Estudio teórico sobre la tecnología LiDAR empleada que incluirá :
  - Revisar y estudiar el estado actual de la técnica.
  - Hacer un análisis comparativo de diferentes softwares comerciales de fotogrametría.
- Estudio experimental , donde se tratará de:
  - Refinar la clasificación de los puntos LiDAR manualmente.
  - Vectorizar de los edificios.



- Elaborar y ejecutar la metodología propuesta con parámetros relajados para la generación de la ortofoto verdadera de forma lo más automática posible.

### 1.3 Esquema y estructura

En el siguiente apartado, se expone la diferencia entre ortofoto tradicional y ortofoto verdadera y se cubre la teoría básica necesaria para generar ortofotos y un estudio teórico sobre la tecnología LiDAR empleada. Posteriormente se diseña la metodología a seguir para crear la ortofoto verdadera. Los pasos cruciales se detallan en la metodología y a continuación se implementan y evalúan independientemente en las siguientes secciones.

Otro objetivo del proyecto es el análisis comparativo de los principales softwares comerciales de fotogrametría. Lo que parte de la idea de que además de tomar en consideración las características de la planificación del vuelo fotogramétrico (como el recubrimiento longitudinal entre las imágenes y el recubrimiento transversal entre las pasadas y la precisión del modelo digital de superficie), la calidad de la ortofoto verdadera obtenida puede estar principalmente influenciada por el software utilizado. El análisis comparativo de los diferentes softwares se presenta en el anexo I.

## Estudio teórico

### 2. Ortofoto tradicional

Cuando se toma una fotografía, se muestra una imagen del mundo proyectada a través de un centro en el plano de la imagen. Como resultado de esto, la imagen representa una visión del mundo en perspectiva cónica (o central). Para una imagen aérea, que normalmente se toma verticalmente, los objetos que se colocan en el mismo punto pero a diferentes alturas se proyectarán en diferentes posiciones en la fotografía (Figura 1). Como efecto de estos desplazamientos del relieve, los objetos que se colocan en una posición alta (y más cerca de la cámara) también se verán relativamente más grandes en la fotografía.

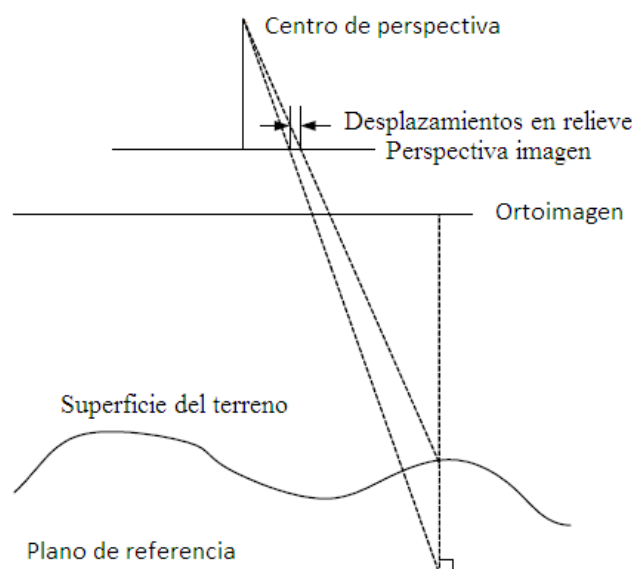


Figura 1: Perspectiva y geometría de la imagen ortográfica, ilustrando la causa del desplazamiento del relieve (Mikhail, 2001).

Según (Nagashree, 2016), las ortofotografías son imágenes fotográficas construidas a partir de fotografías aéreas verticales o casi verticales. El proceso de orto rectificación

trata de eliminar la perspectiva de la imagen. El resultado es una proyección ortogonal donde los rayos son paralelos en oposición a la proyección perspectiva donde todos los rayos pasan un centro perspectivo común (Figura 2).

Como resultado de la rectificación, la ortofoto será una imagen en la que se han eliminado los efectos del desplazamiento del relieve del terreno y la inclinación de la aeronave.

Cuando se genera correctamente, estas imágenes digitales tienen una precisión posicional constante predecible en toda la imagen, una escala consistente y puede usarse como un mapa planimétrico (Mikhail, 2001). Esto hace que sea útil como una herramienta eficaz para su uso en la gestión de recursos, planificación municipal, mapeo catastral y Sistemas de Información Geográfica (SIG). No solo es precisa en escala y área, sino que, como una fotografía aérea convencional, se interpreta fácilmente.

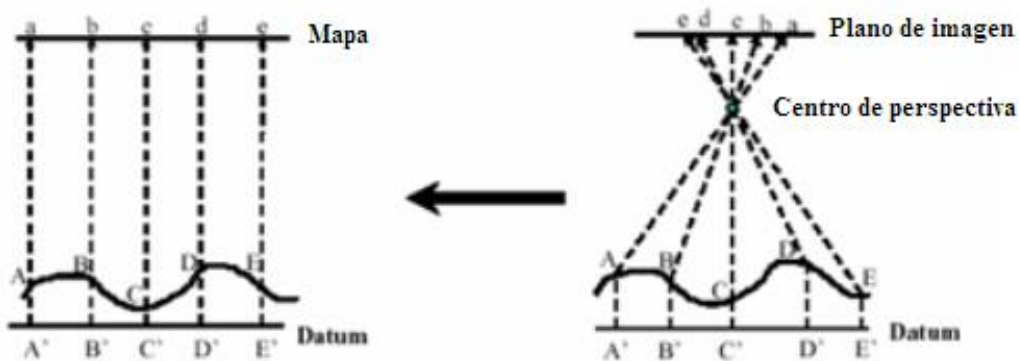


Figura 2: Proyecciones ortogonales versus perspectivas (Nagashree, 2016).

## 2.1 Creación de ortofotos

Una ortofoto es una imagen de una zona de la superficie terrestre, que se consigue mediante un conjunto de imágenes aéreas (tomadas desde un avión, un satélite o un dron). A diferencia de una imagen simple que presenta una proyección perspectiva, una ortofoto es una imagen georreferenciada y a escala del territorio correctamente orientada junto con el Modelo Digital del Terreno que permite llevar a cabo el proceso de ortorectificación. Por lo tanto, un paso previo antes de generar una ortofotografía es definir la superficie sobre la que proyectar la imagen rectificada para su posterior desarrollo al plano (Vozmediano Montoya, 2006).

## 2.2 Algoritmos de ortorectificación

Básicamente son los métodos que permiten transformar una imagen en perspectiva cónica a ortogonal. Generalmente hay dos clases de enfoques de rectificación. Los enfoques paramétrico y no paramétrico (Wiedemann, 2014). Mientras que para el enfoque paramétrico se requiere el conocimiento de los parámetros de orientación interior y exterior, los enfoques no paramétricos requieren solo de puntos de control. Los enfoques no paramétricos incluyen la transformación polinómica y la transformación proyectiva.

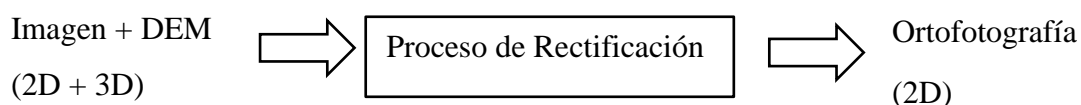


Figura 3: El esquema básico de ortorectificación. Fuente propia.

**Rectificación polinómica:** La forma más sencilla disponible en la mayoría de los sistemas de procesamiento de imágenes estándar es aplicar una función polinómica a la superficie y adaptar los polinomios a varios puntos de control (GCP). El procedimiento

solo puede eliminar el efecto de la inclinación, y puede aplicarse tanto en imágenes de satélite como en fotografías aéreas. Se puede elegir uno de varios órdenes polinomiales, en función de la precisión deseada y el número disponible de GCP. Además, (Novak, 1992) concluyó que aunque el algoritmo de rectificación polinómica es muy fácil de usar, no corrige adecuadamente el desplazamiento en relieve. (Wiedemann, 2014) observaron que parece muy peligroso usar transformaciones polinómicas de mayor grado para la rectificación de imágenes, y que la cantidad requerida de puntos de control y el riesgo de una oscilación aumentan con el grado del polinomio. Las ecuaciones de rectificación polinómica están dadas por las ecuaciones 1 y 2 a continuación:

$$f = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} x^i y^j \quad (1)$$

$$c = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} x^i y^j \quad (2)$$

Dónde:

- f, c son coordenadas de píxeles de la imagen de entrada (fila y columna);
- x, y son las coordenadas de la imagen de salida.
- a, b son los coeficientes del polinomio y n es el orden del polinomio.

**Rectificación proyectiva:** Para realizar una rectificación proyectiva, es necesaria una transformación geométrica entre el plano de la imagen y el plano de proyección. Para el cálculo de los ocho coeficientes desconocidos de la transformación proyectiva, se requieren al menos cuatro puntos de control en el plano del objeto. La transformación proyectiva es aplicable a la rectificación de fotografías aéreas de terreno plano o imágenes de fachadas de edificios, ya que no corrige el desplazamiento en relieve (Novak, 1992).

$$f = \frac{b_{11}x + b_{21}y + b_{31}}{b_{12}x + b_{22}y + 1} \quad (3)$$

$$c = \frac{b_{12}x + b_{22}y + b_{32}}{b_{13}x + b_{23}y + 1} \quad (4)$$

Dónde:

- f, c son coordenadas de píxeles de la imagen de entrada (fila y columna);
- x, y son las coordenadas de la imagen de salida.
- b11 y b23 son los coeficientes.

**Rectificación diferencial:** El objetivo de la rectificación diferencial es la asignación de números digitales DN de la imagen (generalmente imagen aérea) a cada celda dentro de la ortofoto. La rectificación diferencial es un procedimiento por fases que utiliza varios puntos de control para georreferenciar una imagen al suelo. (Novak, 1992) señaló que la rectificación diferencial corrige tanto el desplazamiento en relieve como las distorsiones

de la cámara, y que produce los mejores resultados y puede aplicarse tanto para imágenes aéreas como satelitales.

El procedimiento de rectificación diferencial se aplica en combinación con el método de reproyección (indirecta) de ortoimagen (ver sección 2.1.2 a continuación). Esto se basa en el conocido principio de colinealidad, que establece que el centro de proyección de una imagen de perspectiva central, un punto de un objeto y su imagen fotográfica se encuentran en una línea recta. El principio de colinealidad se describe mediante las ecuaciones (5) y (6) (Kraus, 2007).

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (5)$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (6)$$

Dónde:

- (x, y) son las coordenadas del objeto de punto en el espacio de la imagen.
- (x0, y0) son las coordenadas de imagen del punto principal calibrado (punto de simetría) de la cámara.
- c es la distancia focal calibrada de la cámara.
- (X0, Y0, Z0) son las coordenadas de la estación de la cámara
- w, j, k son los ángulos de rotación entre el sistema de coordenadas de la imagen y el sistema de coordenadas del suelo.
- rij son los elementos de la matriz de rotación entre la imagen y los sistemas de tierra.

El procedimiento de ortorectificación diferencial es el siguiente (Mayr y Heipke, 1988):

- Definir una cuadrícula uniforme sobre el plano de ortofoto (datum).
- Para cada elemento de la cuadrícula (X, Y) en el plano de ortofoto interpolar para la elevación correspondiente Z (X, Y).
- Usando los parámetros de orientación externa (EOP) y los parámetros de orientación interna (IOP) junto con las ecuaciones de colinealidad, encontrar el punto de imagen correspondiente (x, y).
- Encontrar el valor gris g (x, y) usando una de las técnicas de remuestreo.
- Repetir el procedimiento anterior para todos los píxeles en el plano de ortofoto.

### 2.3 Reproyección de ortorectificación

Los algoritmos de ortorectificación a menudo se realizan junto con el procedimiento de reproyección, donde los rayos de la imagen se re proyectan en un modelo del terreno. La reproyección fundamental se puede hacer de dos maneras:

- Proyección hacia adelante o proyección directa.
- Proyección hacia atrás o método indirecto.

En el primer caso de proyección hacia adelante, los píxeles de la imagen original se proyectan sobre el Modelo Digital de Elevación (DEM) y se calculan las coordenadas del espacio del objeto de los píxeles. Luego, los puntos del espacio del objeto se proyectan en la ortoimagen. Debido a la diferencia entre los puntos proyectados en la ortoimagen, por la desviación del terreno y los efectos de perspectiva, la proyección hacia adelante proyecta regularmente puntos espaciados en la imagen de origen en un conjunto de puntos espaciados irregularmente. Por lo tanto, deben interpolarse en una matriz regular de píxeles que se pueden almacenar en una imagen digital. Es por eso que a menudo se prefiere la proyección hacia atrás (Mikhail, 2001). Si la esquina de la ortoimagen se coloca en  $(X_0, Y_0)$ , la columna y fila de coordenadas de píxeles  $(f, r)$  en la ortoimagen se encuentra por (Mikhail, 2001).

$$\begin{bmatrix} \text{Columna} \\ \text{Fila} \end{bmatrix} = \frac{1}{GSD} \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y_0 - Y \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde GSD es la distancia en el suelo que separa los centros de dos píxeles adyacentes de una fotografía aérea tomada con disposición nadiral, también conocido como el tamaño de píxel. Se debe observar que la ecuación tiene en cuenta que el sistema de coordenadas de píxeles tiene el eje Y hacia abajo y el sistema de coordenadas mundial tiene el eje Y apuntando hacia arriba (i.e., norte).

En el caso de la proyección hacia atrás, se determinan las coordenadas del espacio del objeto X, Y relacionadas con cada píxel de la ortofoto final. La altura Z en un punto X, Y específico se calcula a partir del DEM y luego las coordenadas del espacio de objetos X, Y, Z se proyectan en la imagen original para adquirir el valor del número digital para el píxel de la ortoimagen. El proceso de interpolación o remuestreo en la imagen original también es esencial debido al hecho de que las coordenadas proyectadas no tienen por qué ajustarse con precisión a los centros de píxeles de la imagen original. En la proyección hacia atrás en lugar de interpolar en la ortoimagen, la interpolación se realiza en la imagen de origen. Esto es más fácil de implementar y la interpolación se puede hacer de inmediato para cada píxel de salida. Además, solo se re proyectan los píxeles que se necesitan en la ortoimagen. En el método de proyección hacia atrás, la transformación de píxel al terreno es dada nuevamente por (Mikhail, 2001) como:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} + GSD \cdot \begin{bmatrix} \text{columna} \\ - \text{fila} \end{bmatrix} \quad (8)$$

La posición en la misma imagen que corresponde al XYZ encontrado se puede obtener mediante ecuaciones de colinealidad aplicadas en el método de ortorectificación diferencial.

## 2.4 Generación del mosaico

Los grandes proyectos de ortofotografía requieren de la rectificación de varias imágenes, que luego se unen. Este proceso se conoce como mosaico. El mosaico de imágenes implica varios pasos:

- Generación de seamlines (líneas de unión).
- Color matching (ajuste de color).
- Feathering (suavizado de bordes).

Las líneas de unión (o costura) en un mosaico definen dónde se unen las imágenes vecinas. La generación de la línea de unión se puede hacer de forma automática o manual. El objetivo es hacer un mosaico de las imágenes a lo largo de lugares con apariencia muy similar. Por ejemplo, es preferible colocar una línea de costura manual a lo largo de las líneas centrales de las carreteras. Si las ortofotos se vuelven a proyectar en un modelo de elevación que no incluye los edificios, estos tendrán desplazamientos de relieve sin corregir, y colocar una línea de costura a través de un edificio creará una mala coincidencia (matching).

Las líneas de unión en un mosaico definen dónde se unen las imágenes. La generación de la línea de unión se puede hacer de forma automática o manual. El objetivo es hacer un mosaico de las imágenes a lo largo de lugares donde se ven muy similares. Es preferible colocar una línea de costura manual a lo largo de las líneas centrales de las carreteras. Si las ortofotos se vuelven a proyectar en un modelo de superficie que no incluye los edificios, estos tendrán desplazamientos de relieve sin corregir, y colocar una línea de costura a través de un edificio creará una mala coincidencia (matching).

Existen varios métodos para colocar las líneas de unión automáticamente. Un método es restar las imágenes y marcar las líneas a lo largo de una traza de menor costo, donde el costo es la diferencia entre las dos imágenes. Un enfoque más simple coloca las líneas de unión a lo largo del centro de la superposición.

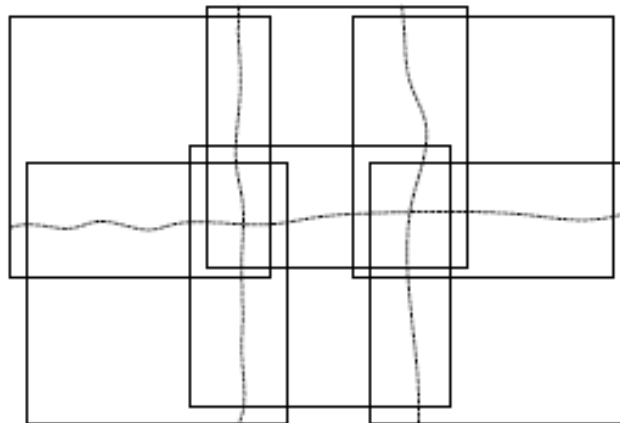


Figura 4: Ejemplo de colocación de línea de unión en seis ortofotos (Nielsen, 2004) .

Las imágenes en mosaico deben tener las mismas características de color cerca de las líneas de unión. Si el color o el brillo de las imágenes son muy diferentes, el resultado del mosaico será muy pobre y la ubicación de las líneas de costura será visible. Hay varios procedimientos que se pueden realizar para ocultar las líneas de unión. El color matching y las técnicas de Feathering intentan eliminar las diferencias radiométricas en las imágenes, analizando y comparando las secciones superpuestas. La técnica Feathering intenta ocultar la diferencia restante haciendo un corte suave que se desvanece lentamente de una imagen a otra.

### 3. Ortofoto verdadera

#### 3.1 Definición

Un problema general para la generación de ortofotos es que no se pueden manejar cambios rápidos en la elevación. Los desplazamientos en relieve pueden ser tan abruptos que oscurezcan el terreno y los objetos a su lado (Figura 5).

Por otro lado, una ortofoto tradicional se realiza sobre la base de un modelo del terreno MDT que no incluye los edificios, la vegetación, etc. Esto da como resultado una imagen en la que los edificios se inclinan lejos del centro de la imagen y no se corrigen, aunque todos los objetos que están al nivel del terreno se re proyectan correctamente. Las carreteras que corren sobre puentes parecerán que se "inclinan" para seguir el terreno debajo de él.

Una ortofoto verdadera re proyecta las imágenes de origen sobre un modelo de superficie MDS que incluye edificios, puentes y cualquier otro objeto que deba tenerse en cuenta. Cuando se incluyen los edificios, seguramente oscurecerán los objetos cercanos a ellos, ya que los muros de los edificios pueden considerarse como un cambio abrupto en la elevación.

Una aplicación de ortofoto no detecta estas áreas ocultas y, en cambio, crea "ghost images". Si un edificio en un DSM está ortorectificado, el edificio se rectificará a su posición original, pero también dejará una "copia" del edificio en el terreno.

La razón de esto es que durante la re proyección, los rayos se vuelven a proyectar de regreso al área oscurecida y al objeto oculto, sin detectar que los datos oscurecidos se están rectificando. Por lo tanto, los datos de imagen "incorrectos" se rectifican en las áreas ocultas.

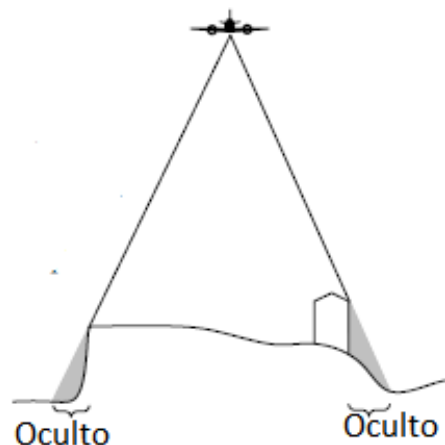


Figura 5: Los objetos altos y los cambios rápidos de elevación ocultarán los objetos detrás de ellos debido a los desplazamientos en relieve causados por la proyección en perspectiva (Nielsen, 2004).

En términos comunes, la ortofoto es "verdadera" cuando intenta restaurar cualquier objeto oculto, y al mismo tiempo incluye tantos objetos como sea posible en el modelo de superficie.

Una ortofoto verdadera debe estar basada en un modelo de superficie que incluya todo lo que sea visible en las imágenes de origen, pero sería una tarea incomprensible crear un modelo completo que incluya personas, automóviles, semáforos, etc. En general, cuando se habla de ortofotos verdaderas, se basan en modelos de superficie que solo incluyen terreno, estructuras y puentes.

Para restaurar las áreas oscuras, se necesitan imágenes de estos elementos desaparecidos. Estas imágenes suplementarias se pueden crear utilizando imágenes de la misma área tomadas desde diferentes ubicaciones (Figura 6). Esto dará como resultado

diferentes desplazamientos en relieve en cada imagen, y al combinar las imágenes se puede obtener una cobertura completa. En fotografía aérea es normal dejar que las imágenes se superpongan como se ilustra en la figura 7.

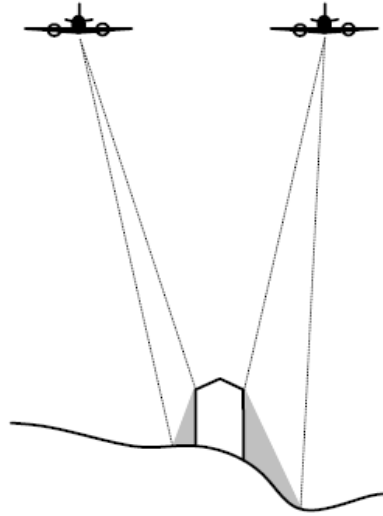


Figura 6: Combinando imágenes generales para obtener una cobertura total (Nielsen, 2004).

La tarea es localizar las áreas ocultas y llenarlas automáticamente con datos de otras imágenes donde las áreas son visibles. El número de líneas de unión para las ortofotos verdaderas es, por lo tanto, mucho mayor que el de una ortofoto ordinaria. Se deben generar líneas de unión alrededor de cada área oculta, y esto hace que el proceso de mosaico sea más exigente.

Las ortofotos verdaderas ofrecen un ajuste mucho mejor cuando se usan como fondo para un mapa digital. El contorno de un edificio coincidirá perfectamente con la verdadera ortofoto. Las ortofotos verdaderas también son útiles para cubrir un modelo de superficie complejo para su uso en visualizaciones 3D. Los tejados de la imagen coinciden perfectamente con el modelo de superficie. En las figuras 8 se ilustran ejemplos de algunas de las ventajas de las ortofotos verdaderas respecto a las ortofotos tradicionales.

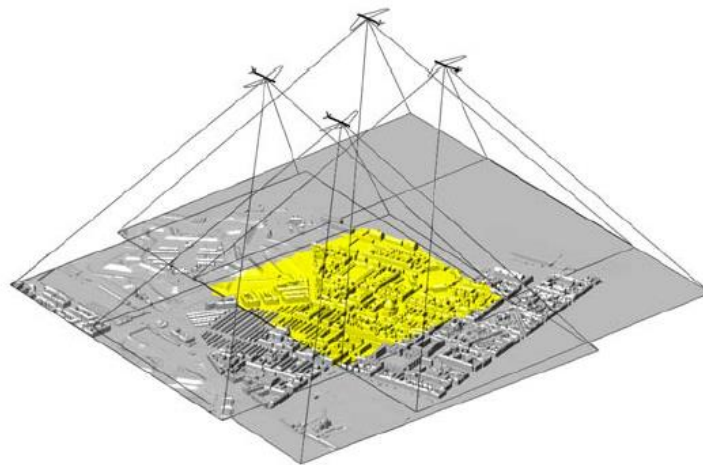


Figura 7: Fotografía aérea con 60% de superposición frontal y lateral. Las cuatro imágenes de arriba cubren la misma área amarilla, pero se ven desde diferentes puntos de vista (Nielsen, 2004).



Los edificios en el área amarilla tendrán desplazamientos en relieve en diferentes direcciones, por lo que el área oculta en una imagen probablemente sea visible en otra.

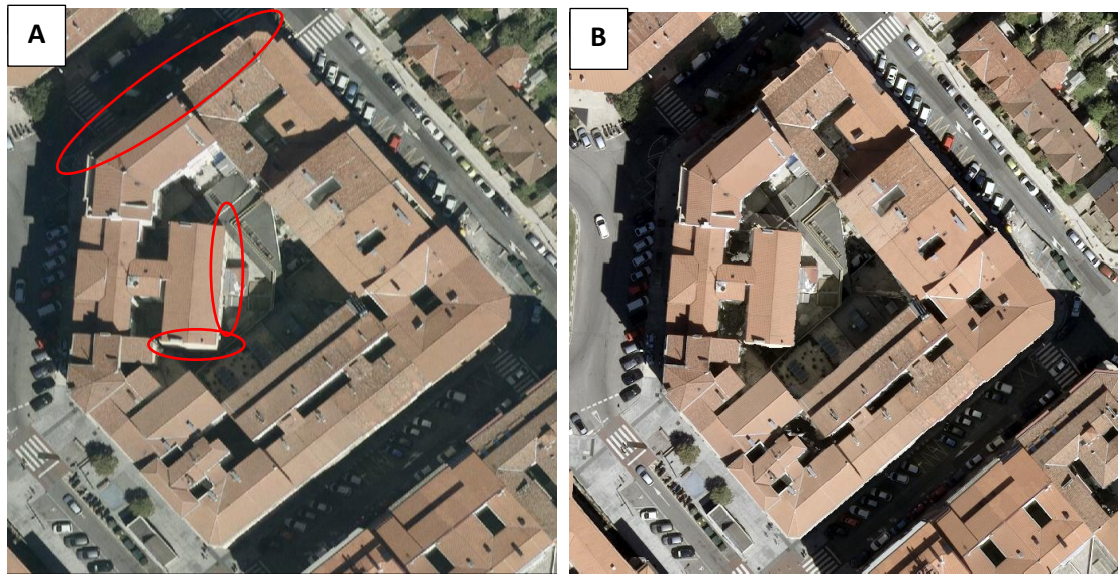


Figura 8: A) Una ortofoto ordinaria rectificada sobre un modelo de terreno. El edificio no se mueve a su posición correcta. B) Ortofoto verdadera donde el área oscurecida ha sido reemplazada por imágenes de otras imágenes. Fuente propia.

La ortofoto ordinaria encaja bien con objetos a nivel del terreno, pero no con objetos como los tejados que no se incluyeron en la rectificación. Con la ortofoto verdadera esto no es un problema (Figura 9).

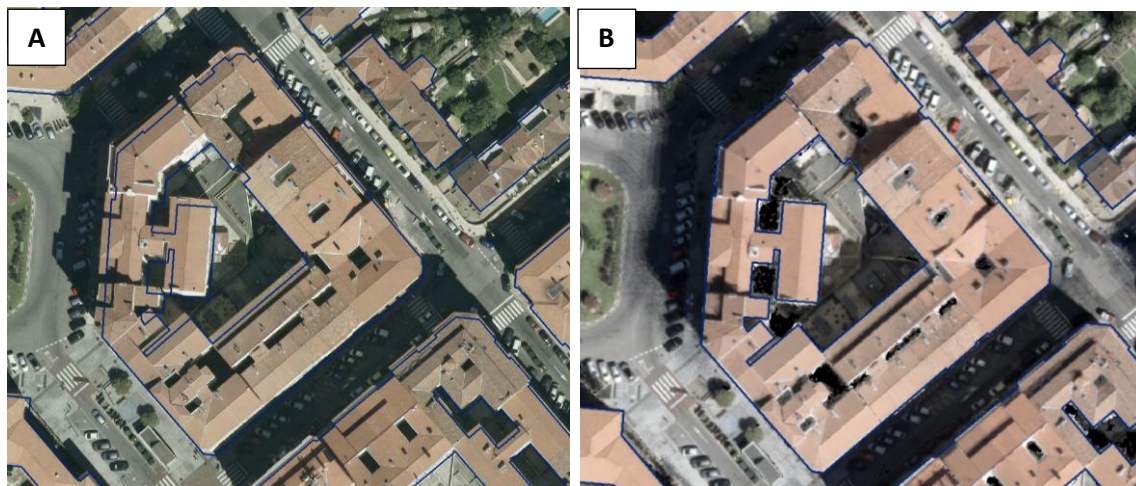


Figura 9: A) Combinación de la cartografía vectorial con una ortofoto tradicional B) Combinación de la cartografía vectorial con una ortofoto verdadera.

### 3.2 Precisión y calidad de la ortofoto verdadera

Ségun (Wiedemann and Beckmann, 2016) la calidad de una ortofoto se ve afectada por varios parámetros diferentes. Dado que las ortofotos verdaderas son un producto derivado de otros datos, dependen de la calidad de estos datos base.

- Parámetros de vuelo.
- Aspectos geométricos.

- Aspectos radiométricos.
- Problemas en el modelo digital de superficie MDS.

**Parámetros de vuelo:** Los parámetros de vuelo tienen una seria influencia en la calidad de los ortofotos verdaderas. Cuanto mayor sea la altura de vuelo y mayor sea la distancia focal, más pequeños son los ángulos entre los rayos y más similar es la perspectiva central a una proyección ortogonal. Cuanto mayor sea el solape longitudinal y transversal, menor será el área que se utilizará para el mosaico. Con un solape mayor, los errores geométricos resultantes se desvanecen, pero los costos de volar se incrementan (Tabla 1).

Tabla 1: Aumento del costo debido a parámetros de vuelo optimizados (Wiedemann and Beckmann, 2016).

	<b>Vuelo regular</b>	<b>Vuelo optimizado</b>
<b>Solape ( Longitudinal /Transversal )</b>	60% / 30%	80% / 60%
<b>Tiempo de vuelo</b>	100%	200%
<b>Imágenes</b>	100%	400%

**Aspectos geométricos:** La calidad geométrica de la ortofoto verdadera depende también de aspectos geométricos como la calidad de la orientación del sensor, la distancia del píxel desde el punto más bajo y finalmente la calidad del DSM. Debido a la calidad limitada de la representación de la superficie, algunos errores geométricos permanecen en la ortofoto verdadera. La tarea de la producción de la ortofoto es minimizar los errores restantes y ocultar su influencia geométrica. Para este propósito, la edición de la línea de unión (seamline) debe hacerse con cuidado.

**Aspectos radiométricos:** Las imágenes individuales deben ser de alta calidad. Los aspectos de calidad radiométrica relacionados con las imágenes individuales cubren el brillo y el contraste de las imágenes, la distribución de los valores de color en el histograma, el balance de color. Por lo tanto, la calidad del mosaico se centra en la homogeneidad del mosaico.

**Problemas en el modelo digital de superficie MDS:** El problema restante se basa en la representación insuficiente de la superficie por parte del DSM que se utilizará para las ortofotos verdaderas. Las estructuras abiertas irregulares como la Torre Eiffel están representadas matemáticamente por una superficie cerrada, como una toalla sobre la estructura. Esto podría estar bien en algunos casos, pero también pueden causar serios resultados irregulares (Figura 10).

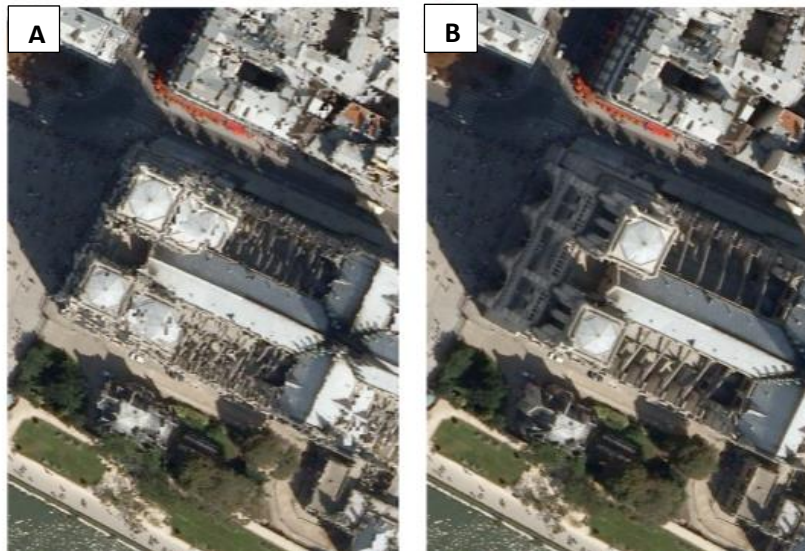


Figura 10: A) Ortofoto verdadera sobre una superficie irregular (iglesia gótica de techo con duplicaciones, etc.). B) Ortofoto tradicional correspondiente (Wiedemann and Beckmann, 2016).

## 4. El Sistema LiDAR

### 4.1 Definición

LiDAR (Light detection and ranging) es una técnica de teledetección óptica que utiliza pulsos de luz para determinar la distancia desde un emisor laser a un objeto o superficie produciendo mediciones exactas de X, Y, Z. La distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retardo entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada.

El LiDAR se está consolidando como una alternativa más rentable a las técnicas de levantamiento topográfico tradicionales como puede ser la fotogrametría. En el LiDAR se producen datasets de nubes de puntos masivos que se pueden administrar, visualizar y compartir mediante diferentes programas SIG. Para realizar este escaneado se combinan dos movimientos. Uno longitudinal dado por la trayectoria del avión y otro transversal mediante un espejo móvil que desvía el haz de luz láser emitido por el escáner (Soria and Gómez, 2014).

Para obtener las coordenadas de la nube de puntos se necesita conocer la posición del sensor y el ángulo del espejo en cada momento. Para ello el sistema cuenta con un GPS diferencial y un sensor inercial de navegación (INS). Conocidos estos datos y la distancia sensor-terreno obtenida con el láser-escáner obtenemos las coordenadas buscadas. El resultado es de decenas de miles de puntos por segundo (Barazzetti et al., 2007).





Figura 11: Nube de puntos LiDAR de la zona de estudio. Fuente propia.

#### 4.2 Tipos de sistemas LiDAR

Hay dos tipos básicos de sistemas LiDAR que se pueden clasificar en aerotransportados y terrestres. Con el LiDAR aerotransportado (ALS,- Airborne Laser Scanner), el sistema se monta en un helicóptero o en un avión. Los sensores aerotransportados a su vez se pueden clasificar en dos subtipos: LiDAR topográfico que se utiliza para adquirir modelos de superficie y en aplicaciones como silvicultura, hidrología, geomorfología, planificación urbana, etc., y LiDAR batimétrico que penetra en el agua y recopila simultáneamente la profundidad del agua y la elevación, lo que suministra un relevamiento topográfico de la interfaz tierra-agua. La información batimétrica es muy relevante sobre todo cerca de las líneas costeras, en puertos y cerca de playas y riberas. La información batimétrica también se utiliza para colocar objetos en el suelo oceánico (ArcGIS ,2016).

Con respecto al LiDAR terrestre también puede dividirse en dos subtipos como son el fijo o estático y el portátil. En el caso de la adquisición móvil, el sistema LiDAR se monta en una plataforma en movimiento (e.g., vehículos, trenes e incluso barcos). En el caso de la adquisición fija, el sistema LiDAR habitualmente se monta en un trípode o dispositivo estacionario que suele ser totalmente móvil (ArcGIS ,2016).

El LiDAR terrestre recopila una alta densidad de puntos y con una gran precisión, lo que permite la identificación precisa de los objetos. “Estas nubes de puntos densas se pueden utilizar para administrar instalaciones, realizar relevamientos topográficos de carreteras y vías férreas, e incluso crear modelos de ciudades en 3D para espacios en el exterior y en el interior, por mencionar algunos ejemplos” (ArcGIS ,2016).

Para el proceso de creación de la nube de puntos llevado a cabo en este trabajo se utiliza un sistema de escáner laser aerotransportado, que incluye una interfaz de navegación para piloto y operador, cámaras fotográficas, un sistema de navegación inercial (INS-Interial Navigation System) compuesto por una unidad de medición inercial (IMU-Interial Measurement Unit ) y un receptor GPS (Global Positioning System) (Gomez et al., 2004) .

#### 4.2 Toma de datos LiDAR

El proceso de escaneo (Figura 12) comienza a partir de la emisión de rayos láser desde un sensor óptico activo hacia la superficie terrestre mientras se traslada por una ruta predefinida. Tras lograr esta superficie, el pulso de energía original es reflejado en

dirección al sensor aéreo registrándose el tiempo que tarda en realizar la trayectoria. A partir de esta información es posible deducir la distancia exacta entre el sensor y el objetivo (Jordán Francés, 2015). Combinando estos datos con los obtenidos en los tres subsistemas ALS, IMU y GPS, conociendo las coordenadas de la antena GPS y la posición del ALS respecto a esta antena se obtienen las coordenadas tridimensionales de los puntos donde se producen las reflexiones del haz de energía en la superficie terrestre ya sea el suelo o los objetos que estén sobre él como edificios, vegetación, puentes y otros



Figura 12: Generación de los puntos LiDAR sobre una zona determinada (Northern Advocate, 2017).

Los puntos laser emitidos a partir de un sistema LiDAR se reflejan desde los objetos sobre y por encima de la superficie del suelo como puede ser vegetación, edificios, etc. Un pulso laser emitido puede registrarse en el sensor LiDAR como uno o múltiples retornos (Figura 13). En el caso de la vegetación, cada pulso láser emitido puede tener diversos retornos.

“El primer pulso láser se asociará con el primer objeto encontrado como una copa de árbol o la parte superior de un edificio. El primer retorno también puede representar el suelo, en cuyo caso el sistema LiDAR solo detectará un regreso. Los retornos intermedios, en general, se utilizan para la estructura de la vegetación y el último retorno para el cálculo de los DTM. El último retorno no siempre pertenecerá al suelo ya que por ejemplo puede darse el caso en donde un pulso golpee una rama gruesa en su camino hacia el suelo y el pulso no llegue en realidad al suelo. En esta caso, la última devolución no es desde el suelo sino desde la rama que reflejó el pulso laser completo” (Mozo and Alconada, 2014, GeoHub, 2017).

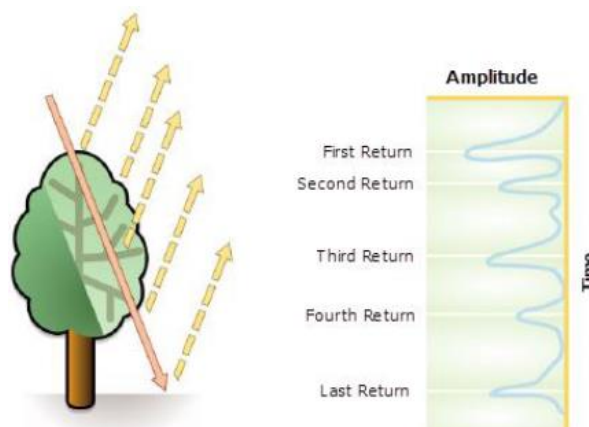


Figura 13: Retornos de un impulso laser sobre un árbol (GeoHub, 2017).

### **4.3 Ventajas de la fusión de datos LiDAR con las imágenes aéreas**

Varios investigadores (Rottensteiner et al., 2005 ,Rottensteiner et al., 2003, Kwak et al., 2012) han recomendado la integración de imágenes aéreas y LiDAR, ya que explota al máximo los beneficios de las características complementarias de ambos conjuntos de datos. Las imágenes aéreas integradas y los datos LiDAR se han utilizado para la extracción automatizada de edificios, el modelado de edificios en 3D y la clasificación de escenas urbanas con la motivación de mejorar los resultados, aumentar el grado de automatización y mejorar la solidez de las prácticas propuestas. Por lo tanto, la integración precisa y fiable de imágenes aéreas y datos LiDAR es un requisito importante en varias aplicaciones de cartografía urbana.

Con los sistemas LiDAR se pueden adquirir nubes de puntos fiables y precisas en un alto grado de automatización. Mientras que la nube de puntos densa basada en imágenes (correlación entre las imágenes del vuelo fotogramétrico) obtiene una alta densidad de puntos e información espectral, los datos de puntos 3D recopilados por la tecnología LiDAR muestran una mejor calidad en términos de oclusiones y valores atípicos (Gharibi and Habib, 2018).

Aunque las nubes de puntos LiDAR de alta densidad poseen una alta precisión geométrica, carecen de la información espectral necesaria para describir completamente las superficies 3D. Por lo tanto, no se puede proporcionar una descripción completa de las superficies en 3D que es esencial para aplicaciones como la detección de objetos urbanos utilizando únicamente datos de puntos LiDAR (Gharibi and Habib, 2018).

También, existen diversos artículos, uno de éstos publicados por (Julián and Pérez, 2005) con el tema “Ortofoto verdadera (True -Orto)” y Lidar el posible futuro de la cartografía catastral urbana”, en donde se realiza estudios el salto de la generación de ortofotos digitales tradicionales a ortofotos verdaderas y la importancia del uso de la tecnología LiDAR para la generación de estas últimas.

## **Estudio experimental**

### **5. Localización de la zona de estudio**

El área en la cual se va a centrar este trabajo pertenece a la ciudad de Pamplona, capital de la Comunidad Foral de Navarra, España, y posee una extensión total de 1,005 km<sup>2</sup> que se extiende desde el barrio Segundo Ensanche, al Norte hasta el barrio Milagrosa al Sur. Su altitud media es de 400 metros .La zona está limitada al norte por el barrio la Chantrea, al sur por el barrio Milagrosa, al este por el municipio Valle de Egüés; y al oeste por el Primer Ensanche.

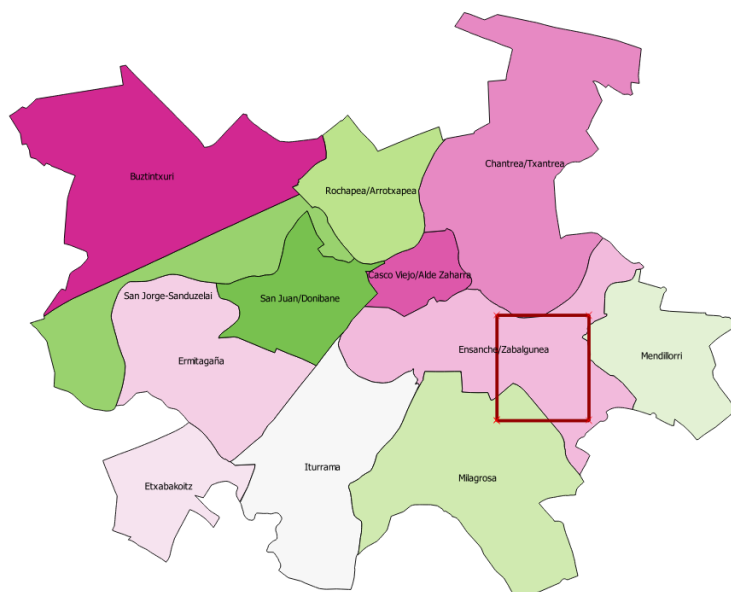


Figura 14 : Localización del área de estudio. Fuente propia

La elección de esta zona no ha sido al azar sino por su complejidad de la estructura de los edificios y donde el uso de ortofotos ordinarias no ha dado buenos resultados debido al desplazamiento de los edificios y a la presencia de ocultaciones. Eso puede suponer un problema porque pueden enmascarar partes de la imagen y llevar a interpretaciones equivocadas.

## 6. Material y datos

En cuanto a los datos usados para el presente estudio, se utilizó:

- LiDAR aerotransportado: los datos del vuelo LiDAR realizado por la empresa Tracasa en 2017, durante el proyecto de mapeo de la segunda captura de datos LIDAR en la Comunidad Foral de Navarra, con el sensor Single Photon LiDAR (SPL100), con una densidad de 14 puntos/m<sup>2</sup> y con clasificación automática.
- Imágenes aéreas obtenidas a partir de dos vuelos fotogramétricos: El primero de 5 cm con un solape del 60/80 y el segundo de 8 cm de GSD con un solape del 80/80, capturados mediante la cámara DMC III de Leica en el año 2018 realizados por el instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña.
- Cartografía vectorial: Obtenida a partir de la restitución fotogramétrica que realizará la empresa Tracasa con la ayuda de la estación de fotogramétrica Digi21.net. La restitución es el proceso de extracción de la información métrica del modelo estereoscópico con ayuda de un restituidor según el principio de marca flotante aquél dos marcas, que se sitúan sobre dos puntos homólogos, una vez realizadas correctamente todas las orientaciones, se han de fundir en una sola imagen (una sola marca). Además, se cumple que dicha marca estará a la altitud del punto sobre el que está “posada” (Quirós, 2014).
- Softwares: TerraScan, MetaShape, Inpho 5, Inpho 9, Global Mapper y Arcmap.

## 7. Metodología

La metodología que seguiremos en este proyecto tendrá como esquema:

- Clasificación de los puntos LiDAR y vectorización de los edificios a partir de estos puntos.
- Una vez que la empresa del vuelo fotogramétrico toma los datos, nos serán enviados las fotografías y podremos realizar el proceso fotogramétrico habitual:
  - Orientación Interna
  - Orientación Externa / Aerotriangulación
  - Obtención de MDT
  - Obtención de Ortofotos verdaderas
- Realizaremos una comparación de los resultados obtenidos con y sin la combinación de los datos LiDAR y las imágenes aéreas, así como una comparación entre varios softwares comerciales de fotogrametría.

### 7.1 Clasificación de los puntos LiDAR

Un paso indispensable para poder vectorizar los edificios correctamente es la clasificación de los puntos LiDAR.

**Clasificación automática de los puntos LiDAR:** Los datos LiDAR utilizados en este trabajo se descargaron en formato LAS 1.4, la versión más avanzada del formato LAS, que incorpora la clasificación de puntos adicional y la información cuyas especificaciones han sido predefinidos por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS). LAS es un formato público con información acerca de una nube de puntos tridimensional. Cada punto LiDAR puede tener una clasificación asignada que aporta información sobre el tipo de objeto sobre el que se reflejó el pulso láser. Los puntos LiDAR se pueden clasificar en varias categorías que incluyen suelo o terreno desnudo, cubierta vegetal o agua. Las diversas clases se definen mediante códigos numéricos de enteros en un archivo LAS.

El procesamiento y la clasificación de la nube de puntos obtenida del vuelo LiDAR fueron realizados mediante algoritmos de Inteligencia Artificial por la empresa Tracasa basándose en las especificaciones expuestas por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Percepción Remota/Teledetección (ASPRS) que se recogen a continuación.

Tabla 2 : Código de clasificación para la nube de puntos LiDAR (ASPRS, 2011).

Código LAS	Descriptor
0	Nunca clasificado
1	No asignado
2	Suelo
3	Vegetación baja
4	Vegetación media
5	Vegetación alta
6	Edificios

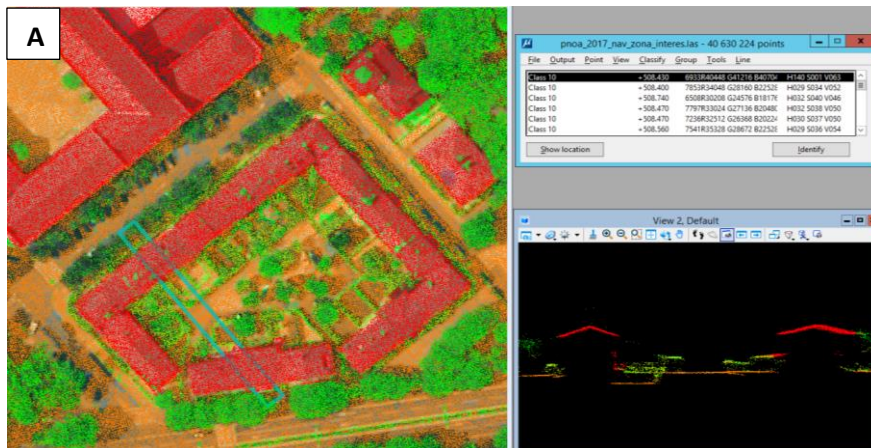


7	Ruido
8	Clave del modelo
9	Agua
10	Reservado
11	Reservado
12	Superponer

**Revisión y edición de la clasificación automática:** La figura 15 A muestra que el algoritmo de clasificación ha clasificado en general las nubes de puntos de forma adecuada, pero para a posteriori reconstruir los edificios y generar la ortofoto verdadera, se pide una precisión aún mayor. Este proceso requiere clasificar bien los puntos del suelo, los tejados y las fachadas de los edificios y filtrar todos los objetos que se han clasificado automáticamente como edificios o suelo, es decir, se necesita una clasificación especialmente precisa de los edificios y el suelo.

La clasificación automática es revisada con el fin de refinarla para asegurar que sea correcta. Esta revisión se hace mediante el control directo de la nube de puntos usando vistas en planta, perspectiva y perfiles de la misma e información gráfica adicional combinando una ortofoto tradicional de la zona de estudio de la provincia de Navarra del año 2017 disponible de forma local con los datos LiDAR con la ayuda del módulo TerraScan disponible en el programa TerraSolid. De esta forma se puede identificar si los puntos seleccionados como terreno, edificios, vegetación, etc. corresponden realmente con los tipos que tienen asociados después la clasificación automática.

El refinamiento de la clasificación automática de forma manual es un trabajo tedioso y cuesta mucho tiempo sobre todo cuando la nube de puntos LiDAR es muy densa. La figura 15 B muestra el resultado final de la clasificación refinada.



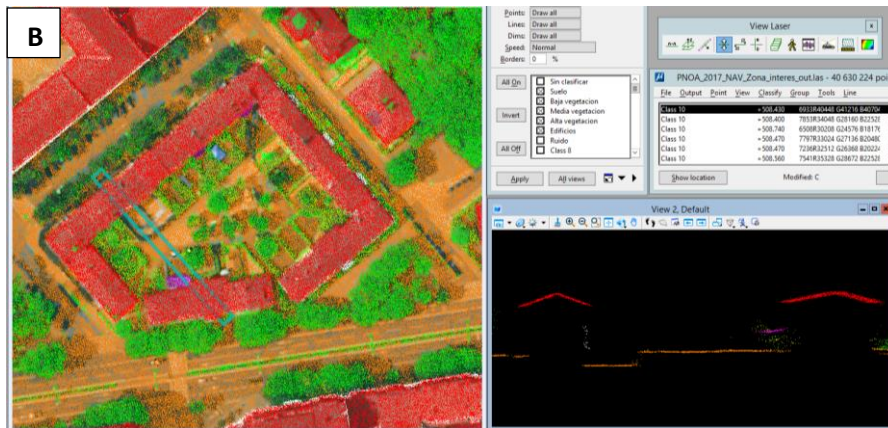


Figura 15: Ejemplo de clasificación, arriba (A) puntos LiDAR antes de la clasificación manual, abajo (B) puntos LiDAR tras la clasificación. (Rojo: tejado, blanco: fachadas, marrón: suelo y, verde: vegetación, violeta: porche).

## 7.2 Vectorización de los edificios

En este punto se trata de hacer pruebas en zonas pequeñas para crear de forma automática los vectores de los edificios para sus usos posteriores en la generación de la ortofoto verdadera a partir de la forma, dimensiones y ángulos de los datos LiDAR. Éste proceso se basa en la detección de tejados y para verificación se apoya en ortofotografía del mismo sector. Los parámetros que conforma el algoritmo interno del TerraScan consisten en especificar el ancho del tejado y el alto de la pared, ángulo de inclinación del tejado, tamaño de la edificación, ajuste de bordes utilizando imágenes activas (Figura 16).

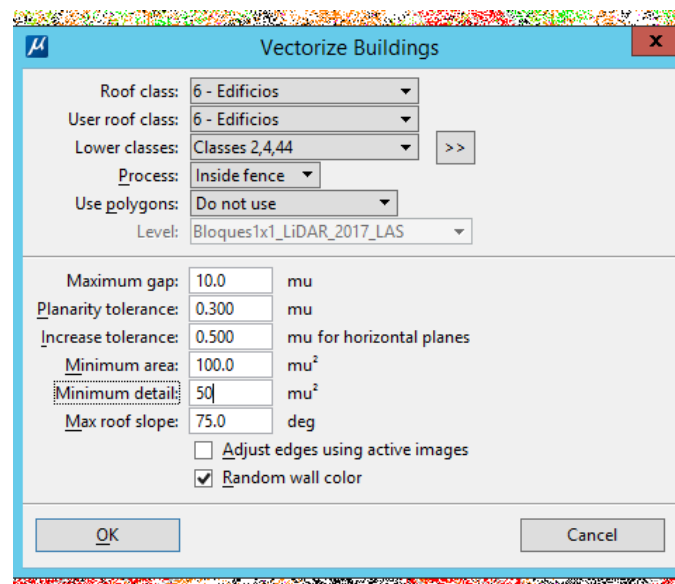


Figura 16: Parámetros elegidos para la vectorización automática de los edificios.

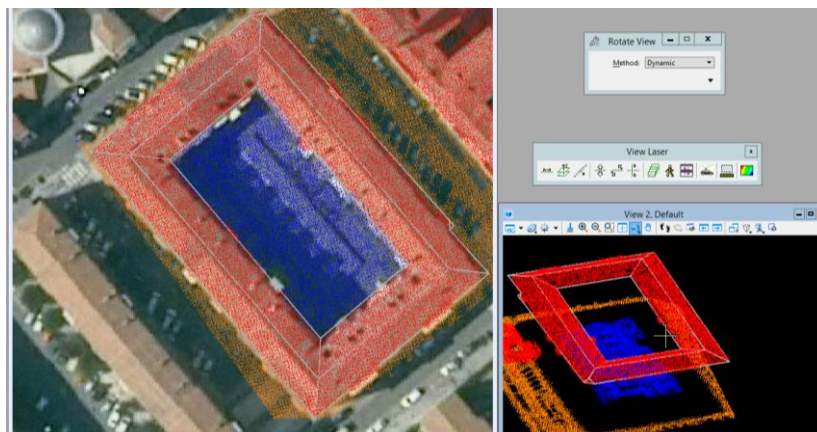


Figura 17: Ejemplo de vectorización de los edificios tras la clasificación de los puntos LiDAR (rojo: tejado, marrón: suelo, azul: patio).

Es necesario destacar que sobre el área de estudio se sitúan unos 40.630.224 puntos con una densidad de 14 puntos/m<sup>2</sup>, aparte de esta cantidad enorme de puntos y la complejidad de la estructura de las manzanas, se observa que la clasificación automática da lugar a numerosos puntos mal clasificados; los puntos de una clase están mezclados con otra sobre todo en zonas donde hay alta vegetación, puntos que están asignados a una clase a la que no pertenecen realmente, puntos dispersos que es difícil saber a qué clase pertenecen en realidad (Figura 15 A), etc.

A pesar de eso, tras muchas horas de esfuerzo revisando y asignando cada punto a la clase correspondiente se ha logrado a clasificar de forma manual, utilizando las herramientas disponibles en el módulo TerraScan del software TerraSolid, la nube de puntos LiDAR.

A pesar que la clasificación refinada es precisa, a veces el proceso automático de vectorización no da los resultados esperados sobre todo para los edificios que presentan una estructura compleja de tejados (Figura 19), En estos casos se recurre a la edición manual de los vértices, lo que no es una tarea sencilla ya que la edición de los vectores en 3D y recoger bien la información sobre la altura (valores **Z**) resultan complejas y necesitan mucho tiempo.

Para cada edificio se eligen los parámetros adecuados y se hace una revisión manual de los vértices, por tanto la generalización de esta metodología a áreas más extensas (como por ejemplo toda la ciudad de Pamplona) resulta impensable.

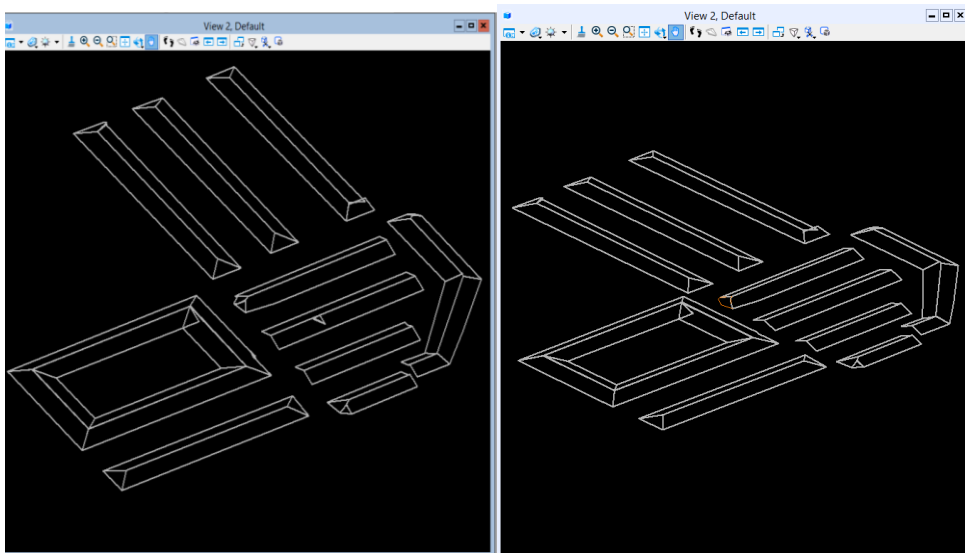


Figura 18: Resultado de vectorización de los edificios antes (izquierda) y después de la edición manual (derecha). Fuente propia.

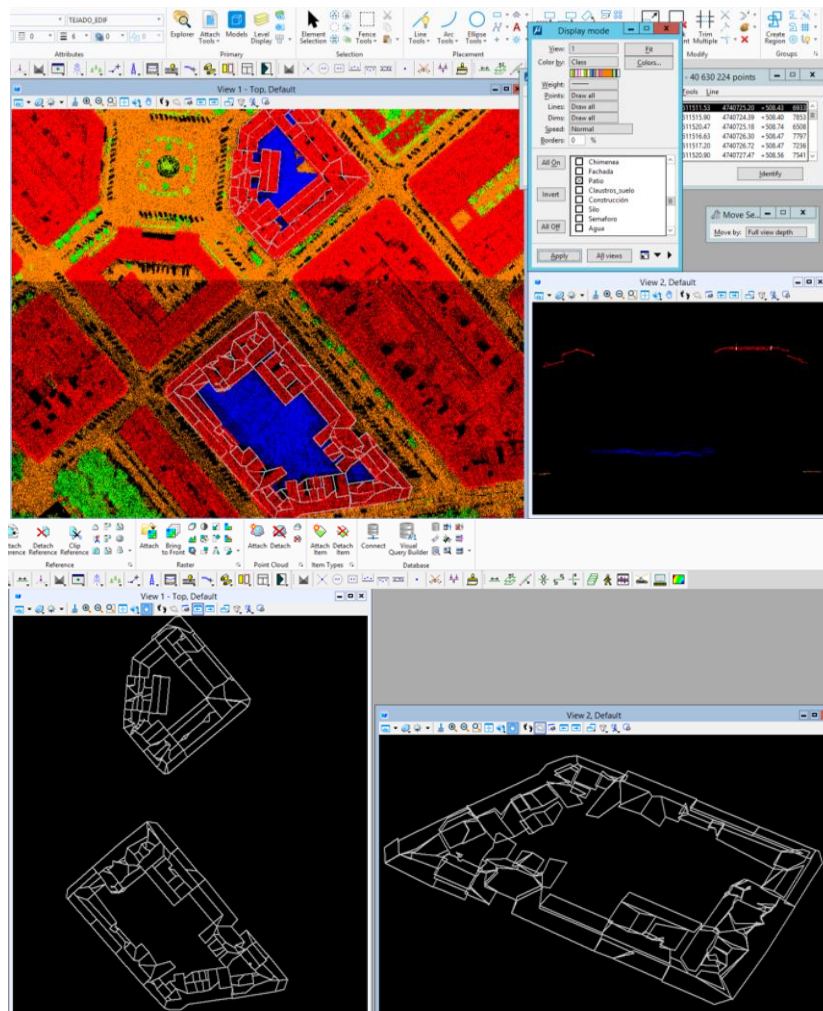


Figura 19 : Vectores correspondientes a la zona que presenta la estructura compleja.

### 7.3 Generación de la ortofoto verdadera

El procesamiento y la creación de la ortofoto verdadera se hace mediante tres softwares de fotogrametría: MetaShape que es la versión más reciente de Agisoft



PhotoScan, la versión 5 y la versión 9 de Inpho. El objetivo de este punto es realizar un estudio comparativo basado en el análisis de la exactitud y la precisión del MDS resultante de cada fuente de datos (imágenes áreas, puntos LiDAR y los vectores de los edificios) y de cada software, y la importancia de este último sobre el detalle la ortofoto verdadera obtenida.

### 7.3.1 Procesado de datos con MetaShape

**Definición del proyecto con MetaShape:** Una vez que tenemos las fotografías tomadas con el avión, lo que hemos de hacer, es procesarlas para obtener los MDS y las ortofotos verdaderas, realizando antes las orientaciones pertinentes. El procesado de las fotografías se hizo en dos bloques diferentes: con los datos LiDAR y sin los datos LiDAR. La finalidad de hacerlo de estas dos maneras es ver si los resultados de la ortofoto verdadera mejoraban con la importación de la nube de puntos LiDAR. A pesar de que se hagan los procesos con y sin datos LiDAR, explicaremos el proceso una única vez, ya que el procedimiento es idéntico, y lo único que varía son los resultados, por lo que más adelante habrá un apartado de comparación de resultados. La edición y el procesado de las fotografías, la realizaremos con Metashape que es el software de Agisoft LLC para fotogrametría, y que implementa muchas opciones para el procesamiento de las imágenes digitales y para obtener MDS y ortofotos verederas.

Para llevar a cabo este objetivo se necesita una seria de datos de partida dados por:

- Las imágenes de vuelo en formato JPG sin orientación.
- Certificado de calibración de la camera / especificaciones del sensor empleado.
- Fotocentros de cada imagen (XYZ) en el sistema de referencia ETRS89 proyección UTM 30N.
- Puntos de apoyo de la zona de estudio y reseñas.
- Un DEM y una ortofoto de la zona de estudio utilizable en caso que queremos añadir otros puntos de apoyo.

El primer paso consiste a incorporar las 15 imágenes aéreas en formato JPG de una zona del municipio de Pamplona mediante la herramienta **Add photos**. Una vez cargadas las fotografías, se muestran en la parte inferior de la ventana en el marco denominado 'Photos' (Figura 20).

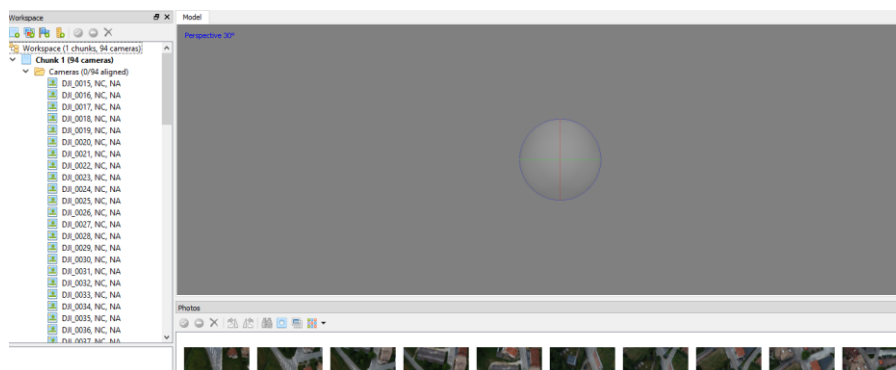


Figura 20: Carga de las fotografías en MetaShape.

En la parte izquierda de la ventana vemos que hay indicadores que aparecen junto al nombre de la foto son: NC (no calibrada), que notifica que los datos JPG disponibles no son suficientes para estimar la distancia focal de la cámara, y NA (no alineada), que

notifica que los parámetros de orientación de la cámara externa no se estimaron para la foto actual todavía.

Una vez cargados los fotogramas viene la orientación directa de los fotogramas o lo que es lo mismo georreferenciación directa consiste a importar la posición de los fotocentros (X, Y, Z) en el Sistema de Referencia ETRS89/UTM Zone 30N /EPSG: 25830) mediante la herramienta **Import CSV**, calculada a partir del procesado GNSS de la trayectoria seguida por el avión durante la ejecución de la misión cuyo fin conocer cómo se han capturadas las imágenes para saber su precisión.

Tras de la orientación directa el Agisoft MetaShape permite de ubicar cada una las imágenes en sus tres posiciones espaciales en el espacio Objeto (X, Y, Z).

Después de orientación directa se hace la orientación interna de las imágenes digitales que viene dada por la introducción de un conjunto de parámetros del sensor que nos permiten la transformación de coordenadas digitales a coordenadas imagen mediante la herramienta **Camera calibration**. Dichos parámetros son principalmente deducidos del certificado de calibración de la cámara que incluye la información de la distancia focal y tamaño del pixel (micras).

En nuestro caso la distancia focal  $f$  es de 92 mm y el tamaño de píxel en direcciones X e Y es dado por  $sX = 3.9 \mu\text{m}$  y  $sY = 3.9 \mu\text{m}$  (Píxeles cuadrados).

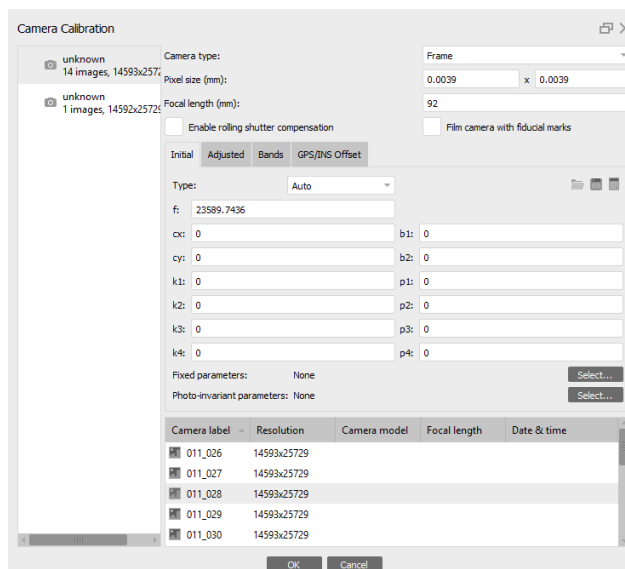


Figura 21: Resultado de la calibración de la cámara.

Así pues, tras la introducción de los parámetros de la cámara, MetaShape realiza la calibración de manera automática para obtener los parámetros de la orientación interna proporcionando los siguientes resultados:

- $F_x, F_y$ : La longitud focal en dimensiones X e Y medidas en píxeles.

Dónde:

- $F_x = f / s_x$  y  $F_y = f / s_y$
- $F_x = F_y = 92 / 0.0039 = 23589.7436$

**Orientación externa: Medida de Aerotriangulación:**

Orientación relativa:

En este paso, Agisoft MetaShape, realiza una alineación de las imágenes con el fin de buscar puntos coincidentes en el espacio de solapamiento de las imágenes (puntos homólogos). Se utiliza una opción automática de identificación de puntos homólogos por pares de imágenes mediante la herramienta **Align Photos**.

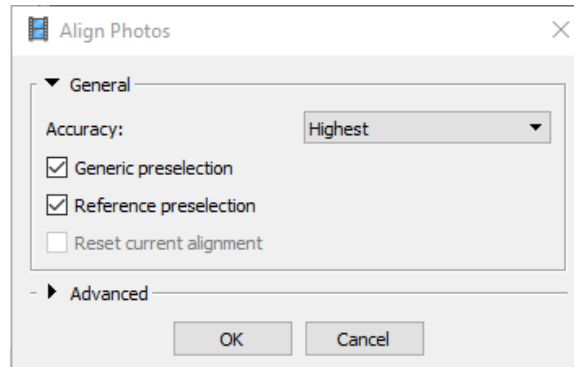


Figura 22 : Cuadro de diálogo. Alinear Fotos.

Visto que tenemos un número de imágenes bajo (< 200) se ha elegido un nivel de precisión alto.

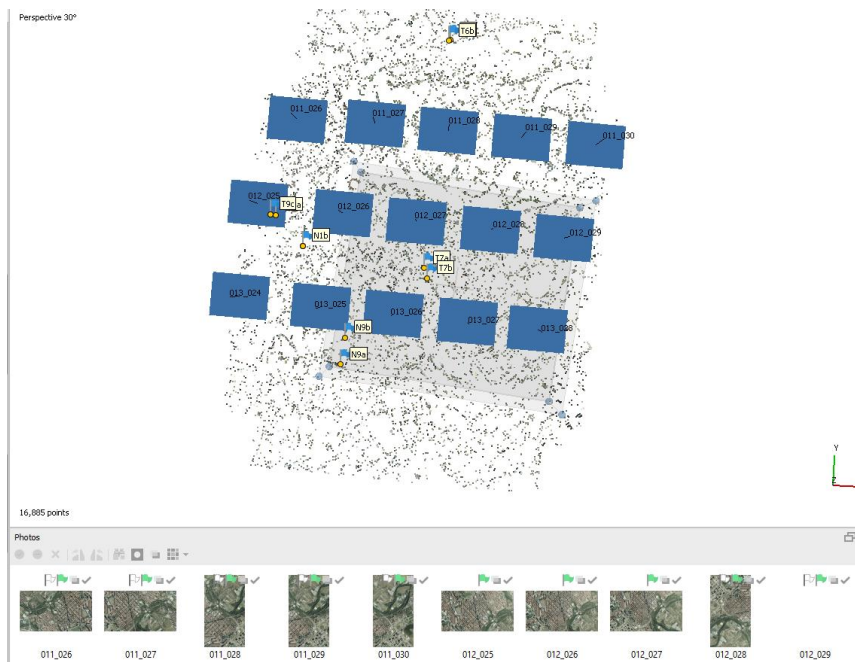


Figura 23: Resultado de la orientación de las imágenes con la nube de puntos de paso empleada.

El resultado de la orientación relativa es una nube de puntos homólogos o tie points formada por 16885 puntos, que comenzará a reconstruir nuestro modelo estereoscópico (en el espacio). Pese a no representar una malla ráster continua, mostrará la nube de puntos mediante valores RGB pudiendo apreciar con cierta nitidez la zona territorial. Tras la realización de este proceso tenemos las coordenadas en el espacio modelo ( $X_m$ ,  $Y_m$ ,  $Z_m$ ).

#### Orientación absoluta:

Procedimiento mediante el cual se trata de nivelar, dar escala y ubicación planimétrica al modelo obtenido en la orientación relativa, es decir, darle las coordenadas del terreno. Por eso se necesita medir al menos 3 puntos de apoyo en todo el bloque en

coordenadas terreno (ground control points, GCP en inglés) en zonas de solape mediante un GPS. También se puede medir los puntos a partir de una ortofoto y un DEM.

En nuestro caso se cargan los puntos de un fichero txt con GCPs. Seguidamente se marcan los puntos de control en cada imagen que aparezcan (Figura 24).

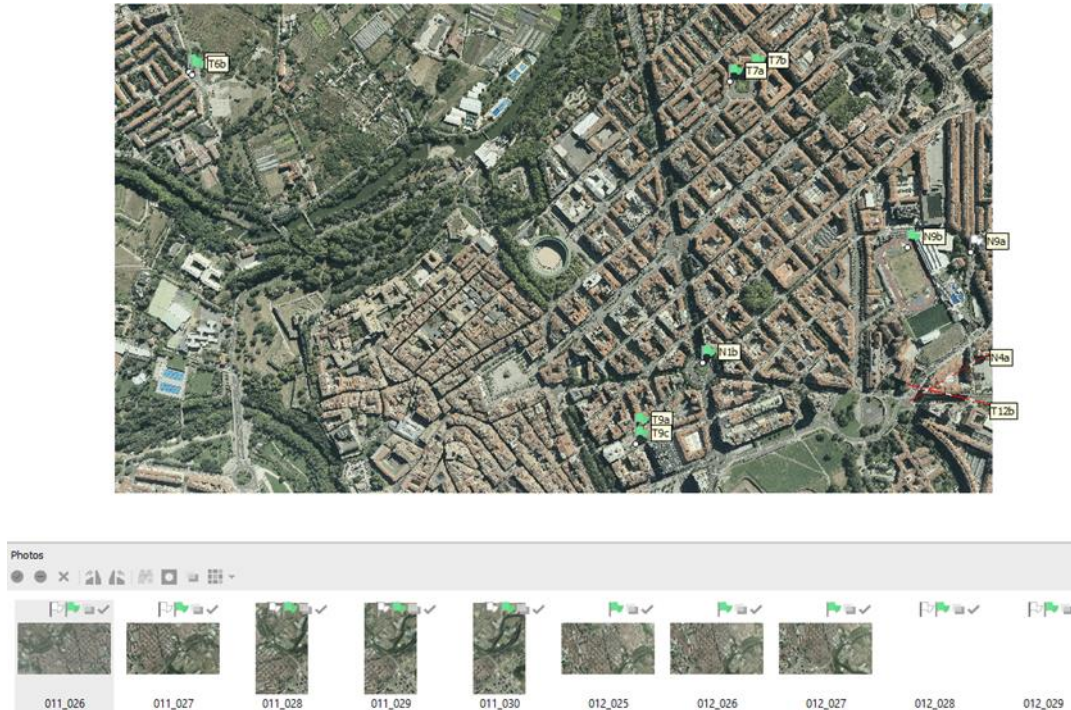


Figura 24: Distribución de puntos de apoyo medidos en una imagen.

Entre todos puntos cargados se ha realizado una selección de solo 8 puntos porque algunos de ellos incrementaban el error de ajuste. Esto puede explicarse al hecho de que el programa no ha sido capaz de encontrar su ubicación, por lo que se opta por deshabilitar el punto para que el error fuera menor.

Una vez que asignadas las coordenadas podemos visualizar tres listados, uno con los datos originales de los puntos de apoyo, otro con los valores estimados para esos puntos y el último con los valores de los errores, diferencia entre los datos originales y estimados, a través de las distintas herramientas del menú **Markers** y además se puede exportar el fichero en formato txt de los GCP.

Markers	Eastings (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
T5a	609879.588000	4742202.191000	461.993000	0.005000			
T5b	609870.130000	4742209.176000	462.385000	0.005000			
T6a	611699.439000	4742105.294000	467.990000	0.005000	2.523383	5	1.682
T6b	611692.088000	4742099.331000	467.991000	0.005000	2.201297	5	1.718
T7a	611626.518000	4740836.669000	510.110000	0.005000	1.998889	15	5.603
T7b	611649.234000	4740783.364000	509.930000	0.005000	0.911725	10	5.046
T8a	609951.269000	4741001.263000	493.557000	0.005000			
T8b	609922.031000	4741008.921000	493.413000	0.005000			
T9a	610808.443000	4741080.130000	500.112000	0.005000	10.065643	3	5.819
T9c	610776.595000	4741081.587000	499.519000	0.005000	11.150962	3	8.376
T10b	613083.854000	4741045.615000	487.121000	0.005000			
T10a	613079.484000	4741050.719000	488.493000	0.005000			
T11a	613112.839000	4739840.526000	498.688000	0.005000			
T11b	613120.671000	4739835.957000	496.482000	0.005000			
T12a	610721.850000	4739810.278000	488.719000	0.005000		1	0.000
T12b	610722.796000	4739812.738000	485.326000	0.005000		1	0.000
<b>Total Error</b>							
Control points					11.940319		6.831
Check points					15.234308		4.091

Figura 25: Error de los puntos de apoyo GCP.



En nuestro proyecto el error medio de los puntos de apoyo es de 11,94 metros, un valor alto ya que existe una diferencia entre las coordenadas originales y las estimadas en las imágenes de 11,94 metros.

El resultado de la orientación absoluta es la posición y orientación exactas de la cámara en el instante en que se realizó la fotografía. Consiste en unas coordenadas tridimensionales X, Y y Z denominadas foto-centro y tres giros  $\Omega$  (OMEGA),  $\Phi$  (PHI) y  $K$  (KAPPA) (respecto a los ejes XYZ), siendo usualmente los valores de  $\Omega$  y  $\Phi$  cercanos a cero.

Cameras	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Omega (°)	Phi (°)	Kappa (°)	Accuracy (°)
✓ 012_027	611612.844000	4740961.984000	2377.719000	10.000000	260.880649	0.000	0.028	178.066	10.000
✓ 012_028	611825.325000	4740951.236000	2378.292000	10.000000	265.056051	-0.003	0.029	178.067	10.000
✓ 012_029	612039.379000	4740940.846000	2378.629000	10.000000	270.305544	0.002	0.030	178.070	10.000
✓ 013_024	611137.688000	4740709.217000	2372.433000	10.000000	259.580054	0.006	0.027	178.065	10.000
✓ 013_025	611348.114000	4740698.776000	2372.555000	10.000000	260.789308	0.008	0.025	178.066	10.000
✓ 013_026	611561.811000	4740688.510000	2372.622000	10.000000	259.747640	0.009	0.029	178.065	10.000
✓ 013_027	611774.115000	4740678.809000	2372.798000	10.000000	263.932977	0.006	0.028	178.067	10.000
✓ 013_028	611984.657000	4740669.862000	2372.921000	10.000000	261.018790	0.011	0.025	178.070	10.000
<b>Total Error</b>					<b>264.479288</b>				

Figura 26: Parámetros de la orientación absoluta estimados después de la aerotriangulación definitiva y el error asociado.

Podemos visualizar tres listados, uno con los datos originales de los fotocentros del sistema GNSS, otro con los valores estimados para esas coordenadas y los tres giros (OMEGA, PHI, KAPPA) y el último con los valores de los errores, diferencia entre los datos originales y estimados, a través de las distintas herramientas del menú **Cameras** y además se puede exportar el fichero en formato txt de las imágenes.

En nuestro proyecto el error medio de las cámaras es de 264,479 metros, un valor bastante alto ya que existe una diferencia entre las localizaciones originales y las estimadas en las imágenes de 264,479 metros.

### Productos finales:

#### Modelo digital de superficie (MDS):

La generación del MDS se hace mediante 2 métodos: Generación de la malla densa de puntos (Dense cloud) mediante la herramienta **Build Dense Cloud** (en el caso de la prueba 1) y directamente a través la exportación de la nube de puntos LiDAR (en el caso de la prueba 2).

#### Prueba 1.1: Ortofoto verdadera usando MDS obtenido a partir de correlación estereoscópica entre las imágenes.

En esta prueba se ha utilizado 15 imágenes del vuelo fotogramétrico de 8 cm con un solape 80/80.



Figura 27: Nube densa generada.

Vemos que la nube densa formada por 55.033.075 puntos comenzará a reconstruir nuestro modelo de una manera más o menos realista. Pese a no representar una malla ráster continua, mostrará la nube de puntos mediante valores RGB pudiendo apreciar con cierta nitidez el territorio.

#### Modelo digital de superficie MDS:

La reconstrucción del modelo viene dada por la sustitución de la nube de puntos densa por una malla continua basada en resoluciones de píxel apropiadas para el mosaico que podremos equiparar a la resolución del ráster MDS derivado.

Los parámetros que podemos elegir al crear el MDS son:

- Sistema de referencia
- la nube de puntos con el que generarlo
- Método de interpolación en zonas sin dato
- Los parámetros fijos: resolución y dimensiones

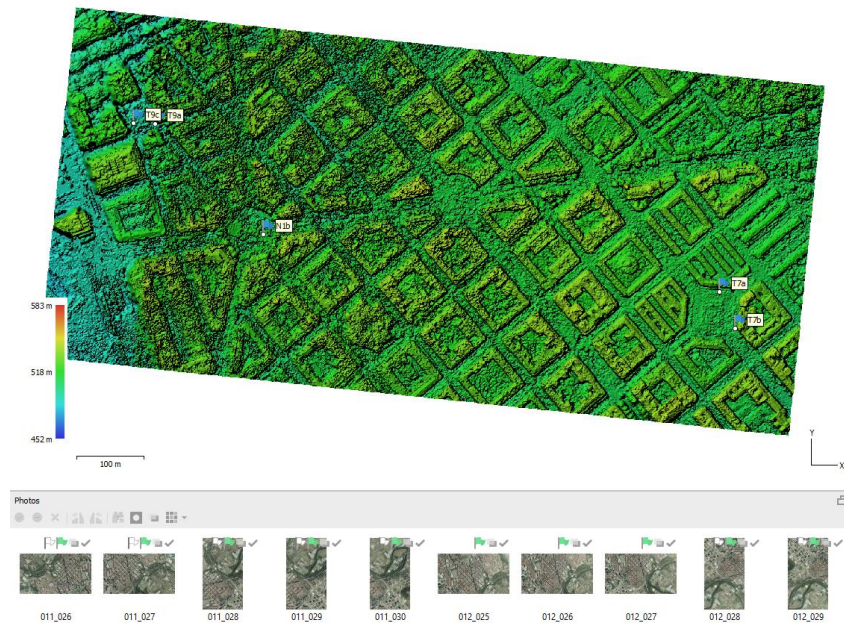


Figura 28: Visualización del MDS derivado en MetaShape.

Se puede exportar el DEM en los sistemas de referencia deseados sin tener que realizar excesivos esfuerzos mediante la herramienta **Export DEM**, visualizarlo, verificarlo y editarlo en cualquiera plataforma SIG.

#### Ortofoto verdadera:

Para generar la ortofoto verdadera se han utilizado las imágenes del vuelo con los parámetros de orientación exterior después de la areotriangulación y el MDS generado en el paso anterior para generar la ortorectificación de las imágenes.

Los parámetros que podemos elegir al crear la ortofoto verdadera son:

- El modelo con el que queremos generar la ortorrectificación.
- Método de unión de imágenes del mosaico.
- Relleno de zonas sin dato.
- Tamaño del pixel de salida.
- Dimensiones.
- Zona de trabajo.





Figura 29: Ortofoto verdadera de la prueba 1.1 derivada en MetaShape.

### **Prueba 1.2: Ortofoto verdadera usando MDS obtenido con puntos LiDAR.**

En este prueba se ha utilizado 15 imágenes del vuelo fotogramétrico de 8 cm con un solape 80/80.



Figura 30: Ortofoto verdadera de la prueba 1.2 derivada en MetaShape.

#### **7.3.2 Procesado de datos con Inpho versión 5**

Una vez que tenemos las fotografías tomadas con la camera digital DMC III de Leica, lo que hemos de hacer, es procesarlas para obtener los MDS y las ortofotos verdaderas, realizando antes las orientaciones pertinentes.

Inpho es un programa comercial que aborda todo el proceso fotogramétrico profesional. Es la competencia directa de Agisoft Metashape, y prácticamente hacen lo mismo, cada uno con sus algoritmos y métodos, pero el objetivo es el mismo, procesar las fotografías aéreas y obtener productos derivados de las mismas.

**Definición del proyecto en Inpho:** La definición en Inpho constituye de varios pasos, algunos opcionales y otros obligatorios. Veamos, en primer lugar, los elementos obligatorios que hay que meter:

**Definición del Dátum:** El Dátum utilizado en el proyecto de Inpho es el ETRS89/UTM Zone 30N (EPSG: 25830) (Figura 31). Inpho tiene multitud de posibilidades en cuanto a sistemas de referencia se refiere, y en caso de que no esté el que queremos nos permite crear un sistema adaptado a nuestro proyecto.

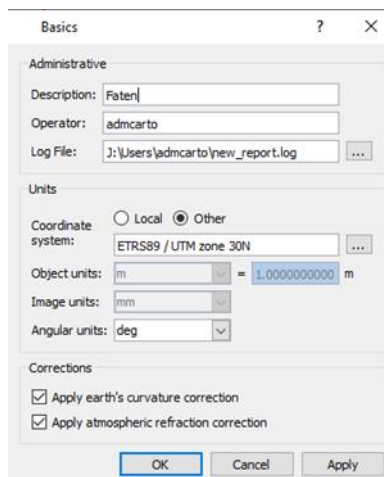


Figura 31: Definición del Dátum.

**Definición de la cámara:** Es en este apartado en donde podemos identificar la cámara con la que se realizó el vuelo, así como su focal ( $f$ ), distorsiones, dimensiones etc. Así pues, lo que hacemos es añadir una nueva cámara y editar sus parámetros estableciendo la focal y las dimensiones de la DMC III a partir de los parámetros de calibración que vienen dentro del fichero de introducción de la cámara de la empresa del vuelo. (Figura 32)

Se debe aclarar que en el caso de una cámara digital no hay parámetros de distorsión en el punto principal ( $x_0, y_0$ ) es (0,0).

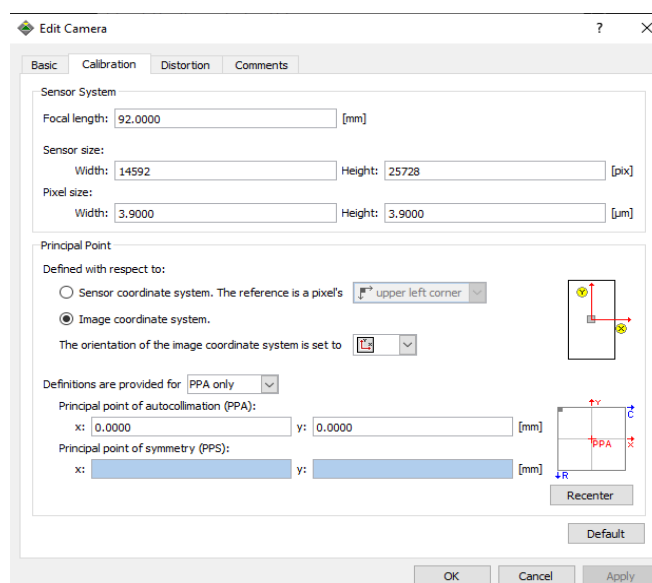


Figura 32: Parámetros de calibración.

**Definición de los datos iniciales de GPS/IMU:** Inpho pide que se introduzcan unos datos iniciales de orientación externa, en los que se incluyan las coordenadas X, Y y Z y los giros OMEGA, PHI y KAPPA de cada uno de los puntos de adquisición de las fotografías. Las cámaras DMC III y de ese estilo, adjuntan este tipo de información porque llevan acoplados un GPS y un IMU. Esta característica hace que dispongamos de datos iniciales de orientación externa y que, por lo tanto, sencillamente necesitamos importar estos datos.

Además de todo lo anterior, hay que tener atención con el nombre que le asignamos a cada uno de los puntos de vista calculados, ya que, si no conviene con el nombre de la fotografía (ID), Inpho no los va a asociar y va a dar un error. Por eso siempre llamaremos a los puntos de vista, igual que a las fotografías, evitando así errores de este tipo.

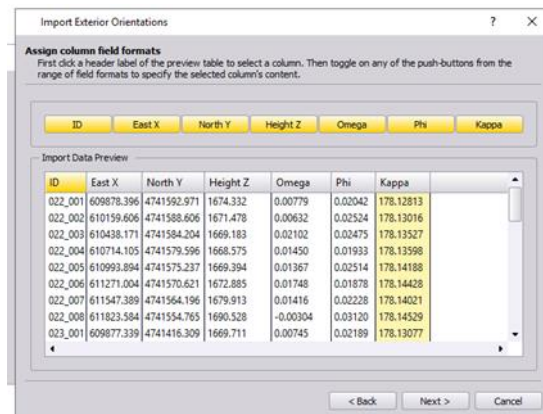


Figura 33: Importación de los datos iniciales de la orientación externa.

**Definición de las fotografías a utilizar:** Es aquí donde seleccionamos las fotografías que se contendrán en nuestro proyecto y le indicamos la cámara con la que se tomaron, así como la altura media de vuelo (Figura 34) y el número de pasadas (y las fotos que pertenecen a cada pasada).

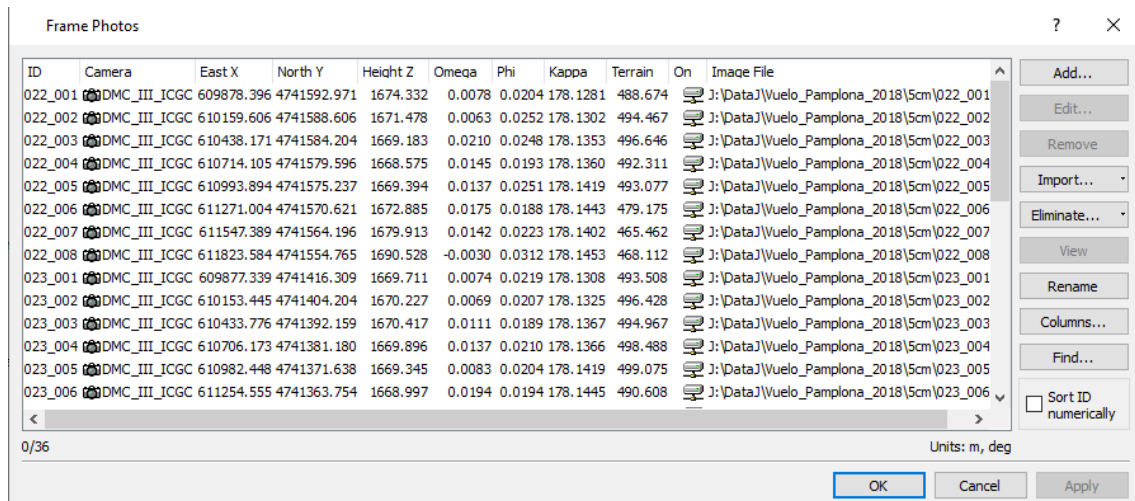


Figura 34: Importación de fotografías.

**Importación de puntos de control:** Se trata de importar las coordenadas de los puntos que se han tomado en campo y que servirán de puntos de control y chequeo en el proceso. El resultado final de la importación de puntos de control, es el siguiente:

\$	ID	Type	East X	North Y	Height Z	StdDev X,Y	StdDev Z	Description
<input checked="" type="checkbox"/>	N10a	HV	612333.995	4738430.516	501.099	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N10b	HV	612308.386	4738437.107	500.171	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N1a	CHV	610965.647	4740919.891	502.908	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N1b	HV	610929.922	4740927.291	502.617	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N2a	HV	611239.112	4740972.441	504.767	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N2b	HV	611242.169	4740961.766	504.743	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N3a	HV	610898.140	4739779.427	478.439	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N3b	HV	610944.273	4739774.440	479.263	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N4a	HV	611216.391	4739782.028	482.474	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N4b	HV	611184.560	4739768.245	482.210	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N5a	HV	612052.255	4739551.023	482.040	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N5b	HV	612034.590	4739509.635	481.603	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N6a	HV	612435.443	4739512.029	483.719	Standard	Standard	Undefined
<input checked="" type="checkbox"/>	N6b	HV	612443.709	4739549.685	483.447	Standard	Standard	Undefined

Figura 35: Puntos de control del proyecto.

Para nuestro caso concreto no es necesario introducir ningún elemento más, pero existe la posibilidad de importar ortofotos, MDT etc.

Para nuestro caso con estos datos solamente podemos comenzar a trabajar con el modulo MATCH-AT de Inpho, que es el que nos permite hacer todo el proceso de aerotriangulación completo.

**Orientación interna:** La orientación interna de las fotografías conlleva la determinación del haz perspectivo. En términos generales lo que se pretende es determinar la geometría de este haz conociendo el punto principal de la imagen, la focal de la cámara y en determinados casos, las marcas fiduciales. Sin embargo, al ser una cámara digital, todos estos parámetros se obtienen de las diferentes calibraciones realizadas. De modo que, la orientación interna queda realizada en el momento en que definimos la cámara, ya que fue en ese instante cuando establecimos los puntos de control, las distorsiones, etc., y el haz perspectivo identificado sin necesidad de añadir ninguna marca fiducial.

**Identificación de puntos de control:** La localización de puntos de control en Inpho se parece mucho si lo comparamos con la metodología de Metashape, ya que al tener una orientación externa previa, el propio programa empareja a grosso modo la zona donde cada punto de control ha de aparecer (Figura 36). Esto es posible como hemos dicho gracias a la orientación externa inicial y a que adelantadamente le hemos importado los puntos de control en un fichero. Lo que habrá que hacer, por tanto, es perfeccionar la puntería en cada punto e identificar cada punto según sus características (control vertical, control horizontal, chequeo etc.).



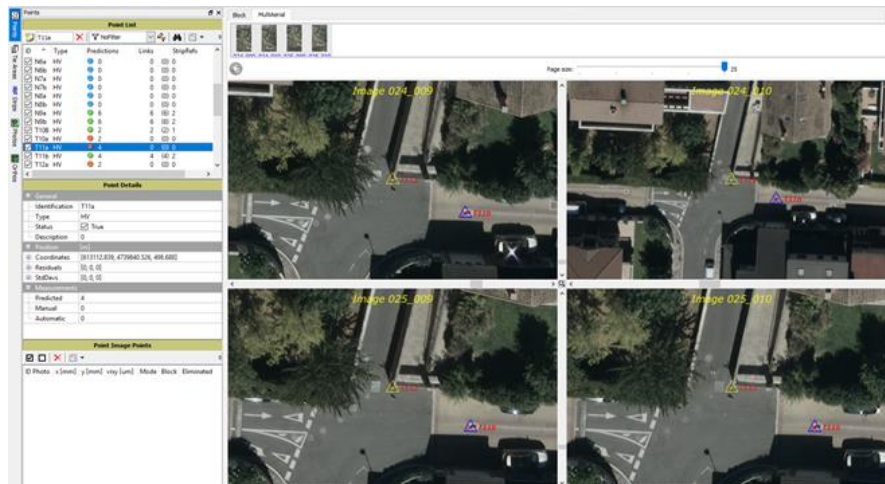


Figura 36: Localización de los puntos de control de manera aproximada.

### Detección de puntos de paso (Tie Points) y realización de la Aerotriangulación:

A continuación, lo que debemos hacer es detectar puntos de paso, Inpho realiza esta operación de manera automática en la opción Products-Match-AT-Aerial Frame Triangulation. En este menú también hay que seguir ordenadamente una serie de pasos para obtener los resultados adecuados:

- Iniciamos la orientación externa (Figura 37): En este paso, lo que hacemos es decirle al programa que inicie la extracción de los puntos de paso de forma automática con el ajustamiento del bloque.

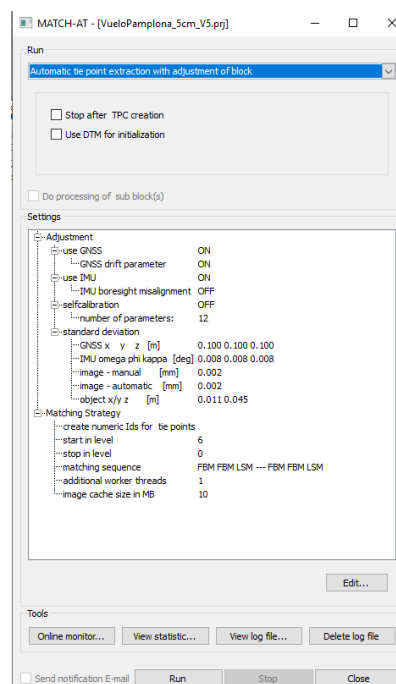


Figura 37: Inicialización del proceso.

- Establecer los parámetros con los que se calcularán los puntos de paso: En esta ventana tenemos varias pestañas, en cada una de las cuales nos pedirá una serie de datos o parámetros tales como si ha de tener en cuenta o no los datos del GPS/INS, la densidad de los puntos de paso, el tamaño del recuadro de búsqueda (4x4 recomendado), la mínima distancia que ha de haber entre puntos, el nivel por el que ha de empezar la desviación estándar, etc. Todo esto queda mostrado en la figura 38.



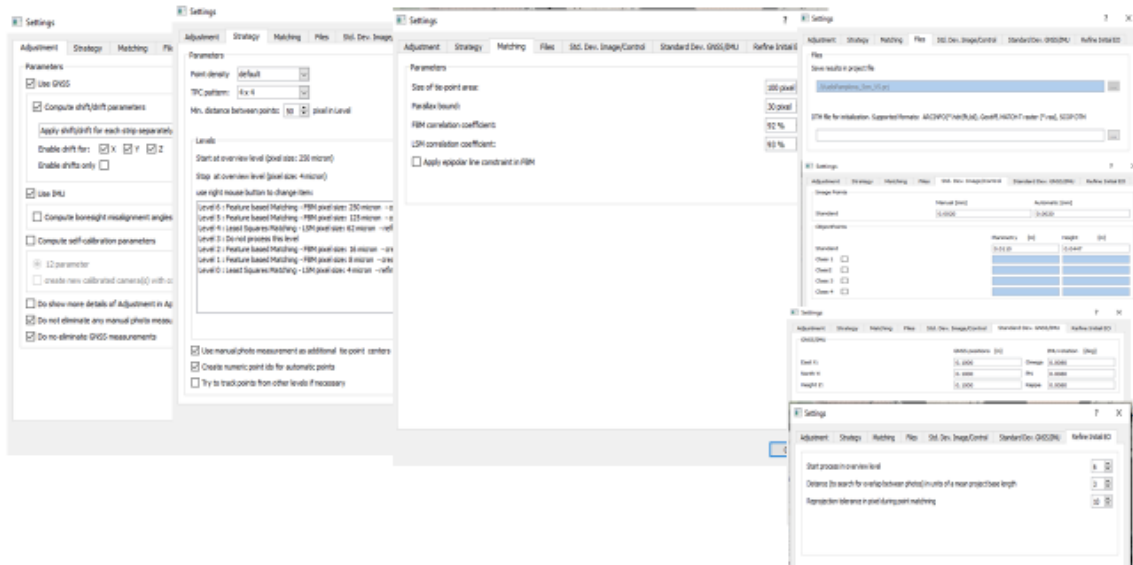


Figura 38: Parámetros para realizar la orientación externa.

- Con todos los parámetros señalados en el paso anterior generamos la aerotriangulación: En este paso se realizan los cálculos de la orientación externa y se detectan los puntos de paso o tie points.
- Refinamiento de los resultados: Permite refinar los cálculos, eliminando puntos con errores groseros, o puntos que únicamente salen en 2 fotografías y que está demostrado que acrecientan el error, etc.

**Análisis de la Aerotriangulación:** Nos permite asegurarnos si los resultados derivados están bien o existen cosas raras en ellos que nos dan pensamiento de lo bueno/malo que es el ajuste. Pinchamos sobre Products- Match AT- Analyzer y en la pantalla que nos sale podemos observar las conexiones posibles entre las fotografías y las conexiones existentes entre las mismas, mediante la opción Join lines pots. De ese modo si alguna conexión evidente no aparece, es sospechoso (Figura 39).

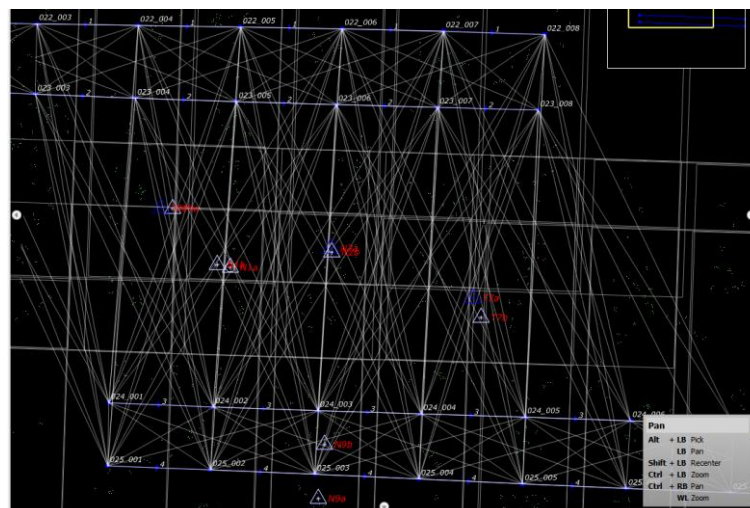


Figura 39: Conexiones posibles entre los fotocentros de las imágenes.

En nuestro caso vemos que no hay conexiones posibles que no se hayan realizado lo que nos indica que la conexión entre fotografías es correcta.

Por último, en esta sección es interesante la opción de ver el log generado por el programa ya que podremos ver el valor del sigma naught  $\sigma_0$  que nos da idea sobre la precisión total del bloque. Según la empresa de cartografía **GeoTool Box Ibérica SL** “este valor debe estar en torno a 1/5 pixel (igual a 52.72 micrones) o incluso menos en bloques pequeños. Si el valor obtenido es mucho mayor, esto nos indica que el bloque está demasiado “suelto”, es decir hay demasiada “holgura”. En resumen, cuanto más alto sea el sigma naught menos garantías podemos tener de los resultados obtenidos”. En nuestro caso, el valor de este último es dado por 0.6 micrones que significa que tenemos un buen resultado.

## Productos finales:

### Obtención de MDS:

Como en cualquier otro proyecto fotogramétrico el siguiente paso es obtener un MDT o un MDS con el que después realizar las ortofotos verdaderas, de modo que lo que nos toca ahora es realizar un modelo digital de superficie.

En ApplicationMaster, pinchamos en Tools – DTM Toolkit y accedemos a la ventana principal en donde podremos crear nuestros MDS/MDT. En ella elegiremos todos los parámetros necesarios para la realización del MDS; elegir el tipo de proceso, el MDT que se creará o el método que utilizado para hacer el MDS .Este quiere decir que la importación de los ficheros de entrada a partir de los cuales se crearía el MDS es algo distinto de una prueba a otra, el paso de malla y el directorio de salida. Visto que tenemos diferentes pruebas, el proceso es el mismo en cualquier caso y lo único que cambia son los ficheros de entrada .Se explica solo el proceso de creación del MDS de la primera prueba (Figura 40).

Para comenzar la creación del MDS, le damos al icono Run, y el proceso comienza. El resultado es un MDS con la extensión .dtm que se ve solamente en 3D en el módulo MATCH-AT de Inpho.

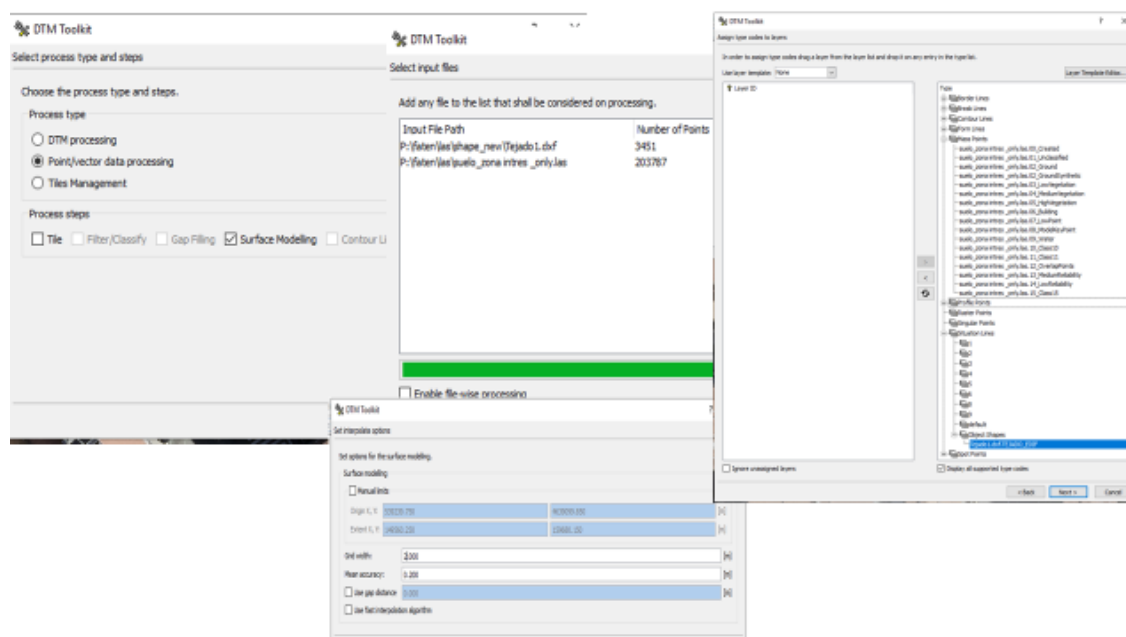


Figura 40: Ventana principal de creación de MDS.

### Realización de ortofotos verdaderas:

Para la realización de ortofotos verdaderas con Inpho versión 5 hemos de pinchar en Products-Orthomaster-Orthorectification. En este momento se hace la importación de la orientación exterior, las imágenes, las fotos áreas etc. y accedemos al módulo OrthoMaster que es la ventana principal para la realización de ortofotos (Figura 41).

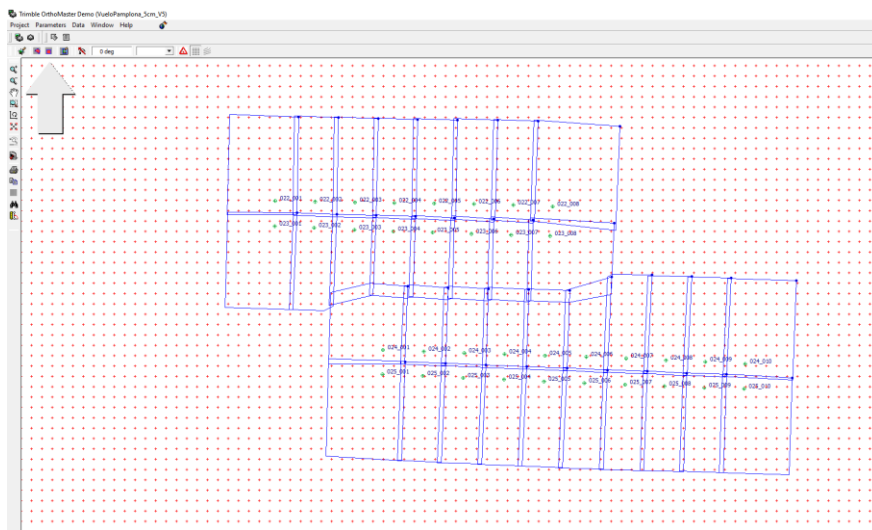


Figura 41: Ventana principal de creación de ortofotos.

Lo primero que debemos hacer es importar el MDS que se va a utilizar en el proceso de realización de ortofotos verdaderas de modo que todas las ortofotos verdaderas se crearán en función de los datos del modelo que hayamos elegido.

A continuación los pasos a seguir son los que aparecen en el menú Data-Generate-Start Orthophoto Generation (Figura 42).

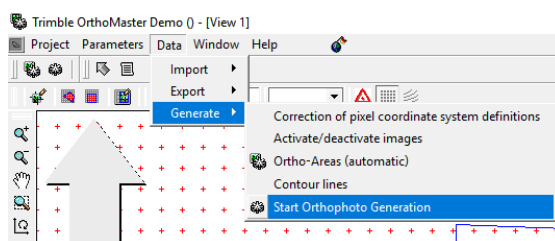


Figura 42: Pasos a seguir para generar ortofotos verdaderas.

Para este proyecto en concreto las opciones de este menú que se utilizaron fueron las siguientes:

- **Activate/desactívale Images:** Es la opción en la que se eligen las fotografías que quieres que formen parte del proceso de ortorectificación. Se utilizan todas las fotografías existentes en este proyecto ya que tiene un número reducido de imágenes.
- **Ortho.-areas (automatic):** El programa calcula de manera automática, las áreas de las ortofotos en función de un porcentaje que le establecemos nosotros. En nuestro caso al generar ortofoto verdadera hemos elegido 100% como porcentaje.
- **Start Orthophoto Generation:** El proceso de generación de ortofotos empieza, tras definirle una serie de parámetros tales como el formato de salida, el nombre del archivo, el MDS a utilizar, los parámetros a tener en cuenta etc.

- Para comenzar el proceso, le damos al icono Run. El resultado de salida es una carpeta en el disco local en la cual se encuentran las imágenes ya ortorectificadas mediante el MDS o las ortofotos verdaderas.
- Una vez tenemos las imágenes ortorectificadas, debemos acceder al módulo OrthoVista de Inpho donde vamos a visualizarlas y generar un único mosaico.
- Lo normal es que la pantalla aparezca en blanco, sin ninguna configuración predeterminada. En ese caso lo que hacemos es pinchar en el icono “Add whole directory” para importar las imágenes ortorectificadas (las ortofotos verdaderas) y en el icono “Select Area” que permite introducir las coordenadas X min, Y min, X max e Y max para elegir la zona de interés para generar el mosaico.

A continuación, hay otros pasos a seguir que aparecen en el menú Process (Figura 43).

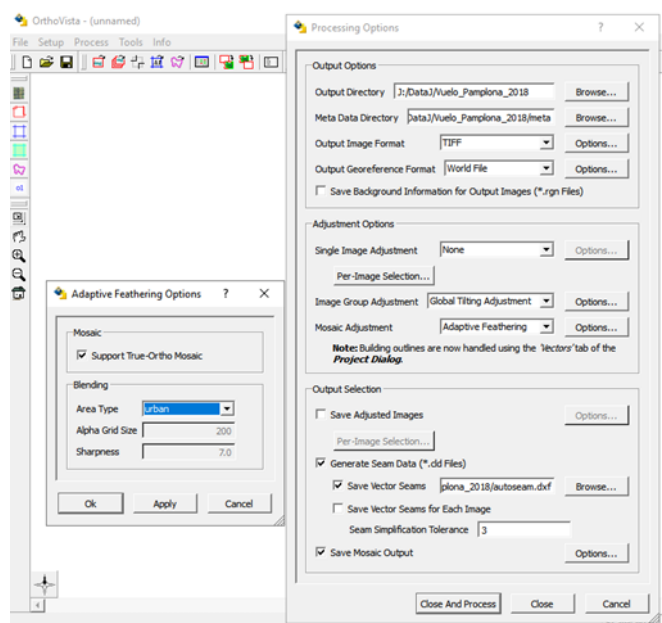


Figura 43: Parámetros del mosaico.

### **Prueba 2.1: Ortofoto verdadera usando MDS obtenido con puntos LiDAR del suelo y vectores de edificios con TerraScan.**

En esta prueba se ha utilizado 15 imágenes del vuelo fotogramétrico de 8 cm con un solape 80/80.



Figura 44: Resultado final de las ortofotos verdaderas en la prueba 2.1 derivada en Inpho 5; a la izquierda, la zona con la estructura sencilla y, a la derecha, la zona con la estructura compleja.



Los vectores de color verde representan los vectores de la cartografía vectorial que nos permiten de comprobar si los resultados obtenidos están bien o no métricamente.

**Prueba 2.2: Ortofoto verdadera usando MDS obtenido con puntos LiDAR del suelo y cartografía vectorial.**

En este prueba se ha utilizado las imágenes del vuelo fotogramétrico de 8 cm con un solape 80/80.



Figura 45: Resultado final de las ortofotos verdaderas en la prueba 2.2 derivada en Inpho 5; a la izquierda, la zona con la estructura sencilla y, a la derecha, la zona con la estructura compleja.

**Prueba 2.3: Ortofoto verdadera usando MDS obtenido con la nube de punto regular (la Grid de puntos) obtenida a partir de la correlación estereoscópica de las imágenes.**

Para la creación de la nube de puntos regular de ortofotos verdaderas de forma automática utilizando algoritmos de “image matching “con Inpho versión 5, en ApplicationMaster hemos de pinchar en products – MATCH-T DSM y elegiremos todas las imágenes necesarias para la correlación (en este caso se ha utilizado 15 imágenes del vuelo fotogramétrico de 8 cm con un solape 80/80) y el directorio de salida. Es posible agregar datos morfológicos, lo que ayuda a crear modelos de terreno más precisos.

El resultado es una nube de puntos irregular densa muy parecida a la nube de puntos LiDAR y una nube de puntos regular menos densa con una densidad de 0.5 pts/m<sup>2</sup> en la cual no hay puntos que representen la fachada de los edificios.

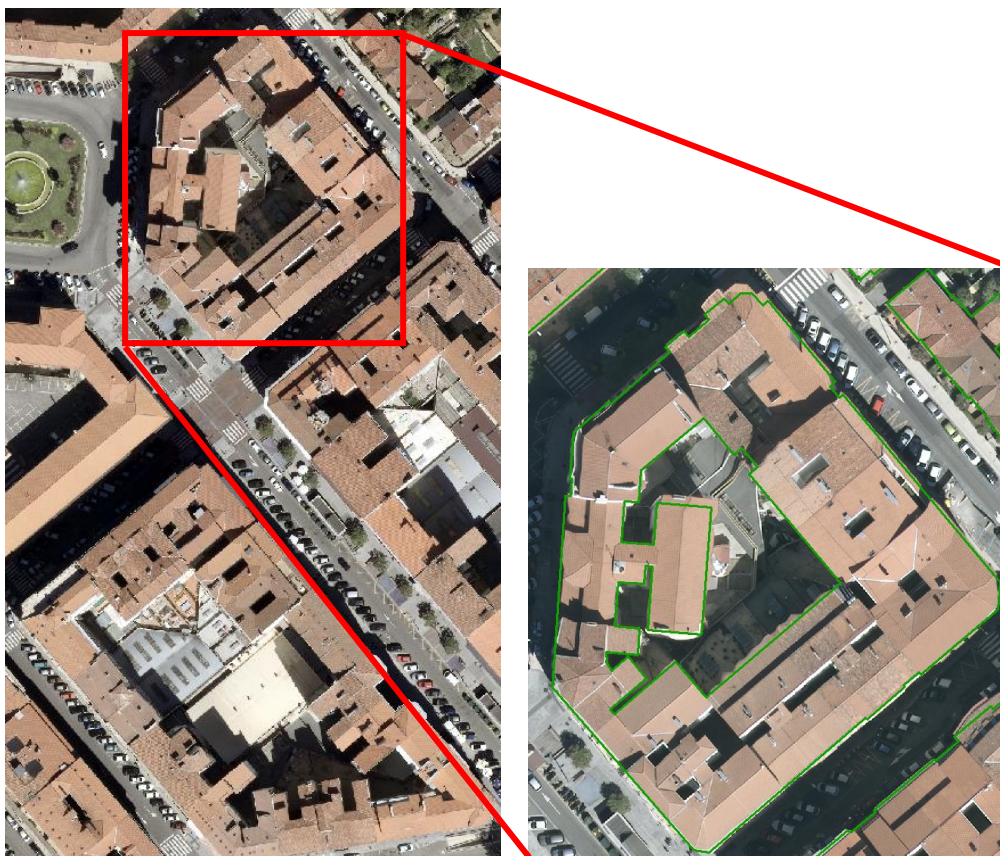


Figura 46: Resultado final de la ortofoto verdadera en la prueba 2.3 derivada en Inpho 5.

### 7.3.3 Procesado de datos con Inpho versión 9.1

**Definición del proyecto con Inpho 9:** A diferencia de MetaShape e Inpho, el proceso de generación de ortofoto verdadera con el módulo Match-3DX de inpho es mucho más sencillo. No hace falta ir haciendo todo el proceso fotogramétrico (orientación interna y externa creación de la nube de puntos densa y el MDS y finalmente la ortofoto verdadera) de una manera separada utilizando en cada paso un módulo diferente. En esto caso, en ApplicationsMaster, solo tenemos que definir el dátum, los parámetros de la cámara, los datos iniciales de GPS/IMU, las imágenes a procesar y los puntos de control de la misma manera como lo hemos hecho en los pasos anterior con Inpho 5.

A continuación, lo que debemos hacer es generar la ortofoto verdadera, operación que Inpho 9 realiza de manera automática en la opción Capture-Match-3DX (Figura 47).

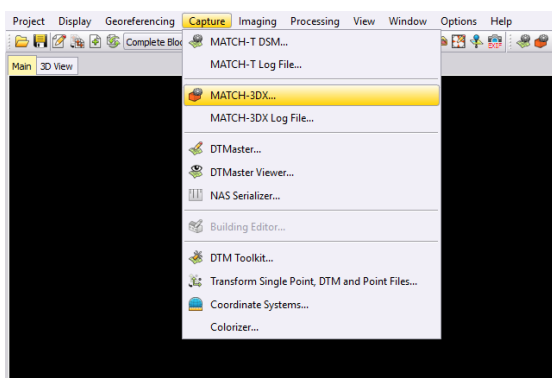



Figura 47: Ventana principal de la realización de ortofotos.

En este menú también hay que seguir con orden una serie de pasos para obtener los resultados adecuados (Figura 48):

- Elegir el nombre del área procesada que debe ser único.
- Elegir el tipo de algoritmo responsable del “matching” entre las imágenes, es decir, la generación de nubes de puntos : según el manual de referencia de Inpho 9.1 (Manual, n.d.) se recomienda utilizar el Semi-Global Matching algorithms 2.5D (SGM2.5D) que permite la producción de la ortofoto verdadera directamente con la nube de puntos densa, sin ortorrectificar las imágenes aéreas.
- Configurar el Diálogo de parámetros de generación de superficie presionando el botón  del icono strategy. (Figura 48 B). En nuestro caso tenemos imágenes áreas y un vuelo de solape 80/80 y otro de solape 60/80.
- Límite del área de trabajo: Por defecto, el bloque completo se agrega como área. Se queremos trabajar en una zona concreta tenemos que importar un polígono delimitador de formato dxf a nuestro proyecto.

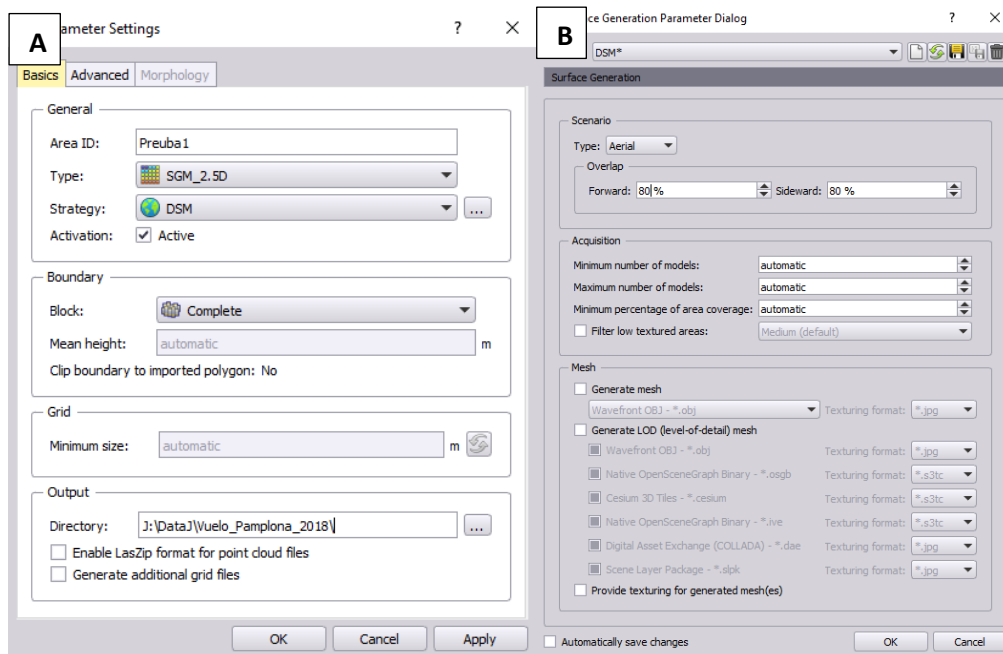


Figura 48: Parámetros de generación de la ortofoto verdadera con Inpho 9.1.

**Productos finales:** La salida de ortofoto es un conjunto de carpetas en cada una de ellas se encuentra los productos final (DSM, nube de puntos densa, las ortofotos verdaderas etc). Para obtener el mosaico final se utiliza el software GlobalMapper.

### **Prueba 3.1: Ortofoto verdadera usando MDS obtenido a partir de la correlación estereoscópica entre las imágenes.**

En esta prueba se ha utilizado 15 imágenes del vuelo fotogramétrico de 8 cm con un solape 80/80.





Figura 49: Resultado final de la ortofoto verdadera en la prueba 3.1 derivada en Inpho 9.

**Prueba 3.2: Ortofoto verdadera usando MDS obtenido a partir de la correlación estereoscópica entre las imágenes en una zona más pequeña.**

Visto que el coste competencial con Inpho 9 es muy alto (la generación de la ortofoto en el caso 1 cuesta 12 horas aproximadamente), este prueba tiene por objetivo comprobar si cuando trabajamos con una zona más pequeña, con los mismos datos y parámetros de la prueba 3.1, podemos obtener los mismos o mejores resultados del primer experimento en poco tiempo. Para ello, hemos creado un dxf por medio del módulo DTMaster de Inpho 9 para delimitar nuestra zona de interés.

En este prueba se ha utilizado 15 imágenes del vuelo fotogramétrico de 8 cm con un solape 80/80.



Figura 50: Resultado final de la ortofoto verdadera en la prueba 3.2 derivada en Inpho 9.

**Prueba 3.3: Ortofoto verdadera usando MDS obtenido a partir de la correlación estereoscópica entre imágenes de mayor resolución.**

En este prueba se ha utilizado 8 imágenes del vuelo fotogramétrico de 5 cm con un solape 60/80.





Figura 51: Resultado final de la ortofoto verdadera en la prueba 3.3 derivada en Inpho 9.

**Prueba 3.4: Ortofoto verdadera usando MDS obtenido con la correlación estereoscópica entre un número mayor de imágenes.**

Con Arcmap se seleccionan las huellas que tocan con el recinto que son 55, por lo tanto, 55 imágenes (Figura 52). En este prueba se ha utilizado las imágenes del vuelo fotogramétrico de 8 cm con un solape 80/80.

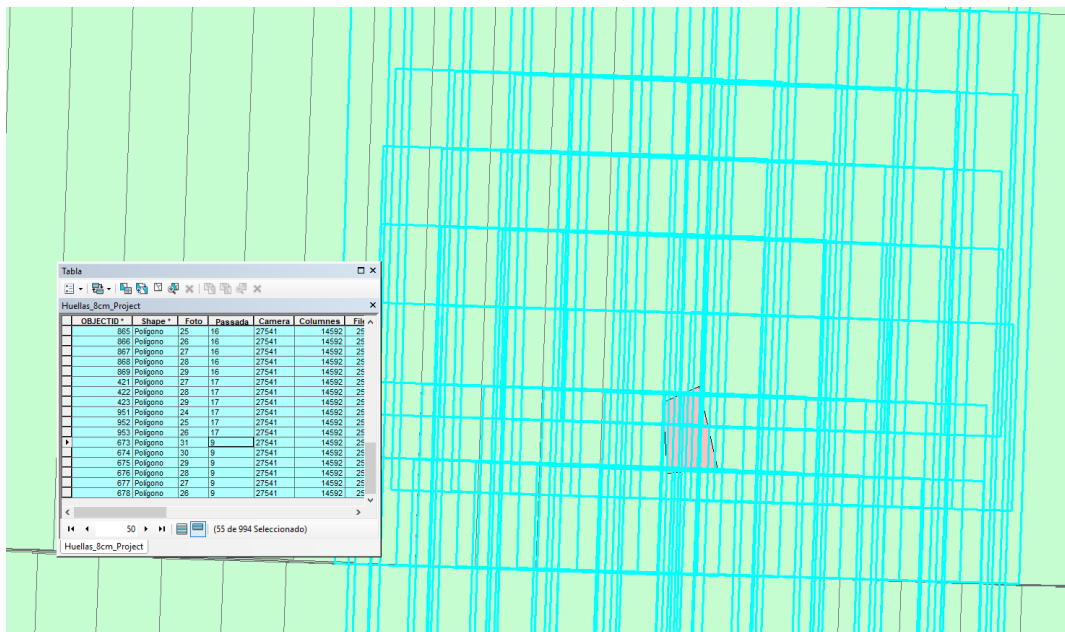


Figura 52: Selección de las huellas de interés con Arcmap.



Figura 53: Resultado final de la ortofoto verdadera en la prueba 3.4 derivada en Inpho 9.

## 6. Resultados

En las ortofotos, los errores de posición generados mediante el uso de diferentes tipos de modelos digitales de superficie MDS serán evaluados en esta sección. Para ello, se ha utilizado como referencia la cartografía vectorial. En otras palabras, se ha comprobado si los edificios encajan perfectamente con la cartografía de referencia o no.

### 6.1 Resultados obtenidos con MetaShape

#### 6.1.1 Resultados de la prueba 1.1

Como puede observarse, en el caso de la nube de puntos densa generada a partir de la correlación entre las imágenes del vuelo fotogramétrico para generar el DSM con MetaShape, el resultado es francamente malo. Los tejados aparecen borrosos, desplazados, y curvados, y hay presencia de píxeles blancos. Los motivos de este resultado no han sido nada evidentes.

#### 6.1.2 Resultados de la prueba 1.2

La combinación de los datos LiDAR con las imágenes aéreas no ha añadido nada relevante respecto a la ortofoto tradicional (Figura 8 A), ya que los resultados son muy parecidos. Es verdad que los tejados de los edificios no se ven con distorsiones ni desplazamientos, pero la ortofoto verdadera muestra zonas ocultas en los edificios (no tenemos una proyección perfectamente ortogonal).

Se cree que el error pudiera venir por el número reducido de GCP en las imágenes de esta zona, y que el alto error total de los puntos de apoyo influyeran en la calidad del DSM y, por lo tanto, en la calidad de la ortofoto verdadera final (Figura 30).

### 6.2 Resultados obtenidos con Inpho 5

#### 6.2.1 Resultados de la prueba 2.1

Inicialmente, se han creado ortofotos verdaderas con una resolución de imagen de 10 cm basadas en MDS (2m x 2m). En la figura 44 se ha formado un parche de la ortofoto verdadera resultante a una resolución de 10 cm, aunque las pruebas se han referido a un área más amplia que la que se muestra. En aras de la claridad y legibilidad de la imagen, aquí solo se informa de los detalles de las ortofotos verdaderas generadas por diferentes conjuntos; imágenes del vuelo fotogramétrico, los puntos LiDAR del suelo y los vectores de la cartografía vectorial sobre el área cubierta por dos zonas diferentes. Esta elección está motivada por la compleja geometría del tejado a muchas aguas y la altura de este edificio, lo que representa un tema muy crítico para la generación de ortofotos verdaderas. Lo mismo se hará en otras secciones del documento.

El zoom en la figura 44 muestra que los edificios bajos con estructura sencilla están correctamente representados, porque el uso del MDS obtenido mediante una buena definición de los vectores de los edificios ha dado como resultado un tejado bien limitado. La ausencia de áreas ocultas (las fachadas que no se ven) no ha provocado errores de posición significativos visto que los vectores se encajan perfectamente con los vectores de la cartografía. Por el contrario, la pieza de ortofoto verdadera correspondiente al edificio alto y de estructura compleja no tiene una correspondencia adecuada con la cartografía vectorial. Esto es debido a que DSM ha sido obtenido mediante una mala definición de los vectores de los edificios, y no ha podido proporcionar información para corregir distorsiones geométricas. Además, se nota la presencia de áreas ocultas ya que las fachadas se ven y existe una rara definición del límite del tejado con una mezcla de los píxeles de este último y los píxeles del suelo. Lo que se pensó para poder tener unos mejores resultados en este caso es que se necesita hacer una buena edición manual, que es un proceso muy costoso y no hay una herramienta que nos permita tener los vectores bien en Z.

### **6.2.2 Resultado de la prueba 2.2**

Cuando utilizamos la cartografía vectorial lograda, se ha obtenido una buena correspondencia con el vector mapa en caso de edificios bajos y con la estructura sencilla. En el caso de los edificios altos y complejos, los resultados mejoran respecto a la primera prueba debido a que los edificios encajan mejor con los vectores de la cartografía y se define bien los límites del tejado. Sin embargo, no dan el producto realmente esperado, y esto puede ser explicado por la falta de detalle de la cartografía vectorial, es decir, las aguas del tejado. Este resultado confirma que los edificios altos y con una geometría compleja representan un tema muy crítico para la generación de ortofotos verdaderas, y que en el caso de utilizar la cartografía vectorial, de unos vectores de los edificios mal definidos desde el principio tiene un resultado final extremadamente malo (Figura 45).

### **6.2.3 Resultados de la prueba 2.3**

El recurso de obtener un modelo digital de superficie MDS obtenido a partir de la correlación de imágenes aéreas ha mostrado que la correspondencia entre los datos de la ortofoto verdadera y la cartografía vectorial no son satisfactorios para los edificios más altos. Los edificios se ven más grandes y exceden el límite de los vectores y, además, los bordes del tejado son rugosos (Figura 46). Esta prueba ratifica que la combinación de los datos LiDAR con las imágenes del vuelo fotogramétrico ayudan a tener mejores resultados a pesar de la diferencia del tiempo entre a captura de datos LiDAR (2017) y las imágenes áreas (2018).

## **6.3 Resultados obtenidos con Inpho versión 9**

### **6.3.1 Resultados de la prueba 3.1**

Por ahora, el uso del módulo Match-3DX de Inpho versión 9 ha dado los mejores resultados. Esto parece los más razonables visto que los edificios muestran una proyección ortogonal, los bordes están bastante bien y no hay áreas ocultas. A pesar de esto, no dejaré esta prueba como definitiva hasta no hacer otra prueba con más imágenes para comprobar si el número de imágenes de entrada influyen o no en la calidad del producto final. Al final, el uso de muchas imágenes con distintas perspectivas puede hacer que se emborronen más los bordes del tejado (Figura 49).

### **6.3.2 Resultados de la prueba 3.2**

Como hemos comentado antes el objetivo de esa prueba es disminuir el coste computacional para la generación de la ortofoto verdadera final en el caso de que sea necesario tener una ortofoto de una zona amplia, sino de un trozo concreto. Lo extraño es que, a pesar del uso de los mismos datos de entrada y los mismos parámetros de la prueba 1, los resultados empeoran. El producto obtenido da la sensación de que el programa no ha utilizado todas las imágenes del bloque que tocan el recinto, que es lo que esperábamos, sino que ha cogido solo las imágenes que cayeron dentro de este trozo. Donde no hay información suficiente (píxeles, nube de puntos o un DSM), lo rellena con un color homogéneo parecido a la zona de al lado (suelo, calle, etc.)(Figura 50). Lo que no está claro es cómo actúa este polígono delimitador pero lo que es seguro es que el resultado no es bueno.

### **6.3.3 Resultados de la prueba 3.3**

El uso de 8 imágenes de una resolución de 5 cm (GSD = 5 cm) y con un solape de 60/80 ha mostrado que los resultados están métricamente bien ya que los vectores se encajan bien con los vectores de referencia.

El zoom de la figura 51 muestra que, donde no hay información, el programa está inventando imágenes homogéneas similares al terreno (tejado, suelo, etc.), es decir, triangula el MDS generado unas zonas con un color liso sin textura.

Este problema tiene como origen la falta de recubrimiento suficiente entre las imágenes y el número reducido de imágenes de entrada (8 imágenes). Esto es debido a que este vuelo no está pensado para hacer una ortofoto verdadera sino para ver el detalle del suelo.

En el caso de que este vuelo fuera un vuelo con un solape 80/80 y además tuviera por lo menos 3 pasadas, ya que este vuelo solo tiene solo 2 pasadas, tendría por lo menos una imagen de donde elegir la información que le falta, y seguro que obtendríamos unos mejores resultados.

Lo que se recomienda en este caso es la planificación de un vuelo con menos velocidad para obtener un mayor número de fotos.

### **6.3.4 Resultados de la prueba 3.4**

En este caso los resultados mejoran respecto a la prueba 1. Eso tiene sentido porque a las pruebas anteriores les hemos añadido más imágenes y, por lo tanto, más recubrimiento. Esta prueba confirma que el número de imágenes de entrada influyen mucho sobre los resultados finales y para poder hablar de una ortofoto verdadera es necesario tener un número de imágenes importante y un recubrimiento suficiente (Figura 53).

## **7. Análisis de tiempo total de coste computacional**

La fusión de los datos LiDAR con las imágenes aéreas nos ha costado mucho tiempo, debido a la alta densidad (14 pt/m<sup>2</sup>) de puntos LiDAR. Hemos pasado varias horas para llevar a cabo la tarea de clasificar los puntos LiDAR en cualquiera de sus formas, automática o manual, para su uso posterior.

La generación de los vectores de los edificios con el software TerraScan y la cartografía vectorial mediante la restitución fotogramétrica digital con el programa Digi21.net conlleva un muy alto coste computacional para recoger bien la información sobre la altura (valores **Z**) de los vectores.

Respecto a la generación del producto final o la ortofoto verdadera, se verificó que el coste computacional depende principalmente del software fotogramétrico utilizado, el número de imágenes a procesar, la precisión de los datos de entrada citados en el párrafo anterior, y la calidad de los productos de salida (la nube de puntos densa y el MDS). Esto es bastante obvio, porque con una baja resolución del modelo de superficie del terreno, el software debe ejecutar una interpolación de cuadrícula para obtener los valores de altura necesarios para la rectificación de cada píxel de la imagen original. En cambio, con un DSM denso, la interpolación no es necesaria y esto puede aumentar la velocidad computacional.

Si se analiza el coste general de la obtención de la ortofoto verdadera se observa que, con el aumento del número de imágenes a procesar y la dimensión de la zona de interés, el tiempo de proceso lo hace de manera progresiva. Este hecho se ha dado en las tres herramientas pero en el caso de Inpho versión 9 se ha observado que ha tardado más tiempo en procesar todas las pruebas (Tabla 3).

Tabla 3: Tabla recapitulativa de los diferentes resultados.

Software	MetaShape		Inpho 5			Inpho 9				
Prueba	1	2	1	2	3	1	2	3	4	
Datos de entrada	Imágenes aéreas (8cm)	-LiDAR	-LiDAR	LiDAR	Imágenes Aéreas(8cm)	Imágenes Aéreas(8cm)	Imágenes Aéreas(8cm)	Imágenes Aéreas(8cm)	Imágenes Aéreas(8cm)	
		-Imágenes aéreas (8cm)	-Vectores	Cartografía vectorial						
			-Imágenes (8cm)	Imágenes Aéreas (8cm)						
Desplacamiento del tejado	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Medio	Medio	Bajo	
Píxeles sin textura	Baja	Baja	Alta	Baja	Baja	Bajo	Alto	Alto	Bajo	
Fachadas	Si	Si	Si	Si	Si	No	-	-	No	
Encajamiento con los vectores	-	-	No	No	No	-	Si	Si	Si	
Edición manual	Media	Alta	Muy Alto	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	
Tiempo	Nube de puntos densa	6 h	0 h	0 h	0 h	12 h	13h	6h	9h	18h
	MDS	10 Min	7 Min	5 Min	5 Min	5 min				
	Ortofoto verdadera	20 Min	15 Min	2h:30	3 h	3 h				
Softwares usados	MetaShape	TerraScan	TerraScan	TerraScan	Inpho 5	Inpho9	Inpho9	Inpho9	Inpho9	
			Inpho 5	Digi21.net		Global Mpper	Global Mpper	Global Mpper	Global Mpper	
Coste computacional	Medio	Alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	
Calidad de la ortofoto verdadera	Baja	Media	Baja	Media	Baja	Alta	Baja	Baja	Muy Alta	

En la tabla anterior el coste computacional puede ser Bajo, medio o alto dependiendo del tiempo dedicado para clasificar los puntos LiDAR, generar los vectores o editarlos y también de tiempo que tarda el software para generar la ortofoto verdadera.

## 8. Conclusiones

En este trabajo se presentan una serie de metodologías enfocadas a la obtención de la cartografía de detalle en zonas urbanas, y en concreto ortofotos verdaderas. Estos

métodos se basan en la creación de modelos digitales de superficie que transmiten la información de alturas de los edificios usando una serie de recursos (datos LiDAR, cartografía vectorial e imágenes áreas), lo que permitirá crear ortofotos verdaderas que reflejen la morfología real de los entornos urbanos mejor que las ortofotos ordinarias.

En el caso de las herramientas Inpho versión 5 y Metashape, el mejor método para obtener la ortofoto verdadera es el segundo método donde se combina la información de los puntos LiDAR y la cartografía vectorial (usada solo en el caso de Inpho 5) con la información de las imágenes áreas. A pesar de la cantidad y la calidad de la información de entrada y, sobre todo, del tiempo dedicado (resultando en un coste computacional alto), para tener una buena clasificación de los puntos LiDAR y una cartografía vectorial precisa no podemos considerar estas ortofotos verdaderas obtenidas como definitivas. Esto se debe a una clara diferencia entre las ortofotos verdaderas y la tradicional obtenida con el software Inpho 5 utilizando solo los puntos LiDAR clasificados automáticamente y sin recurso a una edición manual. Por lo tanto, los motivos de estos resultados no han resultado nada evidentes.

La tercera prueba se ha realizado con Inpho 9, donde hemos utilizado 8 imágenes de una resolución de 5 cm para generar la ortofoto verdadera. Esta prueba ha confirmado que el recubrimiento del vuelo fotogramétrico y las características del MDS condicionan en gran medida el resultado. En este caso, el solape ha resultado insuficiente y las discrepancias entre el modelo y el terreno real producen artefactos que requieren intervención manual por parte de un operador experto. Lo que no queda claro en esta prueba, a parte del recubrimiento y el número de imágenes necesarias, la resolución de las imágenes del vuelo fotogramétrico influye sobre la calidad de la ortofoto verdadera final o no.

Es verdad que en el caso de Inpho 5 y Metashape la fusión de los datos LiDAR ha dado mejores resultados comparando con las pruebas basadas solo en la correlación de las imágenes del vuelo fotogramétrico. Las conclusiones tomadas a partir del análisis de los resultados obtenidos llevan a pensar que el mejor método para generar una ortofoto verdadera es el cuarto método, el del software Inpho versión 9. La ortofoto obtenida con este método se ha considerado como definitiva en el presente proyecto, donde solo se han utilizado las imágenes del vuelo fotogramétrico como información de entrada. No se puede negar que la versión 9 de Inpho tarda más tiempo en lograr el producto final comparando con las otras dos herramientas, y que esto dependa del número de imágenes de entrada. Sin embargo, es el método que menos tiempo nos ha costado ya que en este proceso se trata solo de elegir los parámetros de la ortofoto verdadera de salida y luego pinchar sobre el botón start.

Aparte de los resultados obtenidos con Inpho 9, lo ventajoso de esta herramienta es ahorrar tiempo y dinero ya que para tener unos buenos resultados no hace falta pasar muchas horas clasificando los puntos LiDAR automáticamente y manualmente). Y no solo eso, sino editar manualmente los vectores de los edificios generados a partir de estos puntos es un paso muy complicado, y costoso cuando la estructura de los edificios es compleja y trabajamos en una zona amplia.

Resulta curioso pensar que los resultados hayan sido mejores sin los datos LiDAR y sin los vectores de los edificios. Podríamos pensar que los softwares Inpho versión 5 y MetaShape son dos programas bastante potentes en cuanto a fotogrametría, pero parece evidente que están pensados para generar ortofotos tradicionales y no ortofotos verdaderas.

Se debe tener en cuenta que en este proyecto hemos trabajado en una área muy pequeña (1 km<sup>2</sup> de superficie), y que se ha dedicado mucho tiempo para las pruebas de Metashape e Inpho 5. Si quisiéramos obtener una ortofoto verdadera de toda una ciudad no tendría sentido refinar manualmente la clasificación automática de los puntos LiDAR, vectorizar los edificios y editar manualmente los vectores. No obstante, este no es el caso de Inpho 9, ya que su mayor nivel de automatización es capaz de tener unos buenos resultados sin información adicional, unas características que lo hacen idóneo para trabajar en zonas amplias.

Por otro lado, la diferencia entre la ortofoto tradicional y la verdadera podría ser más clara y visible si estuviéramos trabajando en una zona con edificios aún más altos.

Por último, se debe resaltar que el volumen de datos y el coste computacional ponen de manifiesto la necesidad de una gestión eficiente de procesadores y archivos.



## Referencias

- Barazzetti, L., Brovelli, M., Scaioni, M., Milano, P., Vinci, L., 2007. Problems related to the generation of true-orthophotos with LIDAR DDSMs. ISPRS Work. Laser Scanning 2007 SilviLaser 2007 20–25.
- Gharibi, H., Habib, A., 2018. True Orthophoto Generation from Aerial Frame Images and LiDAR Data: An Update. *Remote Sens.* 10, 581. <https://doi.org/10.3390/rs10040581>
- Gomez, A., Delgado, J., Perez, N., 2004. Dpto . de Ingeniería Cartográfica – Geodesia – Fotogrametría – Expresión Gráfica Dpto . de Ingeniería Cartográfica , Geodesia y Fotogrametría Alumna Ing . En *Geodesia y Cartografía* 8.
- Jordán Francés, V., 2015. Trabajo de Fin de Grado Aplicación de datos LiDAR del sistema aéreo en la actualización catastral urbana . 1–39.
- Julián, L., Pérez, S., 2005. Ortofoto verdadera ( True-Ortho ) y Lidar , el posible futuro de la cartografía catastral urbana. *CT Catastro* 53, 131–154.
- Kraus, K., Kraus, K., 2007. *Photogrammetry , Part one , Fundamentals and Standard Processes Osnove i standardni procesi* 9.
- Kwak, E., Al-Durgham, M., Habib, A., 2012. Automatic 3D Building Model Generation From Lidar and Image Data Using Sequential Minimum Bounding Rectangle. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XXXIX-B3, 285–290. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxix-b3-285-2012>
- Manual, R., n.d. MATCH-3DX MATCH-T DSM.
- Mikhail, E.M., 2001. *Introduction to Modern Photogrammetry/* Edward M. Mikhail, James S. Bethel, J. Chris McGlone.
- Mozo, M.C., Alconada, M.I.M., 2014. Control De Calidad Del Vuelo Lidar Utilizado Para La Modelización 3D De Las Fallas De Alhama (Murcia) Y Carboneras (Almería).
- Nagashree, 2016. A Survey on SAR image Georegistration and Orthorectification. *Int. J. Mech. Eng. Inf. Technol.* 04, 1766–1772. <https://doi.org/10.18535/ijmeit/v4i9.05>
- Nielsen, M., 2004. SharpGIS True Orthophoto Generation 142.
- Novak, K., 1992. Rectification of Digital Imagery 58, 339–344.
- Quirós, E., 2014. *Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicadas a la ingeniería civil.*
- Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S., Kubik, K., 2005. Using the Dempster-Shafer method for the fusion of LIDAR data and multi-spectral images for building detection. *Inf. Fusion* 6, 283–300. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2004.06.004>
- Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S., Kubik, K., 2003. Building Detection Using LIDAR Data and Multi-spectral Images. *Proc. VIIth Digit. Image Comput. Tech. Appl.* 10–12.
- Soria, B.M., Gómez, A., 2014. Metodología Para Ejecución Y Control De Calidad Para Ortofotos , Mediante Combinación De Sensor Digital Con Lidar En Zonas Rurales . Para Ortofotos , Mediante Combinación De Sensor. *Univ. Politécnica Madrid* 1–223.



- Vozmediano Montoya, D., 2006. Fotogrametría digital aplicada a la obtención de ortofotos y modelos digitales del entidades patrimoniales 215.
- Wiedemann, A., 2014. Digital Orthoimages in Architectural Photogrammetry Using Digital Surface Models.
- Wiedemann, A., Beckmann, S., 2016. Quality Aspects Of Aerial Digital Orthophotos, The Producers Point Of View 1. QUALITY OF ORTHOIMAGES 1.1 Function of Digital Orthophotos (DOPs). Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 12–19.  
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B2-449-2016>

### **Páginas web**

- (ArcGIS, 2016). Tipos De LIDAR. Disponible online en:  
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/manage-data/las-dataset/types-of-lidar.htm>
- (ASPRS, 2011). Las Specification Version 1.4 – R6 15 August 2011. Disponible online en: [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS\\_1-4\\_R6.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS_1-4_R6.pdf)
- (GeoHub, 2017). Lidar Survey: Gaining a Better Understanding. Disponible online en: <https://geohubkenya.wordpress.com/2017/08/13/lidar-survey-gaining-a-better-understanding/>
- GeoTool Box Ibérica SL. Comprobaciones Del Resultado De La Aerotriangulación Con Match-AT. Disponible online en: <http://www.gtbi.net/wp-content/plugins/gallery/uploads/pdf/7231415201053.pdf>
- (Northern Advocate, 2017). Northland Mapped From Above In 3D With LiDAR. Disponible online en: [https://www.nzherald.co.nz/northern-advocate/news/article.cfm?c\\_id=1503450&objectid=11915487](https://www.nzherald.co.nz/northern-advocate/news/article.cfm?c_id=1503450&objectid=11915487)

## Anexo I: Análisis comparativa de softwares comerciales de fotogrametría

### Tabla 1

Software		3D Zephyr Aerial	ContextCapture	Inpho Suite version 9	Metashape ( versión 1.5 de PhotoScan)
<b>Fabricante</b>		3Dflow	Bentley Systems	Trimble	Agisoft LLC
<b>Fuentes de imagen soportadas</b>		-UAV -Aerotransportada (Pixel size must be higher than 2 µm)	-Cámara digital (cualquiera) - Cámara térmica -Aerotransportada ( se recomienda un solape longitudinal del 80% y un solape lateral del 50% o más ) - UAV / dron (Más adecuado) -Smartphone	-Cámara digital - Cámara analógica -Aerotransportada -Satélite -UAV	-Scanned analogue -Digital Imágenes (multiespectrales) -Imágenes térmicas
<b>Imágenes soportadas</b>	Analógicas escaneadas	Si	No	Si	Si
	Digital Aerial Nadir Frames	SI	Si	Si	Si
	Oblicuas	Si	Si	No	Si
	Barrido lineal (Pushroom)	Si	Si	Si	No
	Satelitales ópticas	No	No	Si	No
	UAS	Si	Si	Si	Si
	Radar	No	No	No	No
<b>Tipo</b>		Ámbito cercano , fotografías aéreas	Ámbito cercano , fotografías aéreas	Ámbito cercano , fotografías aéreas	Ámbito cercano , fotografías aéreas

<b>Puntos de apoyo (GCP)</b>	Medición	Si	Si	Si (posibilidad de un ajuste libre sin puntos de apoyo para triangulaciones de satélite )	Si
	Edición	Si	Si	Si	Si
<b>Sparse point cloud</b>	Medición	Si (Se recomienda disminuir la densidad de los puntos por un solape alto (70%-80%))	Si	Si	Si
	Edición	Si	Si	Si	Si
<b>Aerotriangulación</b>		Si	Si	Si (mediante el modulo MATCH-AT )	Si
<b>Instalaciones de control (edición de DEM)</b>		-	No	Si	No
<b>Extracción automática de breaklines</b>		-	No	No	No
<b>Mosaico de ortoimágenes</b>		Si	No	Si ( mediante el módulo OrthoVista )	Si
<b>Creación automática de la línea de costura.</b>		Si	No	Si	Si
<b>Soporte de escaneo laser</b>		Si	Si (solo PTX y los formatos de archivo E57 son compatibles)	Si	Si
<b>Numero de imágenes</b>		Ilimitado	≤ 300 gigapixels		50 000+ fotos
<b>Mallas texturizadas</b>		Si	Si	Si	Si

<b>Combinación de imágenes diferentes sensores</b>		Si mejores resultados usando la misma cámara con la misma distancia focal	Si ( La resolución y el ángulo de visión de las dos fotos no deben ser demasiado diferentes )	Si	Si
<b>Bounding box</b>	Medición	Si	Si	Si	Si
	Edición	Si	Si	Si	Si
<b>Informe final del proceso</b>		Si	-	-	Si
<b>Exportación de productos intermedios</b>		Si	Si	-	Si
<b>Calibración cámara</b>	automática	Si	Si	Si	Si
	Manual	Si	Si	Si	Si
<b>MDS</b>		Si	Si	Si	Si
<b>DEM</b>		Si	Si	Si	Si
<b>Extracción de MDT</b>		Si	Si	Si	Si
<b>Dense point cloud</b>		Si	Si	Si ( generación por el método “Semi Global Matching (SGM)” mediante el modulo MATCH-3DX), edición por el módulo DTMaster Stereo	Si
<b>Medición</b>	Área	Si	Si	Si	Si
	Volumen	Si	Si	-	Si
	Distancia	Si	Si	-	Si
<b>Generación de malla ( Mesh )</b>		Si	Si	Si ( mediante el modulo MATCH-3DX )	Si

<b>Generación de textura</b>	Si	Si		Si
<b>Ortofoto</b>	Si (a partir de Dense point clouds y el Sparse point cloud )	Si	Si ( Basado en imágenes aéreas y satelitales, mediante el módulo OrthoMaster.	Si
<b>True Ortofoto</b>	Si ( a partir de la malla= Mesh)	Si	Si (basado en imágenes aéreas (Frame) Mediante el modulo MATCH-3DX)	Si
<b>Fusionar proyectos</b>	Si	Si	-	Si
<b>Tutorial</b>	<a href="https://www.3dflow.net/technology/documents/3d-zephyr-tutorials/">https://www.3dflow.net/technology/documents/3d-zephyr-tutorials/</a> <a href="http://3dflow.net/zephyr-doc/3DF%20Zephyr%20Manual%204.300%20English.pdf">http://3dflow.net/zephyr-doc/3DF%20Zephyr%20Manual%204.300%20English.pdf</a>	<a href="https://www.bentley.com/-/media/3dca09466818457fb9b7c72ada8e8e97.pdf">https://www.bentley.com/-/media/3dca09466818457fb9b7c72ada8e8e97.pdf</a>	Manual, R., n.d. MATCH-3DX MATCH-T DSM.	<a href="https://www.agisoft.com/pdf/metashape_1_5_en.pdf">https://www.agisoft.com/pdf/metashape_1_5_en.pdf</a>
<b>Control de calidad</b>	-	Si ( mediante un informe de calidad )	-	Si
<b>Proceso de fondo</b>	Si	Si	-	Si
<b>SDK / Python scripting</b>	-	No	-	Si
<b>Interoperabilidad CAD , GIS</b>	Si	Si	Si	Si
<b>Licencia de evaluación</b>	Si (14 días)	Si (7 días)	Si (30 días)	Si (en modo demo (las funciones de exportación y guardado están bloqueadas) o en modo de función completa con una

				licencia de prueba de 30 días de forma gratuita. No se utilizará con fines comerciales.
<b>Precio</b>	€3900 + vat	Bajo pedido	-	\$3499 (Edición Professional )

**Tabla 2**

Software		SURE Aerial	RealityCapture	DroneDeploy	PhotoModeler
<b>Fabricante</b>		nFrames GmbH	Capturing Reality	DroneDeploy	Eos Systems - PhotoModeler
<b>Fuentes de imagen soportadas</b>		-Airborne large and medium frame -UAV -Mobile mapping	-Fotografías terrestres -Fotografía aérea -UAV -Escaneo láser.	Cualquier imagen aérea de cualquier avión no tripulado (UAV) o avión tripulado.	-Cámaras digitales, -Cámaras de video, -Cámaras de drones, -Películas escaneadas. -Escaneo láser.
<b>Tipo</b>		Ámbito cercano , fotografías aéreas	Ámbito cercano , fotografías aéreas	Fotografías aéreas	Ámbito cercano , fotografías aéreas , UAS
<b>Imágenes soportadas</b>	Analógicas escaneadas	Si	Si	Si	Si
	Digital Aerial Nadir Frames	Si	Si	Si	Si
	Oblicuas	Si	Si	Si	Si
	Barrido lineal (Pushroom)	No	No	Si	No
	Satelitales ópticas	No	Si	Si	No
	UAS	Si	Si	Si	Si
	Radar	No	No	No	No
<b>Puntos de apoyo</b>	Medición	Si	Si	Si	Si
	Edición	Si	Si	Si	Si
	Medición	Si	Si	Si	Si

Software		SURE Aerial	RealityCapture	DroneDeploy	PhotoModeler
<b>Sparse point cloud</b>	Edición		Si		
<b>Aerotriangulación</b>		No	Si	Si	Si
<b>Instalaciones de control (edición de DEM)</b>		Si	-	Si	Si
<b>Extracción automática de breaklines</b>		No	-	Si	No
<b>Mosaico de ortoimágenes</b>		Si	Si	Si	Si
<b>Creación automática de la línea de costura.</b>		Si	-	Si	No
<b>Soporte de escaneo laser</b>		--	Si	-	Si
<b>Extracción semiautomática de edificios</b>		No	-	Si	No
<b>Numero de imágenes</b>		Ilimitado	Ilimitado	-	-
<b>Combinación de imágenes diferentes sensores</b>		-	Si	-	-
<b>Bounding box</b>	Medición	-	-	-	-
	Edición	-	-	-	-
<b>Informe final del proceso</b>		-	-	-	-
<b>Exportación de productos intermedios</b>		Si	Si	Si	Si
<b>Calibración cámara ( O.I)</b>	automática	Si	Si	Si	Si
	Manual	Si	Si	Si	Si
<b>MDS</b>		Si	Si	Si	Si
<b>DEM</b>		Si	Si	Si	Si
<b>Extracción MDT</b>		No	Si	Si	Si



Software		SURE Aerial	RealityCapture	DroneDeploy	PhotoModeler
<b>Dense point cloud</b>		Si	Si	Si	Si
<b>Medición</b>	Área	Si	Si	Si	Si
	Volumen	No	Si	Si	Si
	Distancia	Si	Si	Si	Si
<b>Generación de malla ( Mesh)</b>		Si	Si	-	Si
<b>Generación de textura</b>		Si	Si	Si	Si
<b>Ortofoto</b>		Si	Si	-	Si
<b>True Ortofoto</b>		Si	Si	Si	Si
<b>Fusionar proyectos</b>		--	-	-	-
<b>Tutorial</b>		<a href="https://www.youtube.com/watch?v=WMIbOV0_4ag">https://www.youtube.com/watch?v=WMIbOV0_4ag</a>	<a href="https://support.capturingreality.com/hc/en-us/articles/115002328751-Orthographic-projections-in-RealityCapture">https://support.capturingreality.com/hc/en-us/articles/115002328751-Orthographic-projections-in-RealityCapture</a>	-	<a href="https://www.photomodeler.com/tutorial-videos/">https://www.photomodeler.com/tutorial-videos/</a>
<b>Control de calidad</b>		-	Si	-	-
<b>Proceso de fondo</b>		-	Si	-	-
<b>SDK / Python scripting</b>		-	Si	-	Si
<b>Interoperabilidad CAD , GIS</b>		Si	Si	Si	Si
<b>Licencia de evaluación</b>		Si (14 días, uso no comercial e investigación)	Si (45 días)	Si (14 días)	Sí (Modo de demostración gratuita de no guardar, o prueba gratuita de 30 días con todas las funciones).
<b>Precio</b>		-	desde \$99/ 3 - meses	\$83/mes	desde \$ 49 / mes