



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Trabajo Fin de Grado

# **GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO Y DE SUPERFICIES A PARTIR DE INFORMACIÓN CAPTURADA POR SENSORES LIDAR AEROTRANSPORTADOS**

**Alumno: Fº Javier Extremera Jiménez**

Tutor: Prof. D. Jorge Delgado García

Dpto: Ingeniería Cartográfica, Geodésica y  
Fotogrametría

**OCTUBRE, 2019**



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**Departamento Ingeniería Cartográfica, Geodésica y  
Fotogrametría**

Dr. D. Jorge Delgado García, tutor del Trabajo Fin de Grado titulado:

**GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO Y  
DE SUPERFICIES A PARTIR DE INFORMACIÓN  
CAPTURADA POR SENSORES LIDAR  
AEROTRANSPORTADOS**

Que presenta F<sup>o</sup> Javier Extremera Jiménez, autoriza su presentación para  
Defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior.

Jaén, octubre de 2019

**Alumno:**

**Tutor:**

**F<sup>o</sup> Javier Extremera Jiménez**

**Prof. D. Jorge Delgado García**

## **Agradecimientos**

A la Subdirección General de Innovación Tecnológica e Información Urbanística, Departamento de Cartografía e Información Urbanística perteneciente al Área de Gobierno de Desarrollo Urbano del Excmo. Ayuntamiento de Madrid por la cesión de la información con la que se ha realizado el presente Trabajo Fin de Grado.

A mi tutor Prof. Dr. Jorge Delgado García, Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría de la Escuela Politécnica Superior de Jaén, por dirigir y resolver en todo momento las dudas que le iba planteando durante la realización del proyecto.

A mis padres, familiares y amigos más cercanos, por estar siempre apoyándome en todo lo que hago.

## Índice

1. INTRODUCCIÓN .....	12
1.1. Objetivos .....	13
1.2. Interés .....	14
1.3. Estructura de la memoria.....	15
2. ANTECEDENTES .....	17
2.1. Fotogrametría.....	17
2.2.1. Situación actual .....	18
2.2. LIDAR .....	19
2.2.1. Situación actual .....	21
2.3. Metodologías para la obtención y edición de las nubes de puntos .....	21
2.3.1. Proceso fotogramétrico sobre imágenes digitales .....	21
a) Métodos de matching.....	22
2.3.2. Métodos de clasificación de puntos.....	25
a) Métodos de filtrado.....	25
b) Métodos de clasificación .....	25
2.4. Modelos digitales del terreno .....	29
2.4.1 Estructura de los modelos digitales .....	29
2.5. Métodos de rectificación digital .....	30
2.5.1. Técnicas de remuestreo .....	31
3. ZONA DE ESTUDIO .....	33
4. METODOLOGÍA .....	35
4.1. Fotogrametría.....	35
4.1.1. Zona objeto del proyecto fotogramétrico .....	35
4.1.2. Medios Técnicos.....	36
a) Aeronave.....	36
b) Sensores.....	37
• Cámara .....	38
• Sistema GPS/INS .....	41
4.1.3. Esquema de trabajo .....	42
- Orientación interna.....	46
- Orientación externa .....	46
4.2. LiDAR .....	48

4.2.1.	Zona objeto del proyecto LiDAR.....	48
4.2.2.	Medios Técnicos.....	48
a)	Aeronave.....	48
b)	Sensores.....	49
-	Sensor LIDAR.....	49
-	Sistema GPS/INS.....	49
4.2.3.	Esquema de trabajo.....	50
4.3.	Obtención de los modelos digitales de superficie y del terreno.....	53
4.3.1.	Fotogrametría.....	53
4.3.2.	LIDAR.....	54
4.4.	Obtención de Ground Ortho y True Ortho.....	54
4.5.	Software y recursos utilizados.....	57
5.	APLICACIÓN.....	60
5.1.	Obtención de los MDS y MDT a partir del bloque de imágenes.....	60
5.1.1.	Datos de partida.....	60
5.1.2.	Definición del proyecto e importación de los datos de partida.....	66
-	Importación de imágenes.....	67
-	Importación de la cámara.....	67
-	Creación de la pirámide de imágenes.....	67
-	Importación de los puntos de control.....	67
5.1.3.	Orientación.....	67
5.1.4.	Obtención de las nubes de puntos 3D.....	71
5.1.5.	Edición de los MDS.....	73
5.2.	Obtención de los MDS y MDT a partir de LiDAR.....	77
5.2.1.	Datos de partida.....	77
5.2.2.	Generación de los modelos digitales de superficies.....	78
5.2.3.	Edición de los modelos digitales de superficies.....	80
5.3.	Generación de Ground Orto y True Ortho.....	82
6.	RESULTADOS.....	87
6.1.	Control de calidad de la coordenada Z en los puntos pertenecientes al MDS obtenido por fotogrametría.....	87
6.1.1.	Selección y obtención de las diferencias en Z.....	88
6.1.2.	Evaluación de la calidad en la componente Z.....	91
6.2.	Control de calidad de las ortoimágenes.....	94
6.2.1.	Calidad radiométrica.....	94
6.2.2.	Calidad geométrica.....	94

6.2.3. Calidad posicional .....	95
6.3. Creación del Ortofotomapa .....	102
7. CONCLUSIONES .....	105
Bibliografía .....	112

## Índice de figuras

Figura 1. Diferentes retornos de la señal.....	19
Figura 2. Emisión y recepción del haz de luz .....	20
Figura 3. Componentes de un sistema ALS.....	20
Figura 4. Geometría epipolar.....	22
Figura 5. Punto erróneo en base a sus vecinos.....	25
Figura 6. Comunidad de Madrid. Término municipal de Madrid y situación de Vicálvaro.....	33
Figura 7. Detalle de la zona, GSD de la imagen original de 0.25 m .....	34
Figura 8. Esquema de vuelo .....	36
Figura 9. Desplazamiento en el plano de la imagen debido al relieve.....	38
Figura 10. Residuales distribuidos por la imagen.....	40
Figura 11. Esquema de trabajo del sistema inercial IMU.....	42
Figura 12. Sistema GPS/INS con el que se obtienen los POE .....	45
Figura 13. Aerotriangulación por ajuste de haces .....	47
Figura 14. Aeronave con los sensores haciendo un barrido láser .....	50
Figura 15. Fases en la rectificación diferencial por el método indirecto .....	55
Figura 16. Estación fotogramétrica. ....	58
Figura 17. Histograma.....	63
Figura 18. Fichero de cámara empleado por SOCET SET.....	64
Figura 19. Distribución de los puntos de control (esquinas superior e inferior y zona centro).....	65
Figura 20. Modelo generado con NGATE .....	73
Figura 21. Edición de una zona plana eliminando puntos groseros y después suavizándola .....	75
Figura 22. Edición de zonas entre edificios utilizando líneas de rotura .....	75
Figura 23. MDS a partir del tratamiento bloque de imágenes, con el uso del software Socet Set .....	76
Figura 24. Obtención del MDT.....	76
Figura 25. MDT a partir del tratamiento del bloque de imágenes con el uso del software Socet Set y LasTools.....	77
Figura 26. Nube de puntos inicial sin clasificar .....	78
Figura 27. Clasificación de los puntos pertenecientes al terreno (marrón) .....	79
Figura 28. Jerarquía de objetos .....	79
Figura 29. Clasificación de los puntos pertenecientes a árboles y construcciones.....	80
Figura 30. Puntos clasificados correctamente.....	81
Figura 31. MDS a partir de LIDAR con el uso del software LasTools .....	81
Figura 32. MDT a partir de Lidar con el uso del software LasTools .....	82
Figura 33. Discontinuidades geométricas .....	85

Figura 34. Mosaico inicial .....	85
Figura 35. Mosaico final.....	86
Figura 36. Esquema para la obtención de las diferencias en Z.....	88
Figura 37. Archivo compuesto por los puntos pertenecientes al terreno y las edificaciones.....	89
Figura 38. Fichero resultante con las columnas dZ, Z1, X, Y y Z2 .....	89
Figura 39. Modelo Normalizado.....	90
Figura 40. Distribución de los puntos de control .....	96
Figura 41. Número de puntos dentro de los intervalos de Diferencias en X .....	97
Figura 42. Número de puntos dentro de los intervalos de Diferencias en Y .....	97
Figura 43. Número de puntos dentro de los intervalos de Diferencias en planimetría (XY).....	98
Figura 44. Componente planimétrica del error XY .....	98
Figura 45. Esquema de distribución del ortofotomapa.....	102
Figura 46. Obtención de la declinación y su variación .....	104
Figura 47. Puntos LiDAR (izq), obtenidos por correlación de imágenes (centro), imagen (der).....	107
Figura 48. Diferencia entre ortoimágenes generadas con distintos MDS .....	111

## Índice de tablas

Tabla 1. Características del avión utilizado.....	37
Tabla 2. Características generales de los sensores utilizados.....	37
Tabla 4. Parámetros de la cámara utilizada .....	38
Tabla 3. Cálculo del desplazamiento debido al relieve .....	39
Tabla 5. Características generales de los dos vuelos .....	39
Tabla 6. Error medio cuadrático de las coordenadas de los diferentes puntos en ambos vuelos .....	40
Tabla 7. Distancias entre GPS, IMU y el centro de proyección de la cámara .....	41
Tabla 8. Características del vuelo fotogramétrico .....	43
Tabla 9. Coordenadas y plano de situación de las estaciones de referencia terrestre .....	45
Tabla 10. Características del sensor Lidar ALS70-HP.....	49
Tabla 11. Características del bloque.....	60
Tabla 12. Recubrimientos reales.....	61
Tabla 13. GSD a diferentes alturas.....	61
Tabla 14. Variación del GSD entre un edificio y el terreno.....	62
Tabla 15. Tamaño de las imágenes .....	62
Tabla 16. Parámetros de orientación externa iniciales (POE).....	64
Tabla 17. Error medio cuadrático de las coordenadas de los foto-centros .....	65
Tabla 18. Error medio cuadrático de los ángulos .....	65
Tabla 19. Coordenadas de los puntos de control.....	66
Tabla 20. Integración de las posiciones GNSS en el ajuste de bloques.....	66
Tabla 21. Informe de residuos, por imagen .....	71
Tabla 22. Parámetros de orientación externa finales .....	71
Tabla 23. Coordenadas de las esquinas de los modelos y distribución de ellos .....	72
Tabla 24. Valores y estadísticas de cada modelo .....	92
Tabla 25. Valores y estadísticas del conjunto .....	92
Tabla 26. Estadísticos para ver si hay errores sistemáticos .....	93
Tabla 27. Estadísticos para ver si el error aleatorio es aceptable.....	93
Tabla 28. Estándar NSSDAz .....	93
Tabla 29. Coordenadas de los puntos en la ortofoto y en el catastro y sus diferencias.....	97
Tabla 30. Errores en X, Y y componente horizontal de los errores .....	99
Tabla 31. Valores estadísticos de la muestra .....	100
Tabla 32. Estadísticos para ver si hay errores sistemáticos .....	100
Tabla 33. Estadísticos para ver si el error aleatorio es aceptable.....	101

Tabla 34. Izquierda comprobando la aleatoriedad de los datos y derecha que no hay atípicos .....	101
Tabla 35. Estándar NSSDAh.....	102

## Índice de abreviaturas

ALS	Escáner Láser Aerotransportado
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
GMT	Hora del Meridiano de Greenwich
GNSS	Global Navigational Satellite System
GSD	Ground Sample Distance
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IMU	Unidad de Medición Inercial
INS	Sistema Inercial de Navegación
IPM	Interactive Point Measurement
kHz	kilohercio
LAS	Log ASCII Standard
LiDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
MDS	Modelo Digital de Superficie
MDT	Modelo Digital del Terreno
PC	Puntos de Control
PNOA	Programa Nacional de Ortofotografía Aérea
QGIS	Quantum GIS
RGB	Red, Green, Blue
RMS	Error Medio Cuadrático
SfM	Structure from Motion
SIG	Sistema de Información Geográfica
TIN	Red de Triángulos Irregulares
UTC	Tiempo Universal Coordinado
UTM	Universal Transversal Mercator

## 1. INTRODUCCIÓN

Los productos cartográficos siempre han sido requeridos para todo tipo de proyectos de ingeniería, en la actualidad más de la mitad de la población a nivel mundial vive en núcleos urbanos por tanto el desarrollo de las urbes está aumentando de forma significativa lo que da lugar a que cada vez sea más necesaria una cartografía ajustada a las necesidades de gestión de dichos territorios y en constante actualización, debido a los importantes cambios que se producen en esas áreas.

En cartografía urbana obtener modelos 3D nos permite realizar aplicaciones para la gestión del planteamiento urbanístico, control de tráfico, estudios de contaminación del aire, acústicos y para uso en proyectos arquitectónicos permitiendo analizar y evaluar un proyecto dentro del núcleo urbano para ver los cambios y el impacto en su entorno de actuación.

Los modelos 3D urbanos son fundamentales para la gestión de los fenómenos que se desarrollan en las ciudades inteligentes (Smart Cities), por tanto, la gestión inteligente se basa fundamentalmente en el tratamiento de la información y en ese sentido, la información geográfica supone un elemento básico para el desarrollo de dicho tipo de proyectos y sus aplicaciones.

Es importante el empleo de la información 3D, ya que permite situar los fenómenos que se producen en una ciudad y poder analizarlos, obteniendo información valiosa a la hora de gestionar y planificar los procesos de transformación urbana.

En la actualidad la realización de modelos urbanos 3D se puede llevar a cabo a partir de la gran cantidad de datos disponibles de diferentes fuentes de captura que disponen de dispositivos como cámaras fotogramétricas o sensores LiDAR aerotransportado de última generación, junto con sistemas de posicionamiento GPS e inerciales INS/IMU.

El tratamiento de imágenes fotogramétricas capturadas por cámaras digitales dentro de la región del visible (o incorporando IR próximo) va evolucionando, además hoy en día se obtienen imágenes con muy buena calidad métrica, es decir, unas distorsiones mínimas del formato y gran resolución espacial, ocurre lo mismo con los sensores LiDAR aerotransportados o terrestres, en este último caso, tanto estáticos como móviles, que permiten densidades de

puntos, frecuencia y ángulo de escaneado (FOV) cada vez mayores, minimizando los errores en la toma de datos. A ello se le suma la evolución del GNSS y de los sistemas inerciales de navegación IMU.

Además, la evolución en la potencia de los procesadores, la mejora en la resolución de las cámaras, la mayor capacidad de cálculo y de almacenamiento han hecho que técnicas como Structure from Motion (SfM) hayan evolucionado, posibilitando el procesamiento de grandes bloques para obtener modelos de alta densidad, y se estén usando en la actualización de los modelos 3D urbanos, entre otras muchas aplicaciones, con una calidad moderada, de forma rápida, eficaz y económica.

Por todo lo anterior, en el presente Trabajo Fin de Grado se va a llevar a cabo una comparativa y control de calidad entre los modelos del terreno y de superficies obtenidos a partir del procesado de datos capturados mediante técnicas láser, por un sensor LiDAR aerotransportado y a partir de metodologías fotogramétricas sobre un bloque de imágenes capturadas por una cámara fotogramétrica.

## **1.1. Objetivos**

El objetivo principal de este TFG es la comparativa entre los Modelos Digitales de Superficie y los Modelos Digitales Terreno, generados a partir del procesado de los datos obtenidos por las metodologías de captura de puntos 3D a partir de técnicas láser (LiDAR) y técnicas basadas en la aplicación de metodologías fotogramétricas sobre imágenes.

Un Modelo Digital del Terreno (MDT) se define según (Felicísimo, 1994) como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable continua y cuantitativa. Un Modelo Digital de Superficie (MDS) es una descripción geométrica de la superficie y de los elementos localizados sobre ella, como edificios y árboles (Haala et al., 1999; Priestnall et al., 2000)

El MDT es un MDE enriquecido con elementos de interés del terreno, mientras que hay autores como Felicísimo (1994) que considera que el MDT es un concepto que abarca cualquier representación de variables sobre el terreno, siendo los MDE un determinado tipo de MDT.

Para conseguir este objetivo principal se tienen que desarrollar los siguientes objetivos específicos:

- Filtrado y clasificación de la nube de puntos obtenida a través de técnicas láser, a partir de la ejecución de una serie de técnicas aplicadas sobre los puntos. El fin es la clasificación de los puntos en diferentes categorías (terreno, edificaciones y vegetación) para poder llevar a cabo las siguientes fases.
- Procesado del bloque fotogramétrico conformado por 15 fotogramas, dividido en 3 pasadas y cada una compuesta por 5 fotos, mediante técnicas fotogramétricas aplicadas al bloque de imágenes.
- Obtención de los Modelos Digitales de Superficie y de Terreno a partir del procesado y edición de las nubes de puntos, obtenidas a partir de la clasificación y filtrado de los puntos LiDAR y a partir de correlación automática sobre el bloque de imágenes, e imposición de un paso de malla y estructura determinada.
- Análisis y comparación entre los Modelos Digitales derivados a partir del procesado de los datos obtenidos por ambas técnicas.
- Obtención de las Ground Ortho y True Ortho de una zona delimitada dentro de la extensión del proyecto, a partir de los Modelos Digitales de Superficie y del Terreno generados.

## 1.2. Interés

Todos los estudios acerca de la información que manejan las entidades de la administración pública indican que más de los 80% de los datos poseen componente geográfica. Además de la calidad, la actualización es una característica importante dentro del concepto de Smart City y de sus aplicaciones. Es importante tener la calidad requerida y también lo es su actualización, esto se está llevando a cabo mediante el uso de nuevas técnicas como SfM y a través de la explotación de los datos disponibles en nuestro país, en este caso PNOA-10, obtenidos a partir de vuelos con sistema GPS/INS y sensor LiDAR o cámara fotogramétrica o con una combinación de ambos, consiguiendo tener modelos 3D urbanos actualizados con relativa rapidez, con un menor coste y que los productos derivados puedan ser utilizados en multitud de ámbitos, tanto en proyectos de ingeniería, evolución del catastro y, en este caso, para desarrollar cartografía urbana, modelización 3D de su núcleo, relación con las Smart Cities e incluso como fuente de información para los BIM.

Por tanto, en el presente Trabajo Fin de Grado se pretende mostrar la obtención de datos 3D a partir de sensores láser aerotransportados LiDAR, su procesado para la obtención de productos derivados y exponer que es una técnica con innumerables aplicaciones dentro del

ámbito de la Geomática, por lo que sería interesante que cobrara más protagonismo dentro del plan de estudios del Grado de Ingeniería Geomática.

### **1.3. Estructura de la memoria**

El trabajo se divide en 7 bloques, los 3 primeros proporcionan información de interés a cerca del trabajo, de la evolución experimentada en las técnicas empleadas y de la zona que va a ser objeto del proyecto:

- 1. Introducción: Se hace una breve reseña de las técnicas y medios que se van a emplear, los objetivos principales y secundarios del proyecto y el interés que puede tener este tipo de trabajos en diferentes ámbitos.
- 2. Antecedentes: Expone de forma somera la evolución que ha experimentado la Fotogrametría desde sus inicios, la irrupción del LiDAR y las posibilidades que pueden tener ambas técnicas hoy en día.
- 3. Zona de estudio: En este capítulo se hace una breve descripción de la zona objeto del proyecto.

Los siguientes 4 capítulos son los principales dentro del presente proyecto:

- 4. Metodología: Se describe el material utilizado para la captura de los datos y los principios teóricos de cada fase hasta la obtención de los productos finales.
- 5. Aplicación: En este apartado se describen las fases y metodologías llevadas a cabo para la obtención de los productos finales a partir de puntos 3D obtenidos por técnicas láser y a partir de un bloque fotogramétrico con sus parámetros de orientación externa iniciales.
- 6. Resultados: Contiene los pasos y metodologías seguidas en el tratamiento de las nubes de puntos para la obtención de los Modelos Digitales y la comparación entre ellos, así como un control de calidad, un análisis de cuál es el mejor método para la obtención de modelos digitales y la influencia del empleo de un modelo u otro en la generación de ortofotos.
- 7. Conclusiones: Expone comentarios de interés a cerca de los resultados obtenidos; en las comparaciones entre los Modelos Digitales obtenidos por ambas

metodologías, en la generación de las ortoimágenes, en los controles de calidad realizados y las conclusiones a las que se ha llegado en vista de los resultados.

## 2. ANTECEDENTES

El desarrollo y expansión de la telefonía móvil, así como el querer estar conectados a servicios y tecnologías GPS y a multitud de aplicaciones que tienen como una de sus bases la componente posicional, hizo y hace que se esté investigando en la generación de modelos 3D urbanos con el fin de obtenerlos con una mayor calidad y a menor coste.

En los últimos años el desarrollo del software, la evolución de los procesadores y de los sensores tanto láser como fotogramétricos y la aparición de nuevas técnicas de toma de datos, ha dado lugar a que la generación y actualización de modelos digitales para su uso en diferentes ámbitos se esté consiguiendo con relativa rapidez a un coste contenido y con una calidad adecuada.

A continuación se hace una descripción de la evolución de la Fotogrametría a partir de imágenes y la Fotogrametría a partir de información LiDAR.

### 2.1. Fotogrametría

La fotogrametría, que según la ASPRS es *“el arte, ciencia y tecnología para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos”* nació allá por el 1858 cuando el militar francés Aimé Laussedat obtuvo planos de pequeñas zonas y de edificios a partir de fotografías, dando así comienzo la fotogrametría terrestre. Con el paso de los años la técnica y los medios fueron evolucionando, se empezaron a utilizar globos aerostáticos para la toma de fotografías aéreas, pero no fue hasta la invención del avión y el estallido de la I Guerra Mundial cuando empezó a tomar relevancia, los mayores avances se registraron en el periodo previo a la II Guerra Mundial y después de otras guerras como la de Corea. Es a partir de la II Guerra Mundial cuando se empezó a emplear de forma masiva en la generación de información cartográfica alrededor de todo el mundo.

A partir de los años sesenta apareció la fotogrametría analógica que aplicaba los modelos matemáticos a los objetos físicos, está dio paso a partir en la década de los noventa a la fotogrametría digital, que se ha estado sirviendo de ordenadores, programas informáticos e imágenes digitales desde entonces y ha ido evolucionando a la par que ellos.

A partir del año 2000 aparecieron las cámaras digitales de Leica y de ZI, pero es en 2004 cuando se produce un cambio en la aceptación de estas cámaras y es cuando se empiezan a comercializar de forma masiva.

Esta aparición da lugar a la desaparición de la imagen analógica y sus limitaciones, como eran el transporte, conservación, almacenamiento y el procesado de estas, como por ejemplo; el escaneo, que daba lugar a errores tanto geométrica como radiométricamente.

También dio lugar a una mayor resolución radiométrica y geométrica, por lo que los procesos de correlación automática de imágenes mejoraban al mismo paso que iban evolucionando las cámaras digitales. Asimismo, se adquieren imágenes pancromáticas y en el canal R, G, B e Infrarrojo cercano, lo que da la posibilidad del uso de las técnicas clásicas de fotogrametría y teledetección.

Aparecen nuevos conceptos, como la combinación en los vuelos de imagen más LiDAR, y nuevos tipos de cámaras que amplían el horizonte de las técnicas fotogramétricas, como es el caso del uso de las cámaras múltiples.

El concepto de calibración cambia completamente, en la época de cámaras analógicas la correspondencia entre la imagen formada por la cámara y la imagen digital no existía, ya que era necesaria la digitalización de la imagen, que podía incorporar componentes de rotación y traslación diferentes en cada imagen. En la cámara digital si existe correspondencia directa entre la imagen formada en la cámara y la imagen digital.

En la actualidad no se necesita revelar la película o digitalizar las imágenes, facilitando la automatización de las fases y dando lugar a un proceso de obtención de productos cartográficos más económico y mucho más rápido.

### **2.2.1. Situación actual**

En los últimos años los avances tecnológicos e informáticos han dado paso a la evolución de la fotogrametría digital, las metodologías fotogramétricas aplicadas a imágenes cada vez son más resolutivas y se obtienen mejores resultados, como es el caso de la correlación automática de imágenes, en la que se establece la correspondencia de un elemento en dos o más fotogramas, lo que permite extraer nubes de puntos 3D densas, de manera ágil y de gran calidad.

Por otra parte, en la actualidad se montan cámaras digitales métricas con unas deformaciones del formato mínimas, el tamaño de las matrices de estos sensores va incrementándose y los tamaños de píxel se van reduciendo, por ello se consiguen resoluciones espaciales de centímetros a alturas de vuelo considerables, como es el caso del vuelo del presente proyecto, realizado a una altura aproximada de 3600 metros sobre el terreno y un GSD de 9 cm. Además la incorporación de focales más largas o que la cámara utilizada sea de alta cadencia permite emplear solapes transversales y longitudinales elevados, que reducen al mínimo las ocultaciones.

Esta evolución está permitiendo que el ámbito de actuación de la fotogrametría no sea sólo para la generación de planos y mapas topográficos, sino que se esté utilizando en arquitectura, arqueología, medio ambiente, en investigación policial y de accidentes, en la industria del videojuego, como base en la creación de aplicaciones para Smart Cities.

## 2.2. LIDAR

El LiDAR (Light Detection And Ranging) es un sensor activo con el que se obtiene la distancia a un objeto emitiendo un haz láser pulsado. La distancia se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada. El pulso láser emitido se divide en tantos retornos como superficies encuentre a su paso, aunque no se suelen registrar más de cuatro o cinco retornos, por ejemplo: el primer retorno coincidiría con la copa de un árbol, los siguientes con varias de sus ramas y el último, si llega la señal, con el terreno.

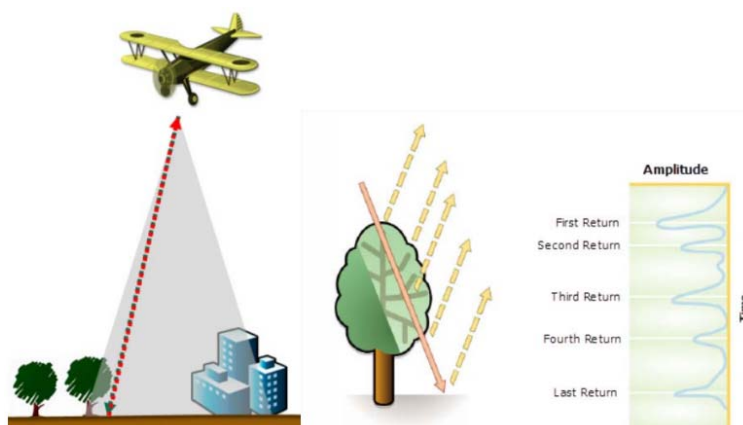


Figura 1. Diferentes retornos de la señal

La unidad de medida láser se divide en un transmisor, un receptor y la óptica de ambas, el escáner láser emite pulsos de alta frecuencia y recoge las reflexiones, obteniendo las mediciones que se utilizan para calcular las coordenadas.

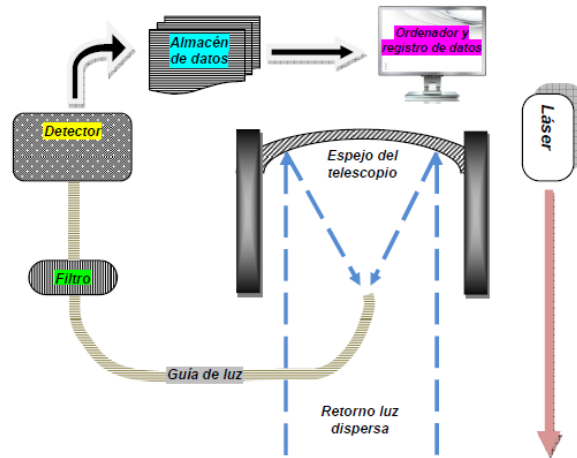


Figura 2. Emisión y recepción del haz de luz

Combinando la unidad de medida láser con la información posicional de la aeronave obtenida a partir de los sensores GPS e INS que lleva acoplados se consiguen las coordenadas tridimensionales de los puntos medidos, además de una serie de atributos como son: valores RGB, ángulo y dirección de escaneo, tiempo GPS, intensidad, número de retorno. La sincronización de todas las unidades es a través de la unidad de control, almacenamiento y procesado.

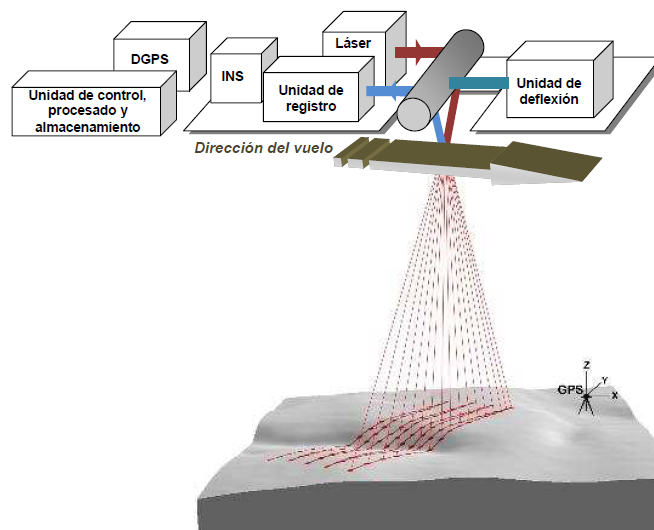


Figura 3. Componentes de un sistema ALS

El LiDAR aparece en los años 70 pero no se le dio uso en cartografía hasta que no se desarrollaron y evolucionaron los sistemas de posicionamiento e inerciales, a partir de ahí fue cuando se empezó a emplear como técnica alternativa para la obtención de cartografía.

En los años 90 se utiliza en investigaciones sobre fotogrametría y es durante esta década cuando empiezan a desarrollarse nuevas técnicas y sensores LiDAR, pero no es hasta este siglo cuando la tecnología LiDAR empieza a evolucionar y a usarse como otra alternativa a la obtención de productos cartográficos

### **2.2.1. Situación actual**

La evolución del sistema de posicionamiento GPS y del sistema inercial de navegación (IMU) permite tener la posición en cada momento del sensor LiDAR aerotransportado con una precisión de centímetros, esto junto con el ángulo de barrido (FOV) hace que se puedan determinar las coordenadas relativas de cada punto con una precisión determinada por: los parámetros de vuelo, el diámetro del rayo láser, la amplitud del ángulo de barrido (FOV), la calidad de los datos de posicionamiento obtenidos por el sistema GPS-IMU, su alineamiento y el post procesamiento.

El nuevo Leica TerrainMapper proporciona exactitudes posicionales verticales en torno a 5cm (1 sigma, es decir, 68%) y horizontales en torno a 14cm (1 sigma). Considerando una altura de vuelo de 1000m y puntos de control con un error en torno a 4cm.

Lo anterior junto con la evolución de los sensores LiDAR, que como en el caso del nuevo Leica SPL-100 puede llegar a medir con una frecuencia de 500 kHz, es decir, puede emitir, recibir y gestionar hasta 500.000 pulsos por segundo, hace que se tengan nubes de puntos densas manteniendo una exactitud adecuada al proyecto.

## **2.3. Metodologías para la obtención y edición de las nubes de puntos**

### **2.3.1. Proceso fotogramétrico sobre imágenes digitales**

Se empezó a trabajar en la correlación de imágenes en los años 50, y se ha ido desarrollando a la par que iban avanzando los medios informáticos, las cámaras, etc.

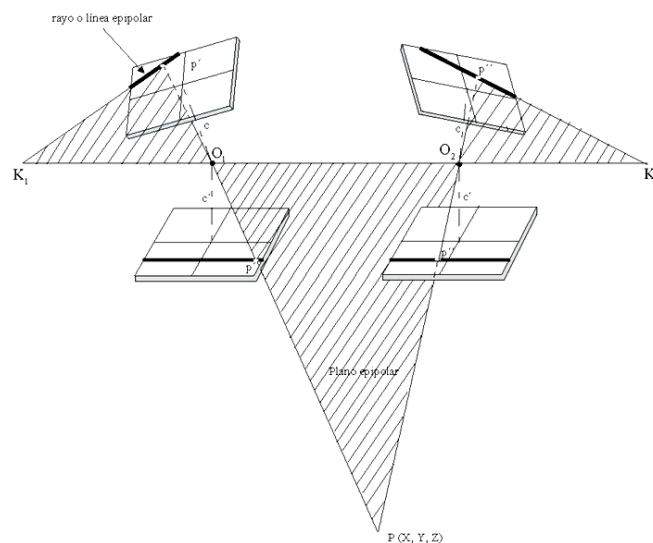
La correlación de imágenes tiene como fin la extracción automática de un punto objeto en una imagen. Es también conocida como “matching”, parte de que se conoce

aproximadamente la ubicación del objeto en la imagen, esta área es la matriz de búsqueda y dentro de ella se encuentran formas que definen el objeto a buscar, a esto se le llama matriz patrón.

La correlación de imágenes es principalmente un proceso en dos dimensiones, pero se puede reducir a la dirección de la línea epipolar, con lo que el trabajo se simplifica en gran medida.

La mayoría de algoritmos utilizados en fotogrametría digital parten de la base de que el par de imágenes presenta geometría epipolar, es decir, los dos ejes de la cámara son paralelos entre si y perpendiculares a la base.

Por tanto las tomas originales se normalizan, es decir, se reconstruyen con geometría epipolar en el espacio objeto y así las líneas epipolares quedan paralelas y los puntos epipolares se proyectan en el infinito.



**Figura 4. Geometría epipolar**

Aplicada la transformación geométrica, se determina el nivel digital que le corresponde a cada pixel a partir de la aplicación de un remuestreo.

#### a) Métodos de matching

- **SfM (Structure for Motion)**

Es un método fotogramétrico automatizado de alta resolución y bajo coste. Se basa en los mismos principios que la fotogrametría estereoscópica clásica, es decir, que la estructura 3D se

puede resolver a partir de una superposición de imágenes obtenidas desde distintos puntos de vista.

El SfM tiene sus orígenes en el campo de la visión artificial y en el desarrollo de los algoritmos de correlación automática de imágenes (CAI) y se diferencia de la fotogrametría convencional, en que la geometría de la escena, las posiciones de la cámara, la orientación y las deformaciones de la misma se resuelven a partir de cálculos computacionales. La técnica SfM permite obtener una nube de puntos 3D con información adicional de los canales RGB.

- **Métodos basados en el área (ABM)**

En base a unos parámetros determinados, se hace una comparación de los niveles digitales entre las imágenes, siempre manteniendo una fija y desplazando las demás hasta conseguir el mejor ajuste.

Son unos algoritmos simples que funcionan muy bien en zonas no homogéneas, obteniéndose con ellos exactitudes elevadas.

Por otra parte, su puesta en funcionamiento en zonas homogéneas da lugar a errores en las medidas y se necesitan tener buenas aproximaciones debido a la gran cantidad de datos que se procesan.

Hay dos métodos que se basan en el área:

- **Método de correlación cruzada**

Calcula el coeficiente de correlación entre los niveles digitales de los píxeles de la ventana patrón y sus semejantes en la ventana de búsqueda. Si se cumplen las condiciones geométricas del modelo da buenos resultados.

Si el ruido es blanco es un buen método para la resolución de ajustes entre las imágenes, pero hay que tener cuidado con el tamaño de las ventanas, ya que incrementan el esfuerzo en el cálculo cuanto mayores son.

- **Método de mínimo cuadrados (LSM)**

Primero se utilizó como una técnica de matching en una dimensión (Forstner, 1982), pero después se desarrolló la versión bidimensional (Grun, 1985; Ackernann, 1984; Pertl, 1984).

LSM, al igual que el método anterior, utiliza una matriz patrón y una de búsqueda que se va desplazando una sobre la otra hasta llegar al mejor ajuste, además añade la inclusión de parámetros para modificar la radiometría y la forma de la ventana móvil con el fin de mejorar el ajuste.

La exactitud del método de mínimos cuadrados, en condiciones ideales, es muy elevada. Que la correlación sea elevada indica que las ventanas son semejante pero no que los puntos sean realmente los homólogos, debido a las oclusiones o la homogeneidad de la zona.

El tamaño de las ventanas es otro factor importante, cuanto más grandes sean hay un mayor consumo de recursos, debido al aumento de observaciones y en teoría, mayor calidad en los resultados. Por otro lado a menor tamaño más velocidad en la resolución, pero con menor robustez debido al aumento de puntos mal correlacionados.

La correlación se ve afectada por los problemas de oclusión que suelen aparecer sobre todo en zonas habitadas con edificios altos, por la existencia de estructuras repetitivas, como pueden ser algunos tipos de cultivos o a zonas de sombras acentuadas, que dan lugar a soluciones erróneas y por las características propias de la imagen.

Con todo lo anterior, el desarrollo de los algoritmos de correlación automática está dando lugar a que se reduzca la edición de imágenes de gran escala en zonas urbanas, se representen los contornos de los edificios cada vez mejor, no haya problemas con las masas de agua, en definitiva cada vez se capturan de forma más correcta los elementos y esto da lugar a que la edición manual vaya disminuyendo, con la reducción de coste que ello supone.

#### - **Métodos basados en entidades (FBM)**

Esta técnica se lleva a cabo en los puntos que destacan de la imagen, se basa en la comparación de los descriptores de los elementos y su principal uso es en la orientación de imágenes.

Se lleva a cabo identificando la porción de la imagen, esta se describe y cada descriptor es comparado con el descriptor de la otra imagen, para ver si los descriptores son similares y hay correlación entre ellos.

Los elementos pueden ser esquinas, pequeños polígonos y bordes, que ofrecen una representación menos variante con respecto a las distorsiones, lo que proporciona una solución más robusta con respecto a los métodos basados en los contrastes de intensidad (ABM) sobre los niveles digitales.

Los métodos basados en entidades (FBM) son más rápidos que los basados en el área (ABM), permiten extraer gran cantidad de entidades y son robustos a las oclusiones parciales, pero tienen una pequeña pérdida de precisión ya que los elementos extraídos no pueden reemplazar a la imagen completa en todos los detalles.

### 2.3.2. Métodos de clasificación de puntos

Para generar los modelos digitales a partir de una nube de puntos LiDAR o una nube obtenida a partir de procesos de correlación de imágenes, es necesario llevar a cabo una edición de estos.

#### a) Métodos de filtrado

Se basan en la geometría de los puntos y en base a un radio de actuación definido por el usuario se rastrean los puntos de la nube LiDAR y se van comparando las cotas entre vecinos, si no se encuentran puntos a la misma cota o a un intervalo de cota definido, se da por hecho que el punto es erróneo, es decir, de clase 7 (noise).

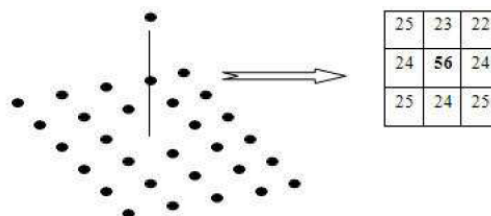


Figura 5. Punto erróneo en base a sus vecinos

#### b) Métodos de clasificación

Los procesos de clasificación de las nubes de puntos siguen en desarrollo y estudio, con el fin de encontrar la mejor solución para la resolución de este proceso.

La mayoría de metodologías para clasificar puntos se basan en el aspecto geométrico, es decir, se utilizan relaciones geométricas entre los puntos y sus vecinos para determinar a que clase pertenecen.

- **Test de vecindad:** La clasificación se lleva a cabo entorno a los vecinos más próximos y según el número de puntos clasificados al mismo tiempo tenemos:
  - Punto a punto: Se comparan dos puntos y se clasifican según un parámetro basado en la posición de ambos.
  - Punto a puntos: El punto a clasificar se compara con varios puntos vecinos.
  - Puntos a puntos: Se comparan dos conjuntos de puntos.
  
- **Filtros:** Cada filtro se basa en unas características que lo definen como tal.
  - Basado en pendientes: Se mide la pendiente entre dos puntos, si el valor supera el límite impuesto, el punto con cota superior se clasifica como no terreno.
  - Basado en superficies: Se describe una superficie parametrizada con su zona de buffer, que describe el espacio donde se deben situar los puntos del terreno.
  - Bloque mínimo: Un plano horizontal con su zona de buffer define un espacio en el que se deben situar los puntos del terreno.
  - Segmentación/ Clustering: Se basan en que un conjunto de puntos forman un objeto, por lo que estos filtros deben delinear los objetos.
  
- **Iterativo o simple:** Hay filtros que solo se llevan a cabo mediante un paso único, mientras que otros se desarrollan de manera iterativa hasta llegar a la solución final. Los filtros iterativos son más precisos, pero más lentos y los de un único paso son más rápidos.
  
- **Eliminación o reemplazo:** En los filtros mediante reemplazo se devuelve el punto con un valor distinto, mientras que en los de eliminación el punto es eliminado.
  
- **Valor de intensidad LiDAR y radiometría:** LiDAR proporciona diversas características de los puntos capturados, una de ellas es la intensidad, que nos permite clasificar los puntos a partir de este atributo.

## ➤ Algoritmos de filtrado

La mayoría tratan de diferenciar los puntos que pertenecen al suelo y los que no, se clasifican en:

- **Filtros morfológicos**

Se basan en la Morfología Matemática. Es un método con el que se pueden analizar imágenes que ofrecen una descripción cuantitativa de las estructuras geométricas basándose en una serie de operadores.

Los operadores básicos son la erosión y dilatación. Estos simplifican la superficie en base a elementos estructurales (ventanas) y haciendo uso de combinaciones entre los operadores básicos como: cierre, que es aplicar erosión y después dilatación, y apertura, que es aplicar dilatación y después erosión. Estas operaciones se pueden usar para determinar el máximo y mínimo dentro de elementos estructurales.

Un algoritmo muy utilizado dentro de este ámbito es el de Vosselman (2000), que calcula la diferencia de alturas admisible en función de la distancia. Para llevar a cabo este filtro hay que tener en cuenta los puntos vecinos y la distancia máxima de búsqueda, por tanto todos los puntos que satisfacen las condiciones se clasifican dentro de la clase “terreno” y los demás como “no terreno”.

- **Filtros mediante densificación progresiva**

Se basan en la reconstrucción progresiva del terreno ideada por (Axelsson, 1999). Primero se genera una aproximación del terreno, considerando los puntos más bajos. Se triangulan y en base a esta primera aproximación se establece un criterio de ángulo y distancia, que si es cumplido por los puntos que se encuentran dentro de cada triangulo, se clasifican como terreno. Este proceso es iterativo, por lo que se van incorporando sucesivamente más puntos a la clase terreno, hasta que no existan puntos que cumplan las condiciones de pertenencia.

Este tipo de filtros están relacionados con la reconstrucción del MDT, mientras que los basados en morfología matemática no. En los últimos años el uso de este tipo de algoritmos se está combinando con métodos basados en segmentación.

- **Filtros basados en superficies**

Inicialmente asumen que todos los puntos pertenecen al terreno y se van eliminando los que no pertenecen a él, de tal forma que el modelo inicial va aproximándose al modelo digital del terreno final.

El método de (Kraus y Pfeifer, 1998) de interpolación robusta integra el filtrado e interpolación del MDT en un solo proceso. Primero se obtiene una primera aproximación del terreno a la que se le da un peso igual a la unidad. Se calcula la distancia vertical (residuo) de los puntos a esta superficie y se le asigna un peso a cada uno de ellos en función, si están situados por encima o debajo de la superficie inicial.

Se vuelve a calcular la superficie en base a los pesos asignados, iterando el proceso hasta que los cambios no sean significativos o hasta un número concreto de iteraciones.

Como ocurre con los demás tipos de filtros, estos han evolucionado bastante en los últimos años y han surgido una gran gama de variantes. Estos filtros tienen buenos resultados en áreas urbanas, en zonas arboladas y en zonas llanas.

- **Filtros basados en la agrupación y la segmentación**

Estos algoritmos agrupan los puntos en objetos en base a que las características geométricas sean parecidas.

Estos métodos tienen dos etapas: primero, la generación de segmentos individuales agregando puntos con propiedades similares y segundo, la clasificación de estos. Los segmentos son clasificados en base a la diferencia de altura con los píxeles cercanos.

Son filtros adecuados en áreas en las que hay actividad humana, pero no en zonas de arboleda.

## 2.4. Modelos digitales del terreno

El modelo digital del terreno se define según (Doyle, 1978) como un conjunto de datos numéricos que describen la distribución espacial de una característica del territorio. Una definición más precisa es la de (Felicísimo, 1994), que define el modelo digital del terreno como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable continua y cuantitativa.

- MDT: es la representación de la superficie del terreno desnudo en formato digital.
- MDS: es la representación de la superficie de cota máxima.
- MDSn: es la diferencia entre el MDS y el MDT, representa los elementos del MDS sobre un plano horizontal.

Se debe tener en cuenta que una a posición sobre el terreno (x, y) solo le corresponde una altura (z), esto es, el enfoque 2.5D.

A la hora de crear el MDT se suelen eliminar elementos espaciales, como árboles, edificios, etc. Por tanto, aparecen huecos que deben ser interpolados para evitar zonas vacías.

### 2.4.1 Estructura de los modelos digitales

- **GRID**: es una estructura en la que los puntos se sitúan de manera regulada, la elevación se asigna a un área o píxel por medio de métodos de interpolación. Discretizar el espacio a una resolución da lugar a que la celda esté ocupada por varios o por ningún punto, por lo que se hace necesario ver cuál es el mejor método para la obtención de la cota.

Esta es una estructura simple, fácil de almacenar y de trabajar con ella, sin embargo, su estructura no se adapta de forma idónea al terreno, por lo que no representa de forma eficaz la realidad, no obstante es la estructura óptima para cuando se cubren grandes superficies de terreno, ya que no requiere el almacenamiento de las coordenadas X e Y que están implícitas.

- **TIN** (red de triángulos irregular): Los propios puntos son los que se utilizan para la generación del modelo, en nubes de puntos densas llevar a cabo la triangulación lleva bastante tiempo y consume bastantes recursos.

La estructura TIN se adapta al terreno ya que no tiene una resolución predeterminada, permite introducir líneas de rotura por lo que el modelo se ajusta mejor a la realidad, por el contrario, se trata de un modelo conceptual complejo lo que hace difícil su creación y almacenamiento ya que requiere almacenar las tres coordenadas y además las relaciones entre los puntos.

## 2.5. Métodos de rectificación digital

Para obtener una ortoimagen, se debe transformar, por medio de rectificación digital, la proyección cónica del fotograma a la proyección ortográfica, en la que todos los puntos se proyectan a través de ángulos rectos. El resultado es un producto que combina la calidad métrica de un mapa y la semántica de una imagen

Los métodos de rectificación digital se dividen en:

- **Rectificación mediante transformación polinómica**

La corrección se lleva a cabo a partir de una red de puntos de control. El orden del polinomio a utilizar depende del número de puntos utilizados o del tipo de rectificación que se quiera llevar a cabo.

Su utilización es sencilla pero da lugar a errores, porque no corrige correctamente el desplazamiento debido al relieve y no considera las características del sensor de captura, además la utilización de polinomios de orden superior puede ocasionar errores debido a la sobreparametrización del ajuste polinómico.

Es un método muy utilizado en la rectificación de imágenes satelitales debido a que su geometría y distorsiones son difíciles de modelizar y que el desplazamiento debido al relieve en estas tomas es pequeño, debido a que la relación entre la altura de vuelo y la diferencia de cotas es escasa, por lo que afecta poco al resultado final.

- **Rectificación mediante transformación proyectiva**

Plantea la relación que existe entre dos planos a partir de 8 parámetros que se calculan en base a 4 puntos de control y sus correspondientes coordenadas imagen. Dentro de los coeficientes de la transformación se encuentran implícitos los parámetros de orientación interna y externa.

Se trata de un método muy utilizado en la rectificación de imágenes aéreas de zonas llanas y en fotogrametría terrestre.

- **Rectificación diferencial**

Es un proceso que se va aplicando sobre pequeñas zonas de la imagen, para llevarlo a cabo se necesita un Modelo Digital de Elevaciones referido al sistema de proyección de coordenadas en el que se quiera obtener la imagen rectificada.

El fin de la rectificación diferencial es asignar un Nivel Digital a cada uno de los elementos que componen la matriz del Modelo Digital de Elevaciones.

Hay dos variantes a la hora de realizar este tipo de rectificación:

- **Método indirecto:** A partir de las coordenadas terreno (X, Y) de cada píxel y de la coordenada Z, obtenida por remuestreo sobre el MDE, se calculan las fotocoordenadas mediante colinealidad y se vuelve a hacer un remuestreo para obtener el Nivel Digital que se le asignará a la posición de partida (X, Y).

- **Método directo:** Parte de las coordenadas píxel del fotograma y una Z aproximada del terreno, con estos datos se calculan las coordenadas terreno (X, Y) que se utilizan para volver a calcular la Z en el MDE, este proceso se itera hasta obtener las coordenadas terreno definitivas y finalmente se hace una transformación para pasar de coordenadas terreno a píxel en la orto.

El método de rectificación diferencial es el más utilizado porque es el que proporciona mejores resultados, ya que elimina el desplazamiento debido al relieve y el efecto orográfico, siempre y cuando se empleen Modelos Digitales de Superficie.

### **2.5.1. Técnicas de remuestreo**

Al realizar una rectificación, la posición de los píxeles proyectados no suele coincidir con la de los píxeles originales, por lo tanto el Nivel Digital de los píxeles cambia y para asignarle su nuevo valor se utilizan técnicas de remuestreo:

- **Vecino más próximo**

Este método asigna a cada cuadrado de la malla el valor de gris del píxel más cercano. Es la aplicación más sencilla pero introduce distorsiones en elementos lineales.

- **Interpolación bilineal**

Promedia el valor de los niveles digitales de los cuatro píxeles más próximos. Se hace una ponderación a cada píxel en base a la distancia al que se va a corregir, por tanto tienen más importancia los niveles digitales de los píxeles más cercanos. Este método minimiza la distorsión en elementos lineales y suele difuminar las zonas de contraste.

- **Convolución bicúbica**

Tiene en cuenta los niveles digitales de los 16 píxeles más próximos. Su resultado es mejor que en los dos casos anteriores, pero se necesita un cálculo mucho mayor.

De los tres métodos, el más preciso es de convolución bicúbica y el menos preciso el del vecino más próximo. La interpolación bilineal es la más utilizada, ya que requiere menos tiempo de cálculo que la convolución bicúbica y la diferencia de precisión entre ambas es en torno al 3%.

### 3. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se sitúa en la Comunidad Autónoma de Madrid, concretamente en el barrio de Ambroz dentro de Vicálvaro, que es un distrito de Madrid (ciudad).

Se trata de un área urbana que tiene una superficie de 4km<sup>2</sup>, las coordenadas en su centro son 40°24'22''N y 3°36'46''W y es una zona donde la altitud oscila entre los 650 y 750 m sobre el nivel del mar, por tanto presenta pendientes someras y constantes.

En la figura 5 se sitúa la Comunidad de Madrid, el Término Municipal de Madrid y la ubicación del distrito de Vicálvaro:

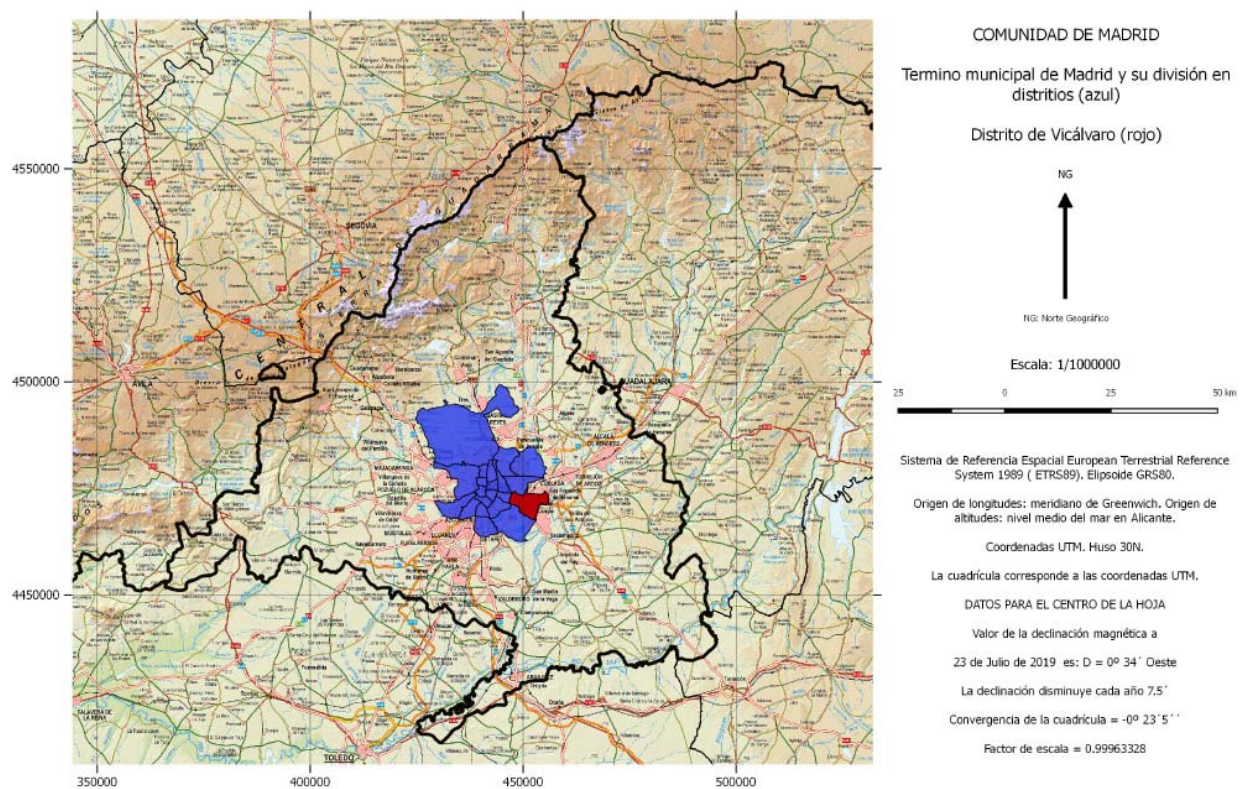


Figura 6. Comunidad de Madrid. Término municipal de Madrid y situación de Vicálvaro

En la Figura 7 se ve en detalle la zona de Vicálvaro objeto del proyecto, dentro del mosaico a escala 1:50.000 de máxima actualidad de la hoja 0559 del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea de España (PNOA):



Figura 7. Detalle de la zona, GSD de la imagen original de 0.25 m

## **4. METODOLOGÍA**

En este apartado se hace una descripción de los procesos y metodologías que se tienen que llevar a cabo en el proyecto, para obtener los fotogramas que componen el bloque fotogramétrico y los puntos 3D por técnicas láser, hasta llegar a los productos finales. Se hace una descripción de las fases de las que consta cada proyecto y se explican los principios teóricos en los que se basan cada una de las partes.

### **4.1. Fotogrametría**

#### **4.1.1. Zona objeto del proyecto fotogramétrico**

El área del proyecto fotogramétrico general del que se han extraído los datos de partida tiene una extensión de 464 km<sup>2</sup>, enmarcado dentro de la Comunidad de Madrid.

El vuelo fue llevado a cabo por la Comunidad de Madrid en Julio del año 2016 y dentro del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Con el PNOA 10 se pretende obtener ortoimágenes con un GSD de 10 cm, un modelo digital de elevaciones con un paso de malla de 1m x 1m y con un e.m.c en planimetría y altimetría igual o menor a 20 cm.

En la Figura 8 se superponen a la ortoimagen, las pasadas, foto-centros y huellas de las imágenes de la porción de 4Km<sup>2</sup> sobre la que se ha trabajado.

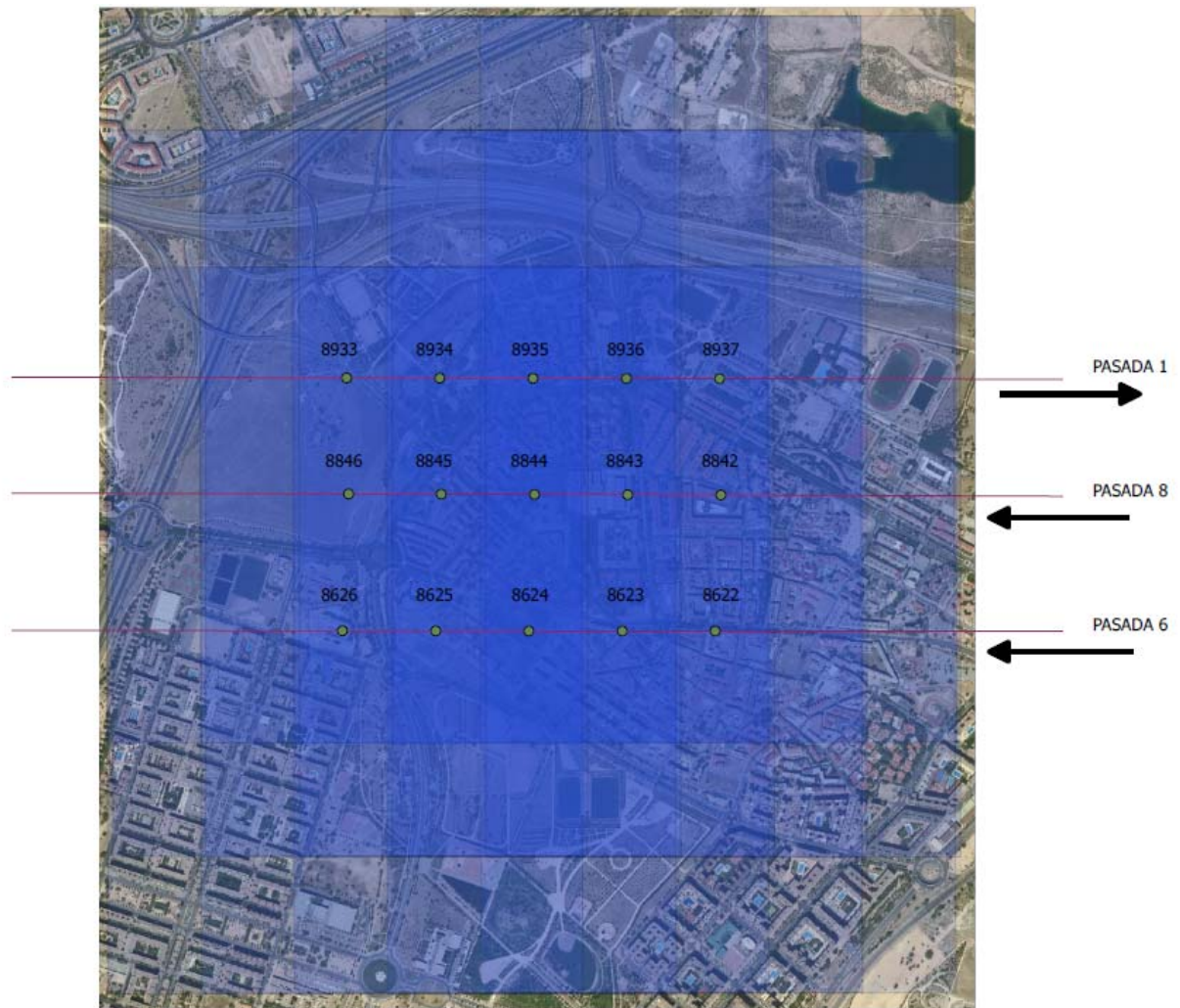



Figura 8. Esquema de vuelo

#### 4.1.2. Medios Técnicos

A continuación se detallan y describen los medios técnicos utilizados en la realización del proyecto.

##### a) Aeronave

La aeronave presenta las siguientes características técnicas:

<b>Aeronave</b>	
	
Marca y modelo	AC 690
Matrícula	SE-LZU
Características generales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tripulación: 1-2</li> <li>• Capacidad: 6 pasajeros</li> <li>• Longitud: 44 pies 35 (13.51 m)</li> <li>• Máximo peso en despegue: 9.700 libras (4.399 kg)</li> <li>• Motores: 2 × Continental GTSIO-520-L con turbocompresor, inyección de combustible de seis cilindros opuestos, refrigerado por aire, 375 CV (280 kW) cada uno.</li> </ul>
Capacidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad máxima : 327 mph (285 knots, 527 km/h ) a 12000 ft (3,657m)</li> <li>• Velocidad de crucero :316 mph (509 knots ,400 km/h ) a 20000 ft (max cruise)</li> <li>• Velocidad mínima : 86 mph (75 knots, 138km/h ) IAS (flaps down)</li> <li>• Distancia: 1.712 mi (1,487 nm, 2.755 km ) con depósitos llenos y 45 minutos de reserva</li> <li>• Techo: 34,000 ft ( 10,363 m )</li> </ul>

**Tabla 1. Características del avión utilizado**

Este tipo de aeronave permite realizar vuelos bajos y a velocidades sostenidas, por lo que se obtienen imágenes con un gran porcentaje de solape longitudinal. Además posee una buena autonomía de vuelo para poder realizar trabajos de dimensiones considerables.

**b) Sensores**

Sobre la aeronave se ha utilizado un sistema compuesto por cámara, plataforma giroestabilizada, sistema de navegación, receptor GPS y un sistema inercial (IMU/INS) con las siguientes características técnicas:

<b>Sensor de captura de imágenes digitales</b>	
Sensor empleado	Ultra Cam
Número de serie del Sensor	UC-E-1-00518105-f210
Resolución espectral	5 bandas (Rojo, Verde, Azul, Infrarrojo cercano, Pancromático)
Control automático de la exposición	Incluido
Sistema FMC	TDI
Plataforma Giroestabilizada	T-AS 31 Compensación de 5 deg en Roll y Pitch y 30 deg en Heading. Permite control automático de deriva.
Sistema de navegación	ASMS de Vexcel Permite: - planificar el vuelo, determinando los centros de fotos - navegación en tiempo real - control automático de disparo - registro de eventos - registro de datos de captura de cada imagen
Receptor GPS	NOVATEL Millennium:  -12 canales bifrecuencia siguiendo las portadoras L1 y L2. -Registro de observaciones superior 0.1 segundos. -Alojo de observación mediante código y diferencias de fase. -Algoritmos de dobles diferencias para resolver la ambigüedad de fase. -Precisión en las coordenadas de la cámara DGPS: 10 a 30 cms.
Sistema inercial (IMU/INS)	PosAV-510 - Frecuencia de registro: 200 Hz. - Precisión 0.005 deg en Omega y Phi, 0.008 deg en Kappa.
Fecha de calibración	Agosto 2016
<b>Parámetros básicos en imágenes virtuales de alta resolución</b>	
Distancia focal (m)	0.21075
Tamaño del sensor (pixel)	13080 x 20010
Tamaño del pixel (µm)	5.2
Punto principal (mm)	X = 0.0 ; Y = 0.0
Parámetros de distorsión	Imágenes libres de distorsión

**Tabla 2. Características generales de los sensores utilizados**

- **Cámara**

Detalle de las especificaciones geométricas del sensor Ultracam Eagle:

### Panchromatic Camera

#### Large Format Panchromatic Output Image

<b>Image Format</b>	long track cross track	68.016mm 104.052mm	13080pixel 20010pixel
<b>Image Extent</b>		(-34.01, -52.02)mm	(34.01, 52.02)mm
<b>Pixel Size</b>		5.200 $\mu$ m*5.200 $\mu$ m	
<b>Focal Length</b>	ck	210.750mm	$\pm$ 0.002mm
<b>Principal Point (Level 2)</b>	X_ppa	0.000mm	$\pm$ 0.002mm
	Y_ppa	0.000mm	$\pm$ 0.002mm
<b>Lens Distortion</b>	Remaining Distortion less than 0.002mm		

Tabla 3. Parámetros de la cámara utilizada

- **Desplazamiento debido al relieve**

En este tipo de proyectos realizados sobre zonas urbanas, es importante el uso de una focal grande, en este caso, de 210.750 mm. El fin de utilizar este parámetro en el sensor, junto con grandes porcentajes de solape entre imágenes, es que el desplazamiento debido al relieve se minimice e incluso desaparezca.

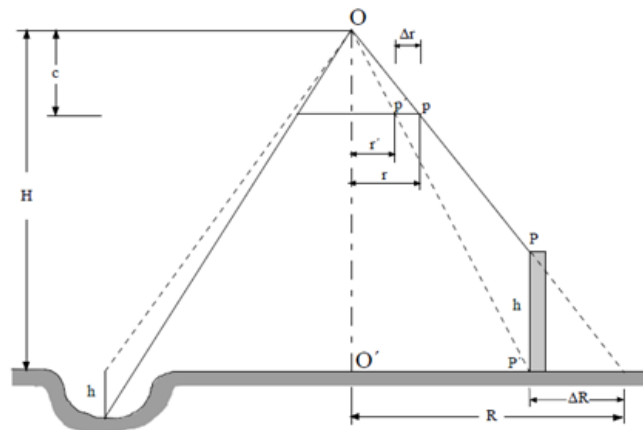


Figura 9. Desplazamiento en el plano de la imagen debido al relieve

	formato (mm)	formato (pixel)
transversal	104.052	20010
lontitudinal	68.016	13080

tamaño del pixel (mm)	0.0052
GSD (m)	0.090
h (m)	30
H media (m)	3647.596
solape longitudinal (%)	80
solape transversal (%)	80

R (dist radial máxima en el eje x)	353.160	m
r	20.405	mm
R (dist radial máxima en el eje y)	540.270	m
r	31.216	mm
R (dist radial máxima)	645.456	m
r	37.293	mm
<b>Ar (en la componente x)</b>	<b>0.168</b>	<b>mm</b>
<b>Ar (en la componente y)</b>	<b>0.257</b>	<b>mm</b>
<b>Ar (total)</b>	<b>0.307</b>	<b>mm</b>

**Tabla 4. Cálculo del desplazamiento debido al relieve**

El desplazamiento debido al relieve máximo, suponiendo una altura del edificio de 30 metros aproximadamente, es de 0.3 mm.

Por otra parte, las características del sensor (tamaño del sensor, del pixel,..) permiten que para la obtención del GSD requerido se pueda volar a una altura sobre el terreno superior, lo que da lugar a que al realizar trabajos sobre zonas urbanas se minimicen las molestias sobre la población.

Para cumplir las especificaciones del proyecto la cámara debe ser calibrada, realizando un test a diferentes alturas de vuelo.

Test flight at customer's test site:

- Date of flight: 30/08/2016
- Number of images: 582 (total)
- Flying heights: 2250m (GSD 5cm)  
4170m (GSD 10cm)
- Number of images: 336 (GSD 5cm)  
246 (GSD 10cm)
- Ground Control Points: 85 (4 were used as check points)
- Postprocessed GPS/IMU: available

Flight lines look very well done and show good overlap and image quality.

**Tabla 5. Características generales de los dos vuelos**

Los resultados del ajuste, a partir de las especificaciones anteriores, son:

	Flight 2250m (GSD 5cm)	Flight 4170m (GSD 10cm)
<b>Sigma 0</b>	1.71	1.58
<b>Mean photo scale</b>	1:10588	1:19717
<b>RMS object points X/Y/Z</b>	11/11/68mm	19/21/124mm
<b>RMS check points X/Y/Z</b>	12/6/13mm	16/17/20mm
<b>RMS control points X/Y/Z</b>	13/13/19mm	15/16/7mm

Tabla 6. Error medio cuadrático de las coordenadas de los diferentes puntos en ambos vuelos

Los residuales en la imagen de la cámara para una altura de vuelo de 4170m y GSD de 10cm (similar a nuestro vuelo que tiene una altura sobre el terreno de unos 3600 m y un GSD de 9 cm), se muestran en la siguiente imagen.

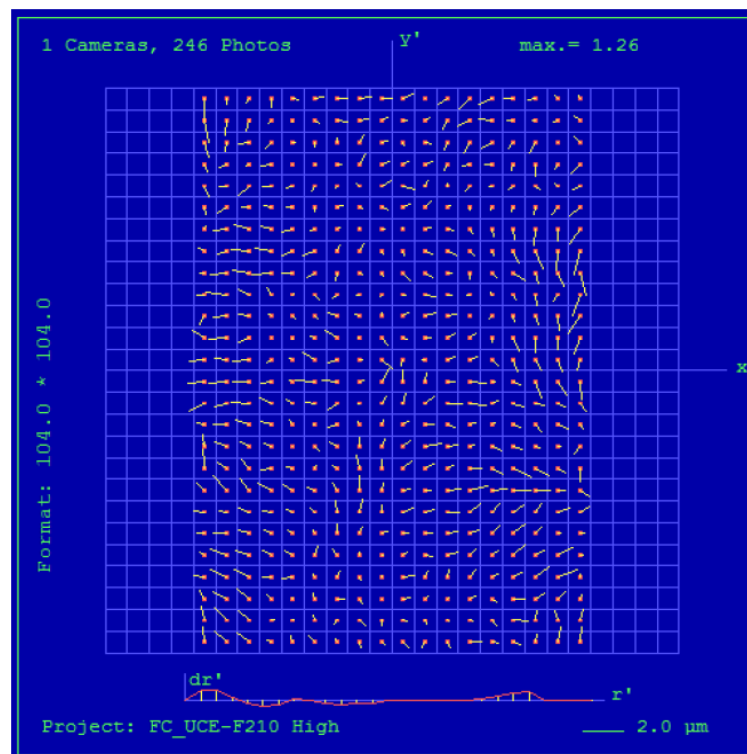


Figura 10. Residuales distribuidos por la imagen

El residual máximo es de 1.26 micras y sabiendo que la cámara tiene un tamaño del píxel de 5,2 micras y el GSD del vuelo es de 9 cm, se tiene que 1 píxel= 5,2 micras= 9 centímetros y por lo tanto, el error máximo de 1.26 micras es aproximadamente 2,2 centímetros sobre el terreno.

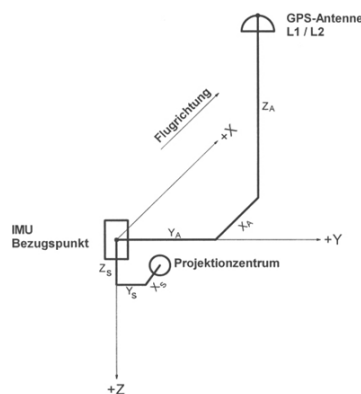
Se trata de un error máximo que seguramente no se sitúe en el centro del formato, por lo que es posible que no se hayan empleado las zonas de las imágenes donde se podría dar este error, que suelen ser las más lejanas radialmente al punto principal, además hay que tener en cuenta que las imágenes del sensor UCEagle se entregan libres de distorsión radial.

- **Sistema GPS/INS**

Se compone de un receptor GPS, una unidad de almacenamiento de datos, una antena bifrecuencia situada en la parte superior y exterior del avión. Además de un sistema inercial de navegación que a su vez está formado por varios giróscopos y acelerómetros que dan los ángulos y las aceleraciones que ocurren debido a los movimientos del avión.

Distancias entre el centro de proyección de la cámara, el GPS-antena y el IMU:

Lever arms IMU - GPS-Antena - Centro de Proyección



Aircraft	Camera	Lever arms [m]								
		IMU - GPS-Antenna			IMU - Projection center			Sensor-Mount (T-AS)		
		XA	YA	ZA	Xs	Ys	Zs	X	Y	Z
SE-LZU	ULTRACAM EAGLE UC-E-1-00518105-f210	-0.024	0.038	-1.284	0.039	-0.002	-0.189	0	0	0

**Tabla 7. Distancias entre GPS, IMU y el centro de proyección de la cámara**

En la documentación técnica se dispone de la calibración del sistema GPS/IMU, es decir, de las distancias entre los sensores, los llamados *lever arms*. El GPS se sitúa en el techo del avión, el IMU se encuentra al lado de la cámara pero no en el centro de proyección de esta, así que estas distancias hay tenerlas perfectamente documentadas y son esenciales para el cálculo de los parámetros de orientación externa.

También se tiene la desalineación de la antena, que no es más que el ángulo que hay entre la vertical del IMU y la vertical de la cámara, por tanto los ángulos obtenidos con el IMU no son los verdaderos de la cámara y hay que corregirlos de esa desalineación de la vertical.

Los datos GPS se apoyan en el sistema de navegación inercial que ofrece mejores valores aproximados de entrada para realizar el ajuste, consiguiendo que la generación de puntos de paso sea precisa y rápida y la medición los puntos de control sea más fácil.

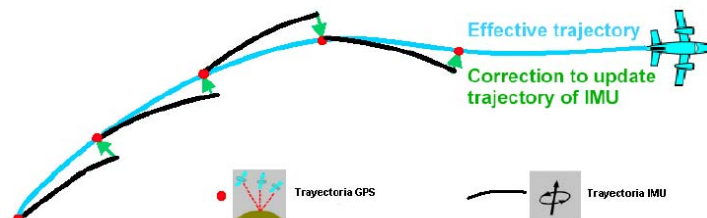


Figura 11. Esquema de trabajo del sistema inercial IMU

El sistema GPS va obteniendo el posicionamiento a un intervalo de tiempo mucho mayor que el sistema IMU, por tanto la trayectoria de ambos sistemas se combinan obteniéndose una pasada suavizada. La pasada se va ajustando en base a ciertos puntos obtenidos por GPS entre los cuales se inserta la trayectoria del sistema inercial IMU.

#### 4.1.3. Esquema de trabajo

El proyecto fotogramétrico se divide en varias partes:

##### 1. Análisis de la información del vuelo

A partir de la información suministrada por el Excmo. Ayuntamiento de Madrid: características de la cámara, del vuelo, POE, día y hora de vuelo, ángulo solar. Se revisa y analiza que los parámetros de vuelo, POE, ángulo solar, etc... sean correctos y cumplan con las especificaciones técnicas del proyecto.

En la tabla 8 se hace un cálculo teórico de la planificación de vuelo en base a las características específicas necesarias para la obtención de productos derivados con la calidad requerida.

PROYECTO : ZONA URBANA (MADRID)					
Cámara VEXCEL Falcón					
a)	Características del vuelo a realizar				
	GSD (m)	0.09			
	formato (mm)	formato (pixel)	tamaño pixel (mm)	H'media (m)	
transversal	104.052	20010	0.00520	3647.596	
longitudinal	68.016	13080	0.00520		
			0.0052		
	<b>focal</b>	<b>210.75</b>	<b>mm</b>		
	cartografía a escala	1/1000			
	error máximo	0.2	m		
	GSD máximo	0.1	m		
	altura de vuelo	3647.596	m		
	GSD	0.090	m		
		altura del terreno (m)	Altura vuelo (m)	a. vuelo abs (m)	GSD (m)
	altura máxima (m)	750	3572.596		0.088
	altura mínima (m)	600	3722.596	4322.596	0.092
	altura media (m)	675	3647.596		0.09
	L1 (longitudinal)	1177.200	m		
	L2 (transversal)	1800.900	m		
	superficie de la foto	2120019.480	m <sup>2</sup>		
	p (solape longitudinal)	<b>0.8</b>	%		
	q (solape transversal)	<b>0.8</b>	%		
	B (base aérea)	235.440	m		
	A (distancia entre pasadas)	360.180	m		
	superficie del modelo	1696015.584	m <sup>2</sup>		
	superficie neta	84800.779	m <sup>2</sup>		

Tabla 8. Características del vuelo fotogramétrico

Para la obtención de Modelos Digitales a gran resolución es indispensable obtener imágenes con un GSD específico, en base a esta característica se calculan la focal de la cámara y la altura del vuelo sobre el terreno idóneas.

Por otra parte, es importante que la falta de información debida a las oclusiones sea mínima o nula, para que los Modelos obtenidos sean lo más precisos posibles. Esto se consigue añadiendo, a la focal y altura de vuelo anteriores, unos solapes entre imágenes lo más amplios posibles.

## 2. Ejecución del plan de vuelo

Se comprueba que el ángulo solar proporcionado coincide con el día y hora y que por tanto cumple con las especificaciones técnicas. El vuelo se realizó el día 28 Julio de 2016 (jueves) con unas condiciones idóneas de visibilidad y meteorológicas, cumpliendo también los requisitos referidos al ángulo solar y los puntos calientes (*Hot Spot*).

Sabiendo que el día tiene 86400 segundos y que el Tiempo GPS es en segundos y se inicia en la media noche del domingo, se puede calcular el tiempo UTC. Y finalmente la hora local que es UTC/GMT+1.

Las horas de vuelo de las pasadas son:

Pasada 1. Tiempo GPS medio 389494, Tiempo UTC jueves 12h11min30s.

Pasada 8. Tiempo GPS medio 379949, Tiempo UTC jueves 10h33min7s.

Pasada 6. Tiempo GPS medio 379074, Tiempo UTC jueves 10h17min.

El vuelo de la zona transcurrió entre las 11:17 y las 13:11 Hora Local.

Con la aplicación [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=es](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es), se obtiene el ángulo solar en el momento de la ejecución del proyecto de vuelo.

La elevación del sol varía entre los 46.64° a las 10:17 (hora local) y los 63.58° a las 13:11 (hora local).

Según las especificaciones del proyecto de vuelo la altura del Sol sobre el horizonte debe ser igual o mayor a 40° sexagesimales, por tanto las cumple y los datos suministrados son correctos.

Es importante que el Sol se encuentre lo más alto sobre el horizonte, sobre todo en trabajos de tipo urbano, ya que las alturas de los edificios proyectan grandes sombras que pueden dificultar el trabajo posterior con las imágenes.

### **3. Obtención de productos derivados**

De la cámara digital se obtienen imágenes con composición multispectral; red, green, blue e infrarrojo (RGBI), una resolución radiométrica de 8 bits/pixel y GSD de 9 cm.

Del sistema GPS/INS se obtienen datos de navegación y el tiempo GPS en el momento de la captura de las imágenes, estos datos son los que permitirán calcular los parámetros de orientación externa (POE) de las imágenes.

### **4. Obtención de los parámetros de orientación externa de las imágenes digitales.**

A partir del sistema inercial IMU junto con GPS y una serie de estaciones de referencia terrestres se obtienen por orientación directa los parámetros de orientación externa de los fotogramas.

En la Figura 12 se ve la combinación del INS (Inertial Navigation System) y GPS (Global Positioning System), con los que se determinan, junto con las estaciones de referencia, los parámetros de orientación externa.

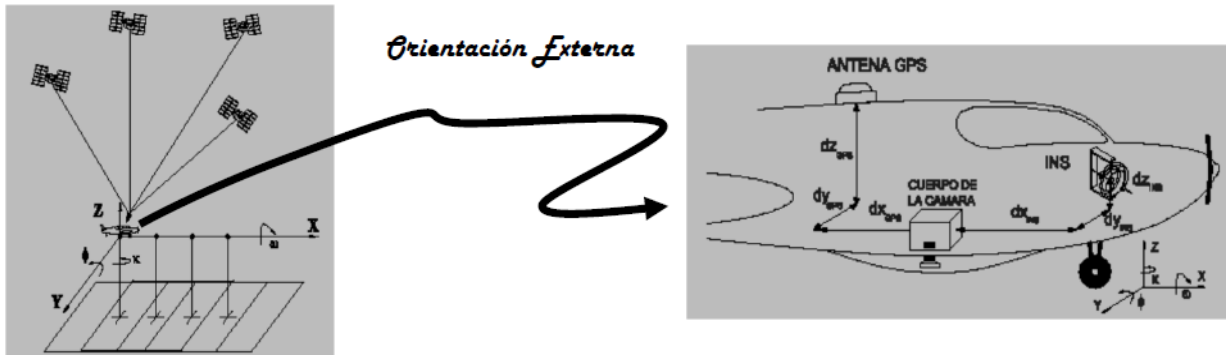


Figura 12. Sistema GPS/INS con el que se obtienen los POE

Estaciones de referencia terrestre:

Organismo	Nombre	Este (m)	Norte (m)	DATUM	H elip (m)	Huso
IGN	BUIT	446439.201	4539019.717	ETRS89	1032.688	30
	IGNE	439830.797	4477484.24	ETRS89	766.920	30
	SONS	417326.769	4392169.407	ETRS89	808.967	30
	YEB1	492359.920	4485897.996	ETRS89	975.367	30
	YEBE	492492.886	4486022.15	ETRS89	972.778	30

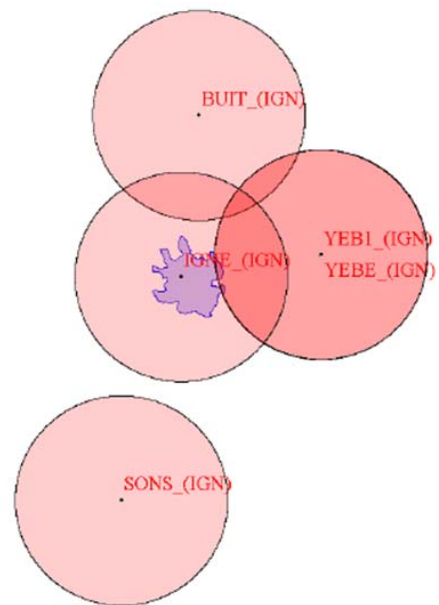


Tabla 9. Coordenadas y plano de situación de las estaciones de referencia terrestre

A partir de los ficheros de observaciones de las estaciones de referencia, los ficheros de efemérides de los satélites y los datos obtenidos por la unidad INS/GPS se obtiene la trayectoria GPS.

Esta trayectoria GPS se compara con la trayectoria obtenida a partir de los datos IMU. La trayectoria GPS tiene una secuencia temporal de 1 segundo y se define por las coordenadas X, Y, Z y la IMU tiene una secuencia temporal de 0.005 segundos y se define por las coordenada

X, Y, Z y tres valores angulares de rotación con respecto a los sistemas de coordenadas terreno ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ).

Como resultado de la comparación se obtiene una trayectoria final suavizada definida por 6 parámetros y que mantiene la precisión relativa del sistema inercial INS y la absoluta del GPS diferencial.

Finalmente el tiempo registrado en cada toma de una imagen es interpolado en la trayectoria suavizada para así obtener los parámetros de orientación externa (X, Y, Z,  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) de cada fotograma.

### **5. Procesamiento de los datos de vuelo para la obtención de los productos finales.**

El punto de partida son una serie de fotogramas, sus parámetros de orientación externa (POE), el certificado de calibración de la cámara y los puntos de apoyo.

#### **- Orientación interna**

Relaciona el sistema de coordenadas instrumento con el sistema de coordenadas imagen.

Los parámetros de orientación interna están recogidos en el certificado de la cámara y son: la distancia focal, las coordenadas del punto principal (PP) y los valores de la distorsión.

Al tratarse de una cámara digital, las relaciones entre el sistema de coordenadas imagen del sensor y el sistema de fotocoordenadas de la cámara es constante, por lo que sólo es necesario considerar el tamaño del sensor, el tamaño del pixel, la distancia focal y la posición del punto principal. No es necesario considerar la distorsión radial ya que las imágenes proporcionadas por la cámara en nivel 2 están corregidas de distorsión radial.

#### **- Orientación externa**

Relaciona el sistema de coordenadas terreno con el sistema de coordenadas instrumento.

Introducidas las especificaciones de la cámara utilizada, se necesitan unos POE (parámetros de orientación externa) iniciales, que son las coordenadas de los centros de proyección de cada disparo de la cámara (X, Y, Z) y los valores angulares ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) que definen la orientación de la cámara en el momento de la exposición.

Con los datos anteriores se lleva a cabo la orientación relativa con la que obtenemos puntos homólogos (de enlace), que nos relacionan las imágenes que componen el bloque fotogramétrico.

El siguiente paso es la orientación absoluta donde se procede a la importación de puntos de control con coordenadas terreno, se miden y se comprueban, para resolver el sistema.

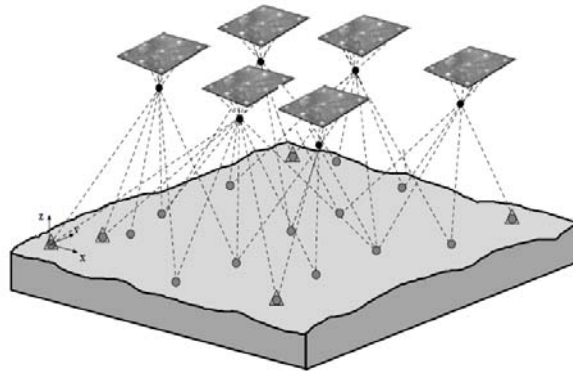


Figura 13. Aerotriangulación por ajuste de haces

Finalmente, la orientación relativa y absoluta se unifican en la orientación externa, que se resuelve llevando a cabo una aerotriangulación por ajustes de haces, se basa en la condición de colinealidad, la cual tiene como principio que el centro de proyección, el punto imagen y el punto terreno estén en la misma recta.

La resolución por ajuste de haces tiene la ventaja de que es el método más preciso de aerotriangulación, ya que hay una relación directa entre las coordenadas terreno e imagen, se necesitan menos puntos de apoyo para realizar la orientación, posibilita introducir en el ajuste elementos conocidos de observaciones en campo, orientación, etc., y se puede ampliar la técnica para poder compensar los errores sistemáticos.

Ecuaciones de colinealidad:

$$x' = -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y' = -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

Donde:

*Coordenadas imagen ( $x'$ ,  $y'$ )*

*Focal ( $c$ )*

*Coordenadas del centro de proyección de la imagen ( $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$ )*

*Coordenadas terreno ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )*

*Parámetros de rotación ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) que conforman las matrices de rotación ( $m_{11}$ ,  $m_{22}$ ,  $m_{33}$ ,...)*

*(Fórmula 1)*

Los parámetros de orientación externa proporcionados fueron obtenidos mediante ISO (Integrated Sensor Orientation), es una técnica en la que se emplea en el ajuste la información del GPS/INS y una serie de estaciones de referencia. Esos parámetros se han revisado con puntos de control derivados de otras cartografías de relevancia, que juntos con los puntos de enlace obtenidos mediante correlación automática, permiten montar las ecuaciones.

Los POE de cada fotograma, que se van a comprobar, junto con los puntos de enlace son las incógnitas y como resultado, por medio de mínimos cuadrados y hasta que se den por válidos los valores residuales o hasta que el sistema converja se obtienen; las correcciones a  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ,  $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$  de los centros de proyección de las imágenes y las correcciones a  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  de los puntos de enlace.

## **4.2. LiDAR**

### **4.2.1. Zona objeto del proyecto LiDAR**

Al igual que en el proyecto fotogramétrico la zona objeto del proyecto se enclava dentro de la Comunidad de Madrid, en este caso concretamente en el barrio de Ambroz perteneciente al municipio madrileño de Vicálvaro.

### **4.2.2. Medios Técnicos**

A continuación se detallan y describen los medios técnicos utilizados en la realización del proyecto.

#### **a) Aeronave**

La aeronave utilizada es la misma que la del proyecto fotogramétrico descrito anteriormente, ya que se trata de un vuelo combinado en el cual se toman imágenes y se recogen datos a través del sensor LiDAR, además de utilizarse los sistemas IMU y GPS.

Las ventajas que ofrecen este tipo de vuelos son; la reducción de puntos de control, agiliza la fase de aerotriangulación, reducen el coste y el tiempo de ejecución del proyecto y se obtiene una alta precisión en altimetría y planimetría.

**b) Sensores**

Sobre el avión se ha utilizado un sistema compuesto por cámara, plataforma giroestabilizada, sistema de navegación, receptor GPS y un sistema inercial (IMU/INS) con las siguientes características técnicas:

- **Sensor LIDAR**

Características del sensor LEICA ALS70-HP empleado:

	Model		
	ALS70-CM	ALS70-HP	ALS70-HA
Maximum Flying Height (m AGL)	1'600	3'500	5'000
Maximum Measurement Rate (kHz)	500	500	250
Field of view (degrees)	0 - 75 (full angle, user adjustable)		
Roll stabilization (automatic adaptive, degrees)	75 - active FOV		
Scan patterns (user selectable)	sine, triangle, raster		
Maximum Scan Rate (Hz)	sine	200	100
	triangle	158	79
	raster	120	60
Numbers of returns	unlimited		
Number of intensity measurements	3 (first, second, third)		
Accuracy	see graph		
Storage media	removable 500 GB SSD		
Storage capacity (hours @ max measurement rate)	6		12

Tabla 10. Características del sensor Lidar ALS70-HP

- **Sistema GPS/INS**

Se compone de un receptor GPS, una unidad de almacenamiento de datos, una antena bifrecuencia situada en la parte superior y exterior del avión. Además de un sistema inercial de navegación (IMU/INS).

En la Figura 14 se ve la aeronave con los diferentes sensores que porta.

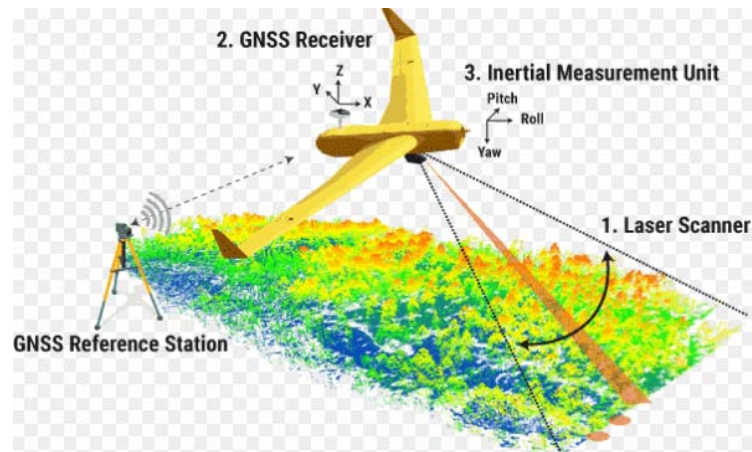


Figura 14. Aeronave con los sensores haciendo un barrido láser

#### 4.2.3. Esquema de trabajo

El proyecto LiDAR se divide en varias partes:

##### *1. Análisis de la información disponible*

A partir de las especificaciones técnicas del proyecto, del sensor LiDAR y de la delimitación del terreno sobre el que se va a actuar; se hace un estudio y planificación del vuelo para así obtener todas las características del mismo.

Las características del vuelo LiDAR están condicionadas por:

- La densidad de puntos por metro cuadrado exigidos.
- Las especificaciones del sensor LiDAR (frecuencia de barrido, de escaneado y el ángulo de barrido (FOV)).

A mayor campo de visión transversal (FOV), mayor área pero los puntos de los extremos se capturan con mayor incertidumbre.

Una mayor frecuencia del pulso láser permite una velocidad de vuelo mayor para un mismo espaciado.

Una frecuencia de escaneo, es decir, de barrido transversal mayor permite una mayor velocidad de vuelo y menor espaciado longitudinal.

- El recubrimiento transversal que debe ser igual o mayor al 15%, con la salvedad de zonas urbanas y de orografía complicada en las que se calcularía un recubrimiento específico con el fin de minimizar las oclusiones debidas al relieve y las edificaciones.

La frecuencia de emisión del sistema láser es muy pequeña por tanto no es determinante en el cálculo de los parámetros de vuelo, pero si es importante que el vuelo no sobrepase la altura máxima que nos proporcionan las especificaciones del sensor LiDAR, ya que la sensibilidad y potencia se ven mermadas.

Por otra parte, se debe tener en cuenta la densidad de puntos a la hora de establecer unos límites de velocidad de la aeronave, ya que a más velocidad la densidad de la nube de puntos decrece.

## ***2. Ejecución del plan de vuelo***

Se lleva a cabo a partir de las características del vuelo obtenidas en la planificación, en base a las normas de aviación civil y con unas condiciones idóneas de visibilidad y meteorológicas ya que por ejemplo no podrá realizarse el vuelo LiDAR si hay niebla, nieve o factores medioambientales que incidan en la precisión del sensor láser.

## ***3. Obtención de productos derivados***

Del sensor LiDAR se obtienen parámetros de la nube de puntos; intensidad de la señal, número de retorno, ángulo de barrido, tiempo entre la emisión y recepción del pulso, para posteriormente, junto con los datos relativos a la navegación y al tiempo GPS obtenidos con el sistema GPS/IMU, calcular la posición y características de cada punto.

## ***4. Obtención de los parámetros de orientación externa del sensor LIDAR.***

A partir del sistema inercial INS compuesto por GPS e IMU y una serie de estaciones de referencia terrestres se obtienen los parámetros de orientación externa, se sigue el mismo proceso que el explicado para el proyecto del bloque de imágenes fotogramétrico.

Con los ficheros de observaciones de las estaciones de referencia, los ficheros de efemérides de los satélites y los datos obtenidos por la unidad INS/GPS se obtiene la trayectoria GPS.

Esta trayectoria GPS se compara con la trayectoria obtenida a partir de los datos IMU. La trayectoria GPS tiene una secuencia temporal de 1 segundo y se define por las coordenadas X, Y, Z y la IMU tiene una secuencia temporal de 0.005 segundos y se define por las coordenada X, Y, Z y tres valores angulares ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ).

Como resultado de la comparación se obtiene una trayectoria final suavizada definida por 6 parámetros y que mantiene la precisión relativa del sistema inercial INS y la absoluta del GPS diferencial.

#### ***5. Procesamiento de los datos de vuelo para la obtención de los productos finales.***

A partir de la trayectoria GPS/IMU de cada pasada longitudinal y alguna transversal de comprobación en la que se toman medidas de campos de control, se ajustan las coordenadas de las nubes de puntos LiDAR al terreno para obtener los ficheros finales.

#### ***6. Procesamiento de los ficheros .LAS.***

El punto de partida son una serie de ficheros .LAS, son unos archivos binarios que mantienen la información proveniente del sistema LiDAR. En ellos hay datos binarios que se dividen en una cabecera con información principal, registros de longitud variable y registros de la nube de puntos.

Estas nubes de puntos se filtran y clasifican y con los datos tratados se procede a generar los modelos digitales del terreno y de superficie.

El primer paso en la clasificación y filtrado en la determinación de la clase ground (2), se parte de los puntos más bajos de la nube de forma que cuando un punto con respecto a sus vecinos presenta pendientes que sobrepasen unos valores establecidos, dicho punto no queda clasificado como terreno. Cuando dicho punto presenta unas pendientes con respecto a sus vecinos que entran dentro de los valores establecidos, sí que se clasifica como terreno. Este proceso se lleva a cabo de manera iterativa y finalmente se obtienen un conjunto de puntos incluidos en la clase terreno, que están dentro de los valores de continuidad de planos y pendientes establecidos.

Para la clasificación de edificaciones (clase 6) lo que se intenta es encontrar conjuntos de puntos a partir de una cierta altura con respecto a los clasificados como terreno y que formen

planos horizontales entre ellos, se compara cada punto con sus vecinos, si la pendiente con respecto a ellos es inferior al valor establecido se clasifica como edificación, si la pendiente pasa ese valor el punto no es clasificado.

Con la vegetación se hace una búsqueda similar a la anterior, a partir de cierta altura se buscan agrupaciones de puntos que presentan una cierta rugosidad entre ellos, es decir ya no se buscan planos horizontales sino conjuntos de puntos con una distribución rugosa.

### **4.3. Obtención de los modelos digitales de superficie y del terreno**

En este apartado se explican los principios en los cuales se basa el procesado de los datos obtenidos en ambos proyectos para obtener los modelos digitales del terreno y de superficie.

Los MDT y MDS obtenidos a partir del procesado de los datos obtenidos a partir de la aplicación de metodologías fotogramétricas sobre las imágenes se comparan con los obtenidos a partir de técnicas láser LiDAR, además van a ser la base junto con los fotogramas de la zona, de las Ground Ortho y True Ortho.

#### **4.3.1. Fotogrametría**

Los modelos digitales de superficies se obtienen una vez orientado el bloque fotogramétrico, estos modelos son entidades que representan la altitud o cota del terreno a través de un conjunto de datos numéricos.

La generación del Modelo Digital se lleva a cabo en base a la nube de puntos 3D extraídos a partir de la herramienta NGATE del software SOCET SET, que aplica una correlación de imágenes de forma automática.

Este tipo de correlación compara de forma directa los niveles digitales entre imágenes, dejando una de las imágenes fija y moviendo las demás hasta que se consigue llegar al ajuste requerido por los criterios establecidos en el software.

La nube de puntos obtenida se edita y procesa hasta la obtención de un Modelo Digital con un paso de malla determinado y una estructura formada por redes de triángulos irregulares (TIN).

### 4.3.2. LIDAR

En LiDAR la obtención de los modelos digitales, una vez que se tienen las nubes de puntos debidamente filtradas y clasificadas, se lleva a cabo seleccionando la clase o clases de puntos que van a conformar el modelo.

Para la obtención del MDT hay que seleccionar la clase 2 (ground) y para la obtención del MDS todas las clases a excepción de la clase 7 (noise).

### 4.4. Obtención de Ground Ortho y True Ortho

Las ortoimágenes se obtienen a partir de un proceso de ortoproyección, en el que se pasa de perspectiva cónica a ortogonal con lo que se mantiene la información del fotograma y además a escala.

Para llevar a cabo las ortofotografías se parte de las imágenes orientadas y de los modelos generados a partir del procesado de los datos obtenidos por metodologías fotogramétricas aplicadas al bloque fotogramétrico y por métodos aplicados a los datos obtenidos por técnicas láser (LiDAR). Los modelos son la parte esencial en la obtención de una ortofotografía ya que cuanto más exacta sea la definición de este más exacta será la ortoimagen:

- Ground ortho (terreno) se obtiene a partir del bloque de imágenes orientadas y de los Modelos Digitales del Terreno (MDT), que definen únicamente la superficie del terreno sin tener en cuenta ningún tipo de elemento externo como puedan ser edificaciones o vegetación.
- True Ortho (verdadera) a diferencia de la Ground Ortho se obtiene a partir de los Modelos Digitales de Superficies (MDS), que define toda la superficie en su totalidad incluyendo edificios, vegetación y demás elementos.

Es importante la elección del Modelo Digital, en zonas llanas la utilización de un Modelo Digital del Terreno da buen resultado, pero en zonas urbanas con edificios altos, al hacer las tomas fotográficas estos aparecen cada vez más abatidos conforme más alejados están del centro de la fotografía, es decir, hay desplazamiento debido al relieve. Es indispensable disponer de Modelos Digitales de Superficie para poder realizar de forma correcta la rectificación y que el resultado final entre dentro del patrón de tolerancia requerido.

El método de obtención de las ortoimágenes es la rectificación diferencial, con la que se consigue asignar el nivel digital (ND) a cada elemento de la matriz del modelo digital.

Esquema de rectificación diferencial por el método indirecto:

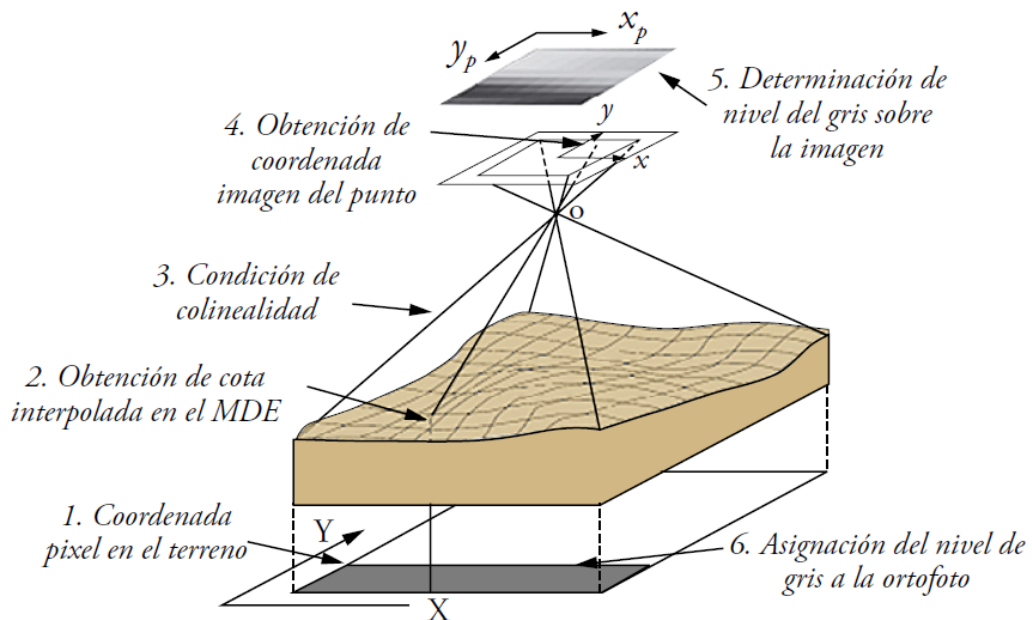


Figura 15. Fases en la rectificación diferencial por el método indirecto

Este método se divide en varias fases:

- Se definen la resolución y los límites de la ortofoto.
- Se pasa de coordenadas pixel  $(x, y)$  a coordenadas terreno  $(X, Y)$  por medio de una transformación Afín.

Transformación Afín:

$$\begin{aligned} X &= a x - b y + T_x \\ Y &= c x + d y + T_y \end{aligned} \Rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}$$

Donde:

- $a, b, c, d$  son parámetros que dependen de los ángulos de rotación entre ambos sistemas de coordenadas.
- $T_x, T_y$  parámetros de translación.

La transformación Afín se basa en la diferencia de escala y en los ángulos de giro entre los ejes de abscisas y ordenadas de ambos sistemas.

A partir del MDS o del MDT junto con las coordenadas X e Y terreno calculadas, se obtiene la coordenadas Z.

- Se pasa de coordenadas terreno (X, Y, Z) a fotocoordenadas (x', y') en milímetros. En este punto se añadiría la distorsión de la cámara utilizada pero se omite este paso ya que en este caso es un valor despreciable.

Esta transformación de (X, Y, Z) a (x', y') se basa en la ecuación de colinealidad:

$$x' = -c \frac{m_{11}(X - X_o) + m_{12}(Y - Y_o) + m_{13}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)}$$

$$y' = -c \frac{m_{21}(X - X_o) + m_{22}(Y - Y_o) + m_{23}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)}$$

Donde:

- *Coordenadas imagen (x', y')*
- *Focal (c)*
- *Coordenadas del centro de proyección de la imagen (Xo, Yo, Zo)*
- *Coordenadas terreno (X, Y, Z)*
- *Parámetros de rotación (omega, phi, kappa) que conforman las matrices de rotación.*
- Con las fotocoordenadas obtenidas y los parámetros de orientación interna (especificaciones de la cámara) se obtienen las coordenadas píxel por medio de una transformación Afín.
- Finalmente, por interpolación bilineal se obtiene la tonalidad en modo RGB, es decir, el nivel digital (ND) correspondiente al píxel en la orto (x, y) del que se partió.

La interpolación bilineal hace un promedio de los valores de los cuatro píxeles más próximos y pondera según la distancia, por lo que los píxeles más cercanos tienen más influencia en el resultado final.

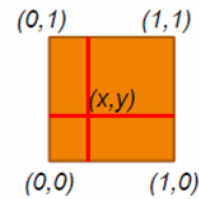
Interpolación bilineal:

*Media ponderada por área opuesta*

$$Z = (1 - u) \cdot ((1 - v) \cdot Z_{00} + v \cdot Z_{01}) + u \cdot ((1 - v) \cdot Z_{10} + v \cdot Z_{11})$$

$$u = \frac{X - X_{00}}{dx}$$

$$v = \frac{Y - Y_{00}}{dy}$$



- Este proceso se repite para cada píxel de la ortoimagen.

Una ortoimagen puede estar compuesta de varias ortofotografías con recubrimiento entre ellas, esa composición es un mosaico que se divide en partes, tantas como ortoimágenes intervengan en él.

Por tanto la calidad del mosaico dependerá de la geometría y radiometría entre imágenes:

Si el modelo digital está bien definido y la fase de orientación ha sido satisfactoria y por tanto las imágenes están bien orientadas la unión entre las ortoimágenes debe presentar errores mínimos, si por el contrario se aprecian cambios en las uniones hay que editar el mosaico y situar los cortes entre ortoimágenes a lo largo de zonas donde queden lo más disimuladas posible como por calles, para evitar errores geométricos debidos a la diferente proyección de los objetos en cada ortoimagen.

Los cambios radiométricos entre las ortoimágenes se deben a la separación temporal entre la captura de una imagen, sobre todo entre diferentes pasadas, y a las diferencias de inclinación de los rayos solares y al reflejo de la luz. La corrección a los problemas radiométricos se lleva a cabo con el uso de software de tratamiento de imágenes.

#### 4.5. Software y recursos utilizados

- \* Estación fotogramétrica:



**Figura 16. Estación fotogramétrica.**

La estación fotogramétrica se compone de una CPU capaz de procesar imágenes y grandes cantidades de datos de forma eficiente, posee una pantalla y teclado y ratón básicos en todo ordenador y además un ratón, pantalla y gafas 3D para trabajar con aplicaciones 3D, como es el caso del software Socet Set, que requieren una manipulación precisa de los elementos en un entorno virtual 3D.

El software principalmente utilizado en el presenta proyecto ha sido:

- SOCET SET (versión 5.6): Es un software desarrollado por BAE Systems y que realiza funciones relacionadas con la fotogrametría.

Permite llevar a cabo la orientación de bloques de imágenes mediante complejos cálculos basados en mínimos cuadrados, generar nubes densas de puntos mediante el uso de técnicas de correlación automática entre imágenes, generar modelos digitales con diferentes tipos de estructuras y generar ortoimágenes aplicando técnicas de rectificación diferencial, además entre sus otras aplicaciones están, la de su uso para cartografía, planificación, ensayo de vuelo y teledetección.

- LAStools (versión 181119): Es un software desarrollado por Rapidlasso GmbH que posee una serie de herramientas eficientes y programables, con procesamiento por lotes de múltiples núcleos (algunas de código abierto y la mayoría de código cerrado, pero que pueden ser utilizadas si la nube no supera un número determinado de puntos) para procesar, convertir, filtrar, rasterizar clasificar, recortar, comprimir etc. datos .LAS, LAZ comprimido, ESRI Shapefiles, Terrasolid BIN y ASCII.

El software combina algoritmos robustos y eficientes, que permiten hacer un uso eficaz de la memoria, para conseguir un buen rendimiento en el procesado de nubes de millones de puntos.

- QGIS: Es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) que ha desarrollado este sistema de información geográfica (SIG) construido sobre software libre y de código abierto (FOSS).

- Microsoft Excel: Es un programa informático desarrollado por Microsoft y que nos permite trabajar con datos numéricos.

## 5. APLICACIÓN

En este apartado se describen las fases llevadas a cabo para la obtención de los modelos digitales del terreno y de superficie de la zona objeto del proyecto.

En la parte llevada a cabo con el sensor de captura de imágenes, se parte de las características del bloque fotogramétrico, de la cámara y de los parámetros de orientación externa suministrados, con estos datos y los puntos de apoyo se comprueba la orientación del bloque, se obtienen las nubes de puntos, se editan y se generan los modelos.

En la parte LiDAR se parte de varios ficheros .LAS de 1x1 kilómetros con una nube de puntos definidos por sus características, sus coordenadas y sin clasificar. Se filtran y clasifican y en base a la selección de unas clases y otras se obtienen los modelos.

### 5.1. Obtención de los MDS y MDT a partir del bloque de imágenes

#### 5.1.1. Datos de partida

Se parte de información proporcionada por el Servicio de Cartografía de la Comunidad de Madrid que ha suministrado las imágenes, datos GPS/INS, especificaciones de la cámara y calibración de la misma y los parámetros de orientación externa (POE) de los centros de proyección de las imágenes.

#### - Características del bloque fotogramétrico

Está compuesto por 15 imágenes en 3 pasadas, cada una de estas se compone de 5 imágenes con una geometría regular y dirección de vuelo Este-Oeste en las pasadas 6 y 8 y Oeste-Este en la pasada 1.

número de pasadas	3
fotogramas por pasada	5
recubrimiento longitudinal	80%
recubrimiento transversal	80%
altura media de vuelo sobre el terreno	3650 m
GSD	9 cm
Superficie total cubierta	2968072 m <sup>2</sup>
Dimensiones	1.65 km*1.8 km

Tabla 11. Características del bloque

Se han calculado los recubrimientos longitudinales y transversales reales, entre las imágenes y las pasadas, como se ve en la tabla 13, el solape longitudinal medio entre las imágenes es del 80.371 %, es decir un 0.371% superior al recubrimiento teórico.

Por otra parte, el recubrimiento transversal entre las pasadas es también superior al teórico, el solape entre la pasada 1-8 es un 4% superior al teórico y en entre la pasada 8-6 es un 1.19% mayor.

Imagen	Pasada	Coordenadas de los Fotocentros		Solape long. (%)	Entre las Imágenes	Solape trans. (%)	Entre las Imágenes	media (%)
		X (m)	Y (m)					
58933	1	447561.922	4473404.146	80.384	58933-58934	83.877	58933-58842	PASADA 1-8 84.007
58934	1	447792.841	4473403.693	80.334	58934-58935	83.940	58934-58843	
58935	1	448024.346	4473403.248	80.345	58935-58936	84.007	58935-58844	
58936	1	448255.719	4473402.821	80.363	58936-58937	84.069	58936-58845	
58937	1	448486.887	4473402.392			84.123	58937-58846	
58842	8	448490.017	4473113.793	80.374	58842-58843	81.260	58842-58622	PASADA 8-6 81.194
58843	8	448258.978	4473114.474	80.369	58843-58844	81.227	58843-58623	
58844	8	448027.879	4473115.231	80.375	58844-58845	81.194	58844-58624	
58845	8	447796.858	4473115.918	80.471	58845-58846	81.171	58845-58625	
58846	8	447566.963	4473116.466			81.156	58846-58626	
58622	6	448475.874	4472776.304	80.430	58622-58623	65.137	58842-58622	PASADA 1-6 65.201
58623	6	448245.494	4472776.400	80.318	58623-58624	65.168	58843-58623	
58624	6	448013.795	4472776.545	80.405	58624-58625	65.201	58844-58624	
58625	6	447783.124	4472776.834	80.352	58625-58626	65.240	58845-58625	
58626	6	447551.831	4472777.097	80.371	Media	65.279	58846-58626	

Tabla 12. Recubrimientos reales

El GSD teórico es de 9 cm, pero en realidad varía entre las zonas de mayor y menor altitud. La altitud máxima es de 793.4 m y la mínima de 636.5 m y la altitud media en la zona de edificios es de 700 m.

Como se ve en la Tabla 13, el GSD es un 4.30 % menor (mayor resolución geométrica) en la zona de mayor altitud con respecto a la de menor altitud.

focal	210.75	mm			
cartografía a escala	1/1000				
error máximo	0.2	m			
GSD máximo	0.1	m			
altura de vuelo	3647.596	m			
GSD	0.090	m			
tamaño del píxel (mm)	0.0052	mm			
	altura del terreno (m)	Altura vuelo (m)	a. vuelo media sobre el n.m.m (m)	GSD (m)	Diferencia (%)
altura máxima (m)	793.4	3569.146		0.088	2.15
altura mínima (m)	636.5	3726.046		0.092	-2.15
altura media (zona de edificios) (m)	700	3662.546		0.0904	-0.41
altura media (m)	714.95	3647.596	4362.546	0.090	

Tabla 13. GSD a diferentes alturas

La cota de la parte superior de un edificio estándar, con respecto al terreno, es de 30 metros, por tanto el GSD varía un 0.82% entre ambos.

	altura (m)	Altura vuelo (m)	GSD (m)	Diferencia (%)
<b>Edificio</b>	700	3662.546	0.090	0.82
<b>Terreno</b>	670	3692.546	0.091	

**Tabla 14. Variación del GSD entre un edificio y el terreno**

A la vista de los resultados, las diferencias no son significativas y en ningún caso se supera el GSD de 10 cm, con el que se van a obtener los productos finales.

#### - **Imágenes**

El bloque se compone de 15 imágenes multispectrales (rojo, verde, azul e infrarrojo próximo) en extensión .TIFF y no comprimidas. Con un formato de 13080 x 20010 píxeles, con un tamaño de píxel de 5.2 micras y por tanto, un formato en milímetros de 104.054 x 68.016 mm y resolución radiométrica de 8 bits por píxel.

<b>Espacio de almacenamiento</b>	
N.bits/píxel	8
N.bytes/píxel	1
bandas	4
bytes/imagen	1046923200
tasa de compresión ( )	1
bytes/imagen	1046923200
Mb/imagen	998.424
Gigabyte/imagen	0.998

**Tabla 15. Tamaño de las imágenes**

Se ha seleccionado una de las imágenes para comprobar su radiometría. Las bandas 1, 2 y 3 se corresponden con las bandas Red, Green, Blue, respectivamente.

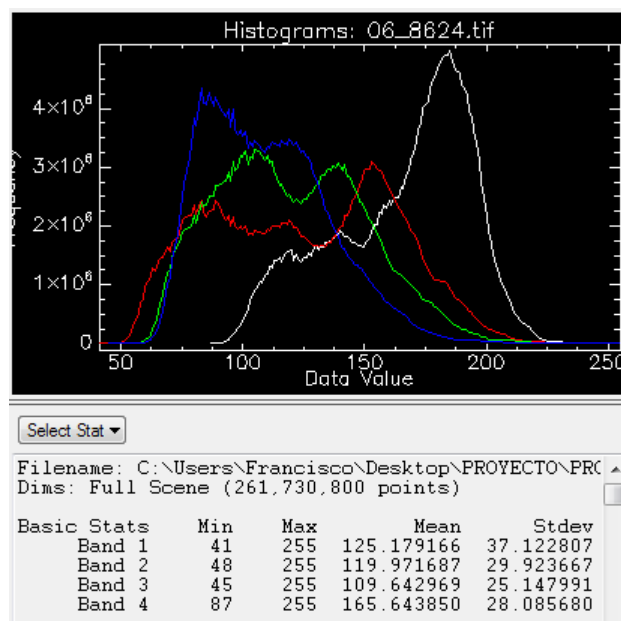


Figura 17. Histograma

Visualmente las imágenes se ven nítidas y con buena apariencia y contraste, no se aprecian zonas quemadas, ni totalmente oscuras, con nivel digital igual a 0, ya que en las zonas de sombras se aprecian todas las entidades.

En vista del histograma la exposición es correcta, ya que no tiende a estar en la zona de sombras (Niveles Digitales bajos), es decir, subexpuesta. Ni a estar en la zona de luces (Niveles Digitales altos), es decir, sobreexpuesta.

La media indica el brillo o luminosidad de cada banda, por tanto las tres bandas tienen un brillo similar, destacando la banda Red. La desviación estándar indica el contraste, cuanto menor sea este valor menor será el contraste. A vista del histograma la información se distribuye por toda la zona intermedia, por tanto, el contraste es ideal para una imagen de estas características. Que haya un buen contraste con los valores que se aprecian en el histograma no quiere decir que sea el contraste óptimo para imágenes tomadas en otro tipo de lugares y situaciones.

Si la información se acumulara en una misma zona del histograma sería una imagen poco contrastada y si se acumulara en ambos extremos sería una imagen con alto contraste.

Las imágenes han sido entregadas post-procesadas, con correcciones radiométricas, corrigiendo píxeles y ecualizando el histograma, correcciones geométricas basadas en las distorsiones del sensor y para finalizar se les ha aplicado los parámetros de orientación externa.

- **Parámetros de orientación interna.**

Permiten realizar la orientación interna y vienen especificados en el certificado de calibración de la cámara.

```

Ultracam.cam
1 Focal Length (mm)
2 210.750
3 Principal Point Offset xpoff ypoff in mm
4 0.000e+00 0.000e+00
5 How many fiducial pairs (max 8):
6 4
7 Fiducial x,y pairs in mm
8 -34.010 -52.020
9 -34.010 52.020
10 34.010 52.020
11 34.010 -52.020
12 Symmetrical Lens Distortion Odd-order Poly Coeffs c0,c1,c2,c3 (c0=offset)
13 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00
14 Decentering Lens Coeffs p1,p2,p3
15 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00
16 How many distortion pairs (max 20):
17 0
18 Distortion Data Units (m=radial dist in mm, d=field angle in deg):
19 m
20 Distortion Data Pairs, if any (Radius in mm or deg, Distortion in Microns):
21
    
```

Figura 18. Fichero de cámara empleado por SOCET SET

- **Parámetros de orientación externa.**

Esta información es la disponible en las bases de datos oficiales de PNOA10 y son las coordenadas de los centros de proyección de los fotogramas (Xo, Yo, Zo) y los valores angulares ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ).

Parámetros de orientación externa iniciales del bloque fotogramétrico.

PASADA	IMAGE ID	ESTE_ETRS89 (m)	NORTE_ETRS89 (m)	h_ELIP_ETR (m)	$\omega$ (°)	$\phi$ (°)	$\kappa$ (°)	H_ORTO (m)
1	58933	447561.922	4473404.146	4403.365	-0.062020	0.070600	-179.909710	4351.685
1	58934	447792.841	4473403.693	4403.687	-0.030550	0.066370	-179.851340	4352.008
1	58935	448024.346	4473403.248	4403.932	-0.043530	0.065570	-179.812960	4352.255
1	58936	448255.719	4473402.821	4404.151	-0.050760	0.070400	-179.811830	4352.475
1	58937	448486.887	4473402.392	4404.363	-0.033010	0.052110	-179.827840	4352.688
8	58842	448490.017	4473113.793	4381.158	0.034880	-0.072190	0.059250	4329.439
8	58843	448258.978	4473114.474	4381.289	0.047560	-0.070690	0.004830	4329.568
8	58844	448027.879	4473115.231	4381.378	0.047670	-0.078950	0.064370	4328.656
8	58845	447795.858	4473115.918	4381.527	0.031640	-0.072920	0.023980	4329.803
8	58846	447566.963	4473116.466	4381.784	0.031280	-0.065620	0.020020	4330.058
6	58622	448475.874	4472776.304	4386.659	0.029470	-0.071850	0.247650	4334.93
6	58623	448245.494	4472776.400	4386.543	0.036530	-0.061690	0.226870	4334.812
6	58624	448013.795	4472776.545	4386.492	0.043590	-0.067580	0.183030	4334.759
6	58625	447783.124	4472776.834	4386.574	0.037780	-0.083290	0.168320	4334.839
6	58626	447551.831	4472777.097	4386.711	0.029720	-0.067160	0.206520	4334.974

Tabla 16. Parámetros de orientación externa iniciales (POE)

Según el informe de ejecución de vuelo estos parámetros tienen un error medio cuadrático (RMS) máximo en los foto-centros de:

	X	Y	Z
RMS (m)	0.02	0.03	0.05

Tabla 17. Error medio cuadrático de las coordenadas de los foto-centros

Y una precisión en los ángulos  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$  de:

	Omega	Phi	Kappa
RMS (grad)	0.008	0.008	0.015

Tabla 18. Error medio cuadrático de los ángulos

La precisión obtenida en los ángulos de orientación es independiente y solo depende de los errores propios del sistema inercial.

#### - Puntos de control

Se usan porque se han apreciado diferencias importantes entre los puntos del modelo considerado los POE suministrados y los datos del LiDAR de la zona, se han extraídos varios puntos de la nube LiDAR que hay de la zona y tienen la siguiente distribución en el bloque:



Figura 19. Distribución de los puntos de control (esquinas superior e inferior y zona centro).

En la esquina superior izquierda se sitúa el PC\_1, en el centro superior el PC\_3, en la esquina superior derecha el PC\_5, en la esquina inferior izquierda el PC\_2, en el centro abajo el PC\_4 y en la esquina inferior derecha el PC\_6.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
GPC_1	447268.637		4473994.799	702.860
GPC_2	447259.864		4472693.539	691.910
GPC_3	448055.036		4473861.232	687.240
GPC_4	448047.844		4472726.266	677.940
GPC_5	448695.349		4473899.387	673.000
GPC_6	448757.849		4472632.644	673.970

Tabla 19. Coordenadas de los puntos de control

La incertidumbre de los PC es de 0.1 metros en X e Y y de 0.15 metros en Z.

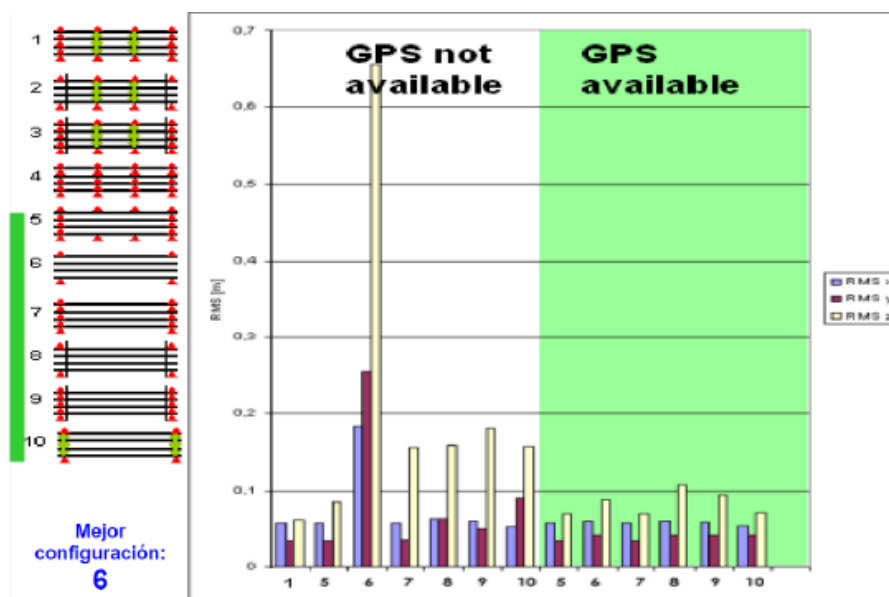


Tabla 20. Integración de las posiciones GNSS en el ajuste de bloques

Al tratarse de posicionamiento absoluto, ya que se tienen estaciones de referencia a menos de 30 kilómetros de la zona del proyecto, la configuración de solo 6 puntos de control situados en el centro y en las esquinas es suficiente, como se ve en la Tabla 20, ya que el GPS va dando la posición con precisión absoluta, con lo que la solución final puede dar RMS (error medio cuadrático) en X, Y, Z menores de 0.1 metros siempre y cuando los puntos de control sean de calidad.

### 5.1.2. Definición del proyecto e importación de los datos de partida.

Se procede a trabajar con la estación fotogramétrica en la que se encuentra el software Socet Set que se va a utilizar en todas las fases hasta obtener los productos finales.

La importación de datos y la definición del proyecto, se divide en los siguientes pasos:

#### - **Definición del proyecto**

Se crea un nuevo proyecto con sistema de coordenadas local, datum WGS84, proyección, altura máxima de 750 m y mínima de 600 m.

#### - **Importación de imágenes**

Se importan los fotogramas que se van a utilizar en el proyecto y se introducen los parámetros de orientación externa proporcionados, que se van a usar como parámetros iniciales.

#### - **Importación de la cámara**

En base al certificado de calibración de la cámara usada se incorpora la focal, la posición del punto principal de autocolimación y las distorsiones y el tamaño del píxel. El formato se lee directamente de la imagen

#### - **Creación de la pirámide de imágenes**

Debido a la gran resolución y tamaño de las imágenes se realiza este proceso, que tiene como objetivo obtener para cada fotograma distintos niveles de resolución, con el fin de poder visualizarlas más fácilmente y de poder aplicar las técnicas de correlación, tanto para la generación de puntos de paso y enlace, como para la medida automática de puntos 3D para los modelos digitales de elevaciones.

#### - **Importación de los puntos de control**

Se importan los puntos de control que van a ser utilizados en la comprobación de la orientación del bloque fotogramétrico, estos han sido extraídos de la nube de puntos LiDAR que hay de la zona y presentan una incertidumbre igual o inferior a 10 centímetros en X e Y e igual o inferior a 15 centímetros en Z.

### **5.1.3. Orientación**

Este proceso se llevó a cabo cuando se verificó que con los POE proporcionados existen diferencias entre la cota proporcionada por los puntos del terreno y las registradas por el LiDAR.

Esto hizo que se descartara la altimetría de los POE suministrados ( la planimetría era correcta) y se reorientaron los vuelos siguiendo un esquema clásico basado en la orientación indirecta de las imágenes mediante puntos de apoyo, aerotriangulación y ajuste de bloques.

El fin de la orientación es la reconstrucción del haz perspectivo en el instante de la toma fotográfica, como solución se obtienen los parámetros de orientación externa (POE) de los centros de proyección del fotograma en el momento de la toma.

La orientación se divide en orientación interna y orientación externa:

#### - **Orientación interna**

Relaciona el sistema de coordenadas instrumento con el sistema de coordenadas imagen.

Los parámetros de orientación interna vienen en el certificado de la cámara y son: la distancia focal, el formato, el tamaño del píxel, las coordenadas del punto principal (PP) y los valores de la distorsión, en este caso las imágenes vienen libres de distorsión.

Al tratarse de una cámara digital, las relaciones entre el sistema de coordenadas imagen del sensor y el sistema de fotocoordenadas de la cámara es constante, por lo que sólo es necesario considerar el tamaño del sensor, el tamaño del píxel, la distancia focal y la posición del punto principal. No es necesario considerar la distorsión radial ya que las imágenes proporcionadas por la cámara en nivel 2 están corregidas de distorsión radial.

#### - **Orientación Externa**

Se verificó que con los POE proporcionados existían diferencias entre la cota proporcionada por los puntos del terreno y las registradas por el LiDAR.

Esto llevó a la necesidad de descartar la altimetría de los POE suministrados (la planimetría era correcta) y reorientar los vuelos siguiendo un esquema clásico basado en la orientación indirecta de las imágenes mediante puntos de apoyo, aerotriangulación y ajuste de bloques.

La orientación externa relaciona el sistema de coordenadas terreno con el sistema de coordenadas instrumento. Se resuelve llevando a cabo una aerotriangulación por ajustes de haces, que se basa en la condición de colinealidad, la cual tiene como principio que el centro de proyección, el punto imagen y el punto terreno estén en la misma recta.

Se divide en orientación relativa y en orientación absoluta:

- **Orientación relativa**

Se obtienen puntos de paso y enlace que relacionan las imágenes que componen el bloque fotogramétrico y se logra un mejor ajuste entre las imágenes, por lo que la visión estereoscópica de los diferentes modelos se mejora.

- **Orientación absoluta**

El siguiente paso es la orientación absoluta, donde se miden y se comprueban los puntos de control y los puntos de paso o enlace (tie points) para finalmente realizar el Solve.

En Interactive Point Measurement (IPM), a partir de los puntos de control importados, se busca cada punto a partir de su código y se ve en que imágenes se encuentra, se comprueba que esté correctamente situado y en caso contrario se vuelve a medir de forma automática con Auto Two (que se basa en técnicas de matching), o de forma manual con la opción (*Sample*).

En las primeras soluciones, con los POE iniciales, la coordenada Z obtenida no se parecía a la Z de la nube de puntos LiDAR, variaba en torno a unos 100 metros aproximadamente, era debido a que en el archivo de los parámetros de orientación externa iniciales había un fallo en las alturas elipsoidales de las imágenes.

La ondulación media del geoide en la zona del proyecto es:  $N = h - H = 51.711$  metros, y todo hacía indicar que había una confusión entre altura elipsoidal (h) y altura ortométrica (H) en la base de datos del proyecto.

Así que a la altura elipsoidal del archivo de los parámetros de orientación externa iniciales se le restó dos veces la ondulación del geoide (N) y con esos nuevos datos se volvió a introducir los parámetros de orientación externa (POE) iniciales. Se consiguió una aproximación en la altura elipsoidal, para poder llevar a cabo la resolución final con buenos parámetros de orientación externa iniciales.

Resuelto lo anterior, con los puntos de enlace y los puntos de control correctamente se procede a resolver el sistema por medio de mm.cc (*Solve*).

La resolución del sistema se lleva a cabo mediante aerotriangulación por ajuste de haces, se basa en las ecuaciones de colinealidad, que relacionan el centro de proyección imagen con

el punto en la imagen y en el terreno, la resolución se hace por medio de mínimos cuadrados de forma iterativa, es decir, se obtienen unas correcciones a los parámetros de orientación externa y puntos de paso iniciales, que se usan como datos de partida en la siguiente iteración hasta que el sistema converge o los resultados obtenidos no sobrepasen la tolerancia exigida y así se dará por concluida la orientación externa del bloque fotogramétrico.

La aerotriangulación permite obtener los parámetros o sus correcciones a partir de un número mínimo de puntos de control y puntos de enlace que se distribuyen en las posiciones Grüber en las imágenes y se obtienen mediante correlación automática. El fin de los puntos de enlace es introducir dos ecuaciones por cada imagen en la que aparezcan, por tanto, se aumenta la redundancia en la resolución del ajuste del bloque.

El bloque se compone de 15 imágenes en 3 pasadas (5 imágenes por pasada) y se tienen 6 puntos de control completos. Por tanto el sistema se compone:

- Observaciones: 2 fotocoordenadas por punto y por foto.
- Incógnitas: 15 imágenes x 6 Parámetros de Orientación Externa = 90 + las coordenadas de los puntos de paso.

La redundancia, que es igual al número de ecuaciones menos el de incógnitas, es de 1655 y el sistema se ha resuelto en 3 iteraciones.

La orientación queda resuelta cuando el residuo de los puntos de control y de paso es inferior al tamaño del píxel, es decir, al GSD del vuelo, e inferior a la calidad posicional de los puntos de control (PC).

Se obtiene un informe de residuos, que debe ser repasado para comprobar los residuos de cada punto de control y enlace y ver que entren dentro de los límites establecidos. En la Tabla 21 se presenta el informe de residuos por imágenes, es decir, el RMS residual medio de los puntos de control y de paso que intervienen en cada imagen.

Informe de residuos ( por imagen)	
Imagen	RMS residual (pixel)
01_8933	0.627
01_8934	0.493
01_8935	0.545
01_8936	0.483
01_8937	0.818
06_8622	0.537
06_8623	0.495
06_8624	0.538
06_8625	0.500
06_8626	0.479
08_8842	0.592
08_8843	0.537
08_8844	0.520
08_8845	0.568
08_8846	0.580
Total RMS	0.557

Tabla 21. Informe de residuos, por imagen

Como resultado del sistema se obtienen las correcciones a  $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$  de los centros de proyección de las imágenes y las correcciones a  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  de los puntos de enlace.

PASADA	IMAGE ID	ESTE_ETRS89 (m)	NORTE_ETRS89 (m)	h_ELIP_ETR (m)	$\omega$ (°)	$\varphi$ (°)	$\kappa$ (°)
1	01_8933	447561.922	4473404.146	4297.767	-0.062020	0.070600	-179.909710
1	01_8934	447792.841	4473403.693	4298.125	-0.030550	0.066370	-179.851340
1	01_8935	448024.346	4473403.248	4298.430	-0.043530	0.065570	-179.812960
1	01_8936	448255.719	4473402.821	4298.520	-0.050760	0.070400	-179.811830
1	01_8937	448486.887	4473402.392	4298.808	-0.033010	0.052110	-179.827840
6	06_8622	448475.160	4472775.826	4281.144	0.035506	-0.071265	0.257882
6	06_8623	448244.940	4472775.868	4281.042	0.043143	-0.059283	0.237223
6	06_8624	448013.871	4472775.635	4281.041	0.055349	-0.055259	0.194750
6	06_8625	447782.317	4472775.626	4281.120	0.053462	-0.085767	0.181131
6	06_8626	447550.603	4472775.957	4281.246	0.043336	-0.076542	0.220065
8	08_8842	448490.083	4473113.353	4275.692	0.040142	-0.065257	0.077195
8	08_8843	448258.712	4473113.655	4275.860	0.058421	-0.068312	0.022532
8	08_8844	448027.762	4473114.510	4275.960	0.056139	-0.074085	0.082697
8	08_8845	447795.804	4473115.109	4276.102	0.041529	-0.083636	0.044000
8	08_8846	447565.782	4473116.081	4276.346	0.034016	-0.078257	0.039371

Tabla 22. Parámetros de orientación externa finales

#### 5.1.4. Obtención de las nubes de puntos 3D

Para la obtención de las nubes de puntos 3D es necesario partir de un espaciado determinado, basado en las características de los modelos digitales que se quieran obtener.

El espaciado considerado es de 0.5 metros en  $X$  e  $Y$ , porque es una distancia suficiente para el uso de los Modelos Digitales en la generación de ortoimágenes con una resolución de 0.1 metros.

Con un paso de malla de 0.1 metros se definirían mejor los edificios pero se trabajaría con 25 veces más puntos, por lo que se haría inviable el desarrollo del trabajo por la gran cantidad de puntos generados y la solución final tampoco mejoraría en exceso.

Las nubes de puntos no se pueden generar en un solo archivo, ya que por las características que se les ha impuesto se obtienen millones de puntos, por lo que a la hora de trabajar con ellos, por ejemplo editando, es prácticamente imposible debido a que la estación fotogramétrica no está preparada para manejar ese volumen de datos.

Por ello se ha decidido dividir el área de trabajo en 9 partes, así se han generado 9 modelos con un solape entre ellos de 2 metros.

Sist. Ref ETRS89. Coordenadas UTM Huso 30				
	Esquina inferior izquierda		Esquina superior derecha	
MODELO	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
1	446966	4473497	447672	4474307
2	447670	4473497	448376	4474306
3	448374	4473497	449079	4474307
4	446966	4472687	447672	4473499
5	447670	4472687	448376	4473499
6	448374	4472687	449079	4473499
7	446966	4471877	447672	4472689
8	447670	4471877	448376	4472689
9	448374	4471877	449079	4472689

Tabla 23. Coordenadas de las esquinas de los modelos y distribución de ellos

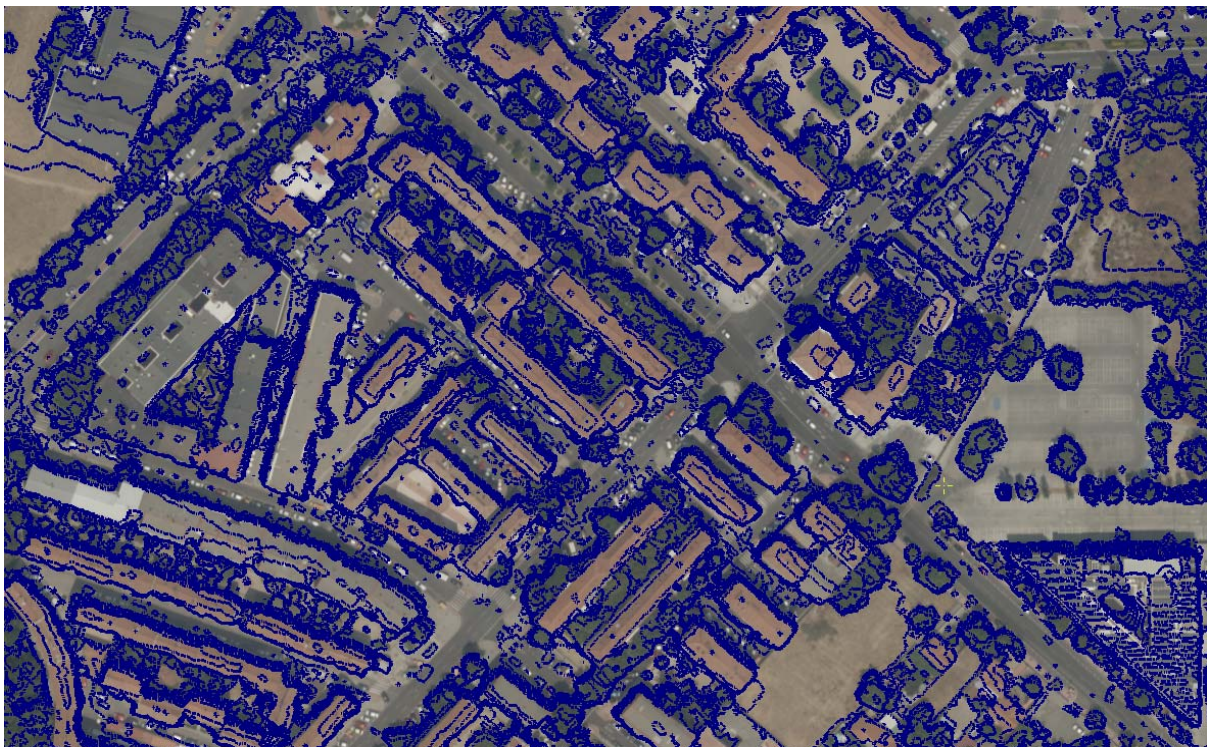
Los modelos se han generado con la herramienta Next Generation Automatic Terrain Extraction) NGATE que funciona de manera muchísimo más eficiente que Automatic Terrain Extraction (ATE) en la creación de modelos densos y precisos dentro de áreas urbanas.

Las ventajas de NGATE frente a ATE es que realiza la correlación de imágenes a nivel de píxel, el nivel de minificación utilizado puede variar en base a la precisión y velocidad que se desee y lo más importante es que NGATE trabaja mucho mejor en áreas difíciles, como en zonas urbanas a gran escala, esto da lugar a una mejor precisión en la obtención del producto y a la reducción del tiempo de edición del Modelo Digital.

NGATE posee varias estrategias según el tipo de área sobre la que se trabaja, en este caso se trata, en gran medida, de un área urbana con edificios altos por tanto se ha utilizado la opción `ngate_urban_canyon.strategy`, que es una estrategia indicada para la medida de puntos por correlación en zonas de alta discontinuidad en los elementos, como en el caso de zonas urbanas con edificación de gran altura. El principio básico de esta herramienta es la correlación automática de imágenes a partir de métodos basados en el área (ABM).

En propiedades se les ha impuesto el área que ocupa cada modelo, un formato de triangulación TIN, unidades en metros y un paso de malla de 0.5 metros, por lo que cada modelo se compone de unos 2,2 millones de puntos aproximadamente.

Se ha elegido un paso de malla de 0.5 metros debido a que la metodología utilizada de correlación automática de imágenes, incluso dividiendo la zona del proyecto en 9 partes, requiere bastante tiempo de procesado por parte de la estación fotogramétrica y al final se obtienen unas nubes de puntos bastantes densas de varios millones de puntos que son muy difíciles de editar y procesar por parte de la computadora. Incluso con un paso de malla de 0.5 metros la edición de los modelos resultantes, con 2.2 millones de puntos, es complicada.



**Figura 20. Modelo generado con NGATE**

Finalmente se obtienen los modelos definidos por sus curvas de nivel y que tendrán que ser editados para resolver los errores que suelen aparecer.

#### **5.1.5. Edición de los MDS**

Los modelos generados suelen presentar errores, por ejemplo en zonas de sombra suele haber ausencia de puntos que definan los objetos debido a que las técnicas de correlación automática no son capaces de relacionar las imágenes, algunas carreteras aparecen con zonas

de cota superior a la verdadera esto debe ser a que el método de correlación no procesa correctamente las líneas de separación de carriles, también ocurre en campos de fútbol.

En primera instancia los puntos 3D resultantes de la correlación automática de imágenes se han exportado a .ASCII, de .ASCII a .txt y se han tratado con el software LAStools, esto es debido a que incluso con los modelos compuestos por unos 2.2 millones de puntos, la estación fotogramétrica no estaba preparada para la edición de tal cantidad de datos.

Con LAStools se han editado los errores más groseros y se ha generado un fichero .LAS que se han vuelto a importar a Socet Set, con ello se ha conseguido que el trabajo con estos datos en sea más fluido y con el uso de la herramienta Interactive Terrain Edit (ITE), cuando ha sido posible, se ha llevado a cabo la edición de las nubes de puntos.

Principalmente se han utilizado las siguientes herramientas; Clip\_inside, Smothing\_convolution y Geomorphic Editor.

- Clip inside: es un algoritmo de edición de área, elimina los puntos dentro del perímetro del área seleccionada, es esencial en la eliminación de puntos muy altos y pozos.
- Smothing convolution: el principio fundamental de este algoritmo es hacer una media ponderada de los puntos que se encuentran dentro del área seleccionada con lo que se consigue eliminar ruido de elevación y suavizar la zona.

Una vez que se ha eliminado los puntos groseros (pozos y puntos muy altos) con Clip inside, se hace uso del algoritmo de suavizado Smothing convolution obteniéndose una superficie libre de ruido altimétrico (Figura 23).

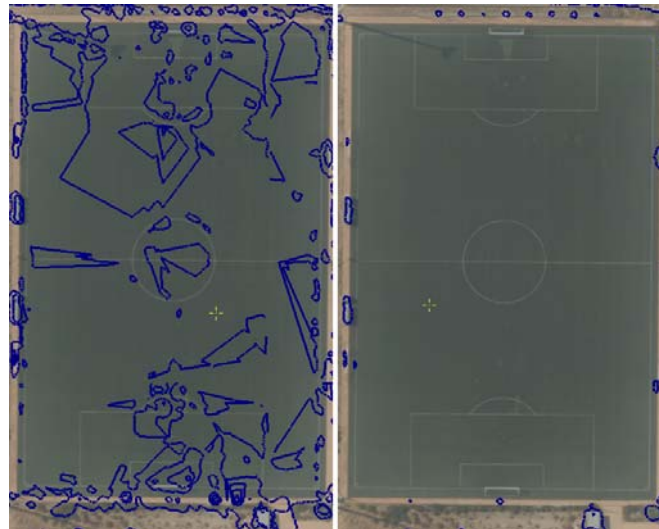


Figura 21. Edición de una zona plana eliminando puntos groseros y después suavizándola

- Line editor: con esta herramienta se generan líneas de rotura (Figura 24). Se puede hacer según a unos criterios de anchura a los lados u otras características.

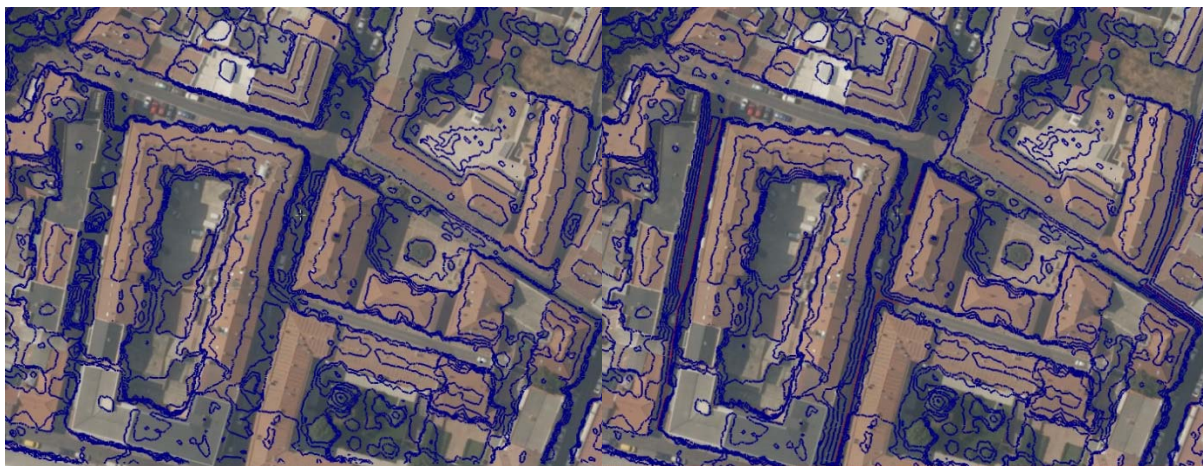


Figura 22. Edición de zonas entre edificios utilizando líneas de rotura

Una vez editado el modelo se exporta a un fichero ASCII y con la herramienta LAStools o mediante un sistema de información geográfica (SIG) como QGIS se puede abrir y trabajar con él.



Figura 23. MDS a partir del tratamiento bloque de imágenes, con el uso del software Socet Set

Finalmente después de la edición se ha obtenido un Modelo Digital de Superficies con un paso de malla de 0.5 metros.

A continuación se expone la obtención del MDT, NGATE tiene una herramienta que a partir de unos parámetros de anchura máxima y altura mínima elimina las construcciones y vegetación.

Pero se exportaron los 9 MDS en los que se divide el trabajo con Socet Set a .ASCII y de ahí a .txt. El siguiente paso fue utilizar la herramienta Lasground\_new de LAStools y se obtuvieron los puntos pertenecientes al terreno (clase 2), antes de darlos por válidos se editaron comparándolos con el MDT obtenido a partir del procesado de los datos LiDAR.

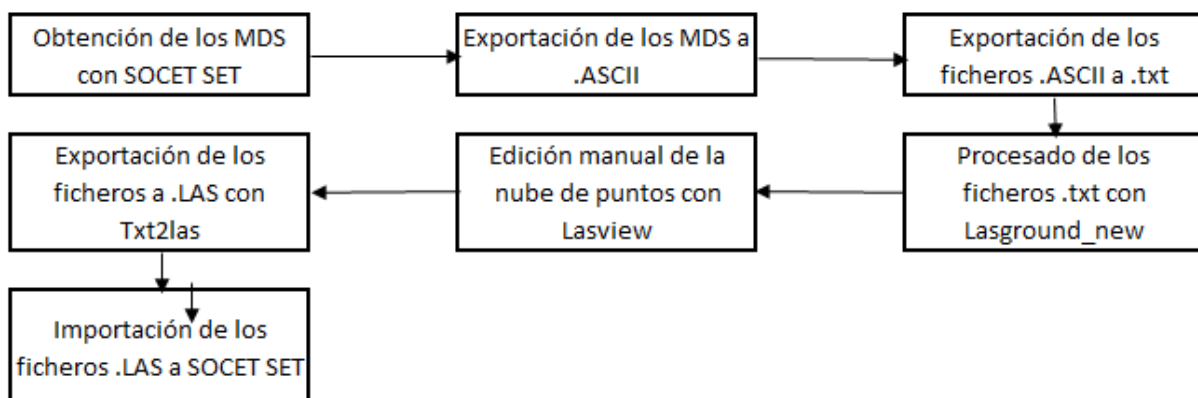


Figura 24. Obtención del MDT

Así se obtuvo el MDT a partir del procesado y edición de los datos obtenidos por metodologías fotogramétricas sobre el bloque de imágenes:

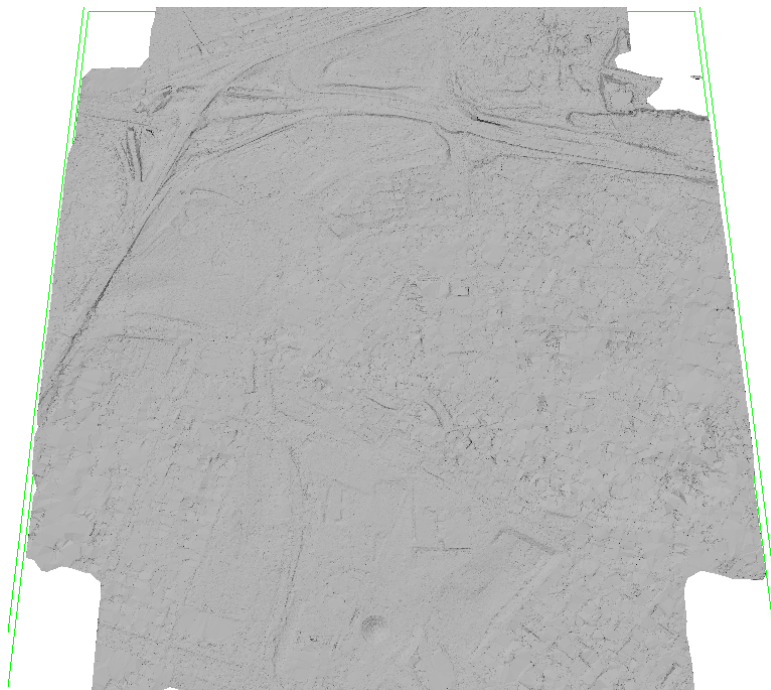


Figura 25. MDT a partir del tratamiento del bloque de imágenes con el uso del software Socet Set y LasTools

Después de la edición se ha obtenido un Modelo Digital del Terreno con un paso de malla de 0.5 metros.

## 5.2. Obtención de los MDS y MDT a partir de LiDAR

### 5.2.1. Datos de partida

Se parte de cuatro ficheros .LAS con extensión de 1x1 km, aportados por el servicio de cartografía de la Comunidad de Madrid, estos ficheros están compuestos por 16 millones de puntos, es decir, con una densidad de 16 puntos por metro cuadrado y una malla regular de 0.25 x 0.25 metros, todos los puntos provienen del primer retorno.

El fichero almacena la información tal como fecha y software utilizado para su creación y de cada punto: identificador (ID), clase, intensidad del pulso, coordenadas X e Y UTM en el Huso 30 y altura elipsoidal (h) en el sistema de referencia ETRS89 (elipsoide GRS80), número de retorno y ángulo de escaneo.

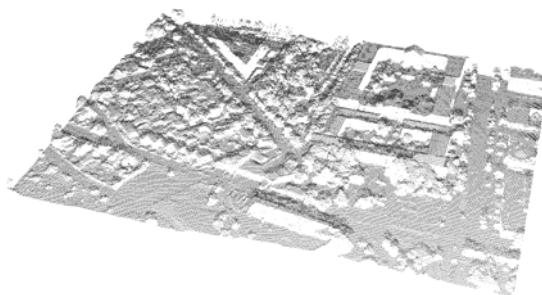


Figura 26. Nube de puntos inicial sin clasificar

### 5.2.2. Generación de los modelos digitales de superficies

La clasificación y filtrado de las nubes de puntos LiDAR se divide en varias fases:

- **Lasnoise:** Este algoritmo permite clasificar como ruido bajo o alto (noise, clase 7) los puntos que cumplan los criterios de aislamiento en base al paso (step) que se imponga. Estos puntos pueden ser eliminados o en los siguientes pasos ignorados con la opción ignore\_class.

Se basa en la geometría de los puntos y en base a un radio de actuación definido, se rastrean los puntos de la nube y se van comparando las cotas entre vecinos, si no se encuentran puntos a la misma cota o a un intervalo de cota definido, se da por hecho que el punto es erróneo, es decir, de clase 7 (noise).

- **Lasground\_new:** Permite clasificar los puntos pertenecientes al terreno (clase 2) en base a los criterios que se establezcan.

Se basa en la reconstrucción progresiva del terreno. Primero se genera una aproximación del terreno, considerando los puntos más bajos. Se triangulan y establece un criterio de ángulo y distancia, que si es cumplido por los puntos que se encuentran dentro de cada triángulo, se clasifican como terreno. Este proceso es iterativo, por lo que se van incorporando puntos que cumplan las condiciones de pertenencia.

Lasground\_new tiene varias opciones que se amoldan a según qué terreno sea el del proyecto. En este caso hay zonas con gran cantidad de edificios por lo que se ha utilizado la opción Metrópolis que tiene un tamaño de paso de 50 metros y con ello permite eliminar todos o casi todos los edificios de la zona. También se ha seleccionado Compute\_Height para que el algoritmo calcule la altura de cada punto al terreno y se pueda usar Lasclassify sin tener que usar la opción lasheight.

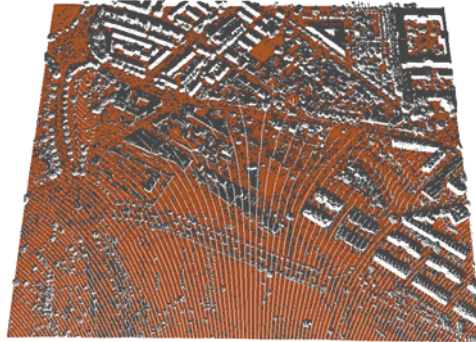


Figura 27. Clasificación de los puntos pertenecientes al terreno (marrón)

- **Lasclassify:** Previamente se debe de haber llevado a cabo la clasificación del terreno (ground) para que tenga una referencia sobre la que trabajar y así poder clasificar los demás puntos, el fin de este algoritmo es la clasificación de edificios y vegetación.

Este algoritmo agrupa los puntos en segmentos, que son áreas planimétricas delineadas por un contorno cerrado. La segmentación se realiza desde los puntos más altos hasta la elevación más baja. En cada nivel de elevación se buscan contornos cerrados.

Hay objetos primitivos que contienen como máximo un contorno en el siguiente nivel más alto (árbol) y objetos complejos que contienen más de un contorno en el siguiente nivel (edificio con varias torres, Figura 28). Estos objetos son en principio entidades abstractas que representan jerarquías de contornos cerrados y esta jerarquía es la que facilita la búsqueda de superficies y objetos reales.

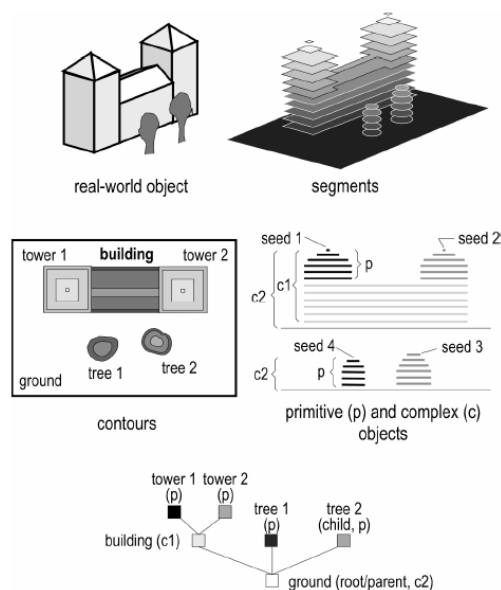


Figura 28. Jerarquía de objetos

A partir del análisis del comportamiento de los segmentos y la forma del objeto se determina el tipo de entidad que es en el mundo real, se pueden utilizar numerosos criterios para determinar los objetos y el nivel de elevación en el que empiezan: geometría, atributos, forma, comportamiento con los objetos adyacentes, etc.

En este caso para obtener edificios se busca puntos que estén como mínimo a 2 metros sobre el suelo y que entre ellos presenten, en este caso, forma planar 0.1 (tejados de edificios), o rugosa (rugged) 0.4 para los puntos pertenecientes a árboles, el resultado que han dado estos parámetros ha sido buenos, debido a la densidad de la nube de puntos sobre la que se ha trabajado.

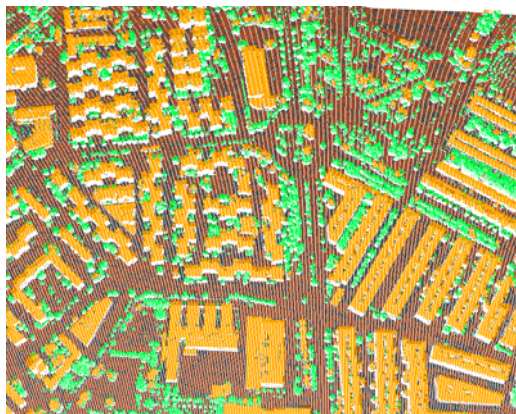


Figura 29. Clasificación de los puntos pertenecientes a árboles y construcciones

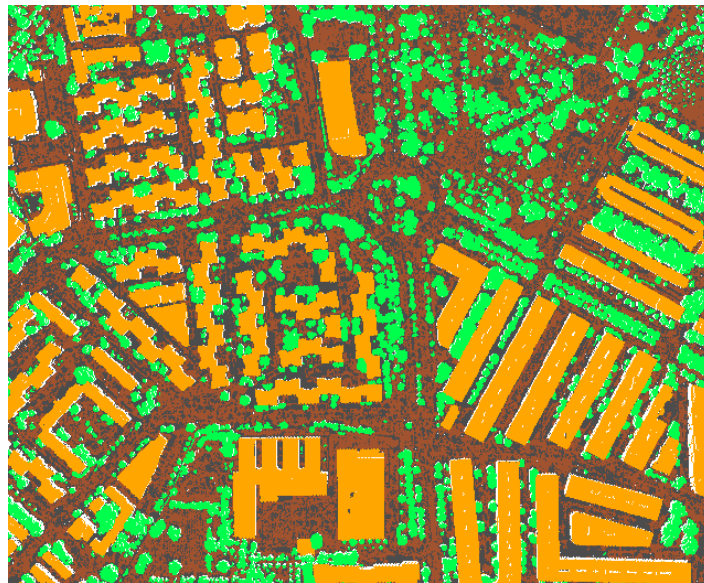
La clasificación no es exacta, aparece algún pico de edificio clasificado como vegetación y algunos árboles como edificaciones, también hay puntos sin clasificar (unclassified) en tejados de edificios con chimeneas o artefactos varios.

### 5.2.3. Edición de los modelos digitales de superficies

- **Clasificación a mano:** La clasificación de los puntos nunca es exacta y Lasclassify da resultados en los que aparecen puntos mal clasificados, pueden aparecer puntos clasificados como vegetación en edificios y viceversa. Por ello es necesario llevar a cabo una clasificación manual.

Con Lasview se abren los archivos clasificados y con los diferentes comandos del desplegable se van reclasificando e incluso eliminando algún punto. El programa tiene 2.5D que facilita la edición y control de la nube de puntos, usando vistas en diferentes perspectivas y perfiles. Para trabajar mejor por la nube de puntos se seleccionan pequeñas porciones de

terreno y se usan las herramientas de zoom, alejarse/acercarse, etc..., el producto final es una nube de puntos correctamente clasificada (Figura 30).



**Figura 30. Puntos clasificados correctamente**

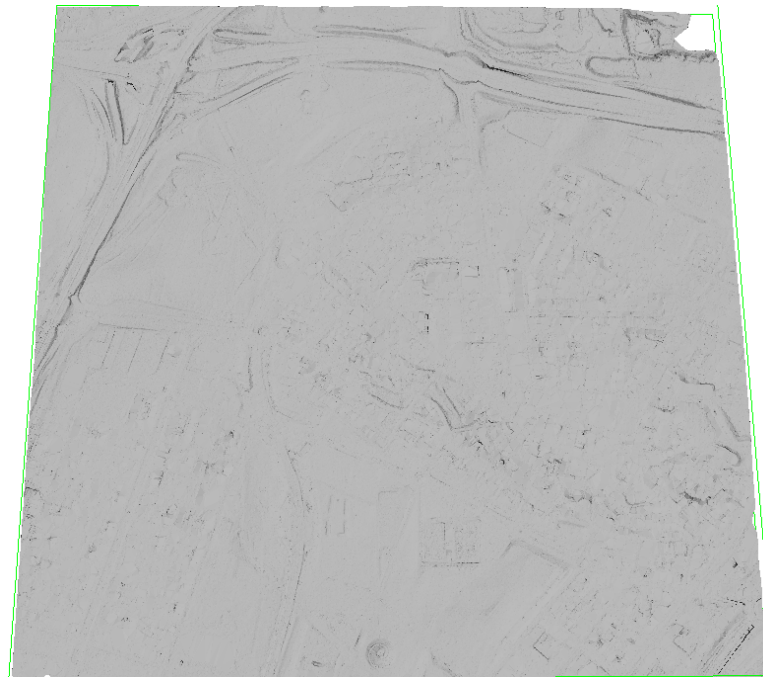
Finalmente se obtiene el modelo digital de superficie (MDS) que se compone de todas las clases de puntos, excepto la clase 7 (noise).



**Figura 31. MDS a partir de LIDAR con el uso del software LasTools**

Se ha obtenido un Modelo Digital de Superficie con un paso de malla de 0.25 metros.

Para la obtención del modelo digital del terreno (MDT) solo hay que elegir los puntos con clase 2 (ground).



**Figura 32. MDT a partir de Lidar con el uso del software LasTools**

Se ha obtenido un Modelo Digital del Terreno con un paso de malla de 0.25 metros.

En el capítulo 6 de resultados, se hace un control de calidad entre los conjuntos de puntos que definen los modelos, obtenidos por ambas técnicas.

### **5.3. Generación de Ground Orto y True Ortho**

Las ortoimágenes se han realizado a partir de imágenes digitales, los parámetros de orientación externa obtenidos en la fase de orientación y los modelos generados a partir del procesado de los datos obtenidos por técnicas láser (LiDAR) y por metodologías fotogramétricas aplicadas a las imágenes del bloque.

Las imágenes presentan una resolución espacial media, expresado como GSD, de 9 centímetros.

Los 4 cuatro modelos digitales obtenidos por ambas técnicas presentan las siguientes características:

- Los modelos digitales generados a partir del procesado de los datos capturados mediante técnicas láser (LiDAR):
  - Modelo Digital del Terreno con un paso de malla de 0.5 metros y una densidad media de 4 puntos por metro cuadrado.
  - Modelo Digital de Superficie con un paso de malla de 0.25 metros y una densidad media de 16 puntos por metro cuadrado.
  
- Los modelos digitales generados a partir del procesado de los datos obtenidos por metodologías fotogramétricas aplicadas a las imágenes del bloque fotogramétrico.
  - Modelo Digital del Terreno con un paso de malla de 0.5 metros y una densidad media de 4 puntos por metro cuadrado.
  - Modelo Digital de Superficie con un paso de malla de 0.25 metros y una densidad media de 16 puntos por metro cuadrado.

Los productos generados son ortofotografías en RGB, a escala 1/1000, con un tamaño de píxel de 0.1 metros, en la proyección UTM huso 30 y Sistema de Referencia ETRS89 (elipsoide GRS80), que es el sistema geodésico de referencia oficial en España de acuerdo con el Real Decreto 1071/2007 de 27 de julio.

### **Rectificación diferencial**

Socet Set lleva a cabo una rectificación diferencial directa en la que se pasa de coordenadas píxel de la imagen a coordenadas X e Y terreno, con estas últimas y el modelo digital se obtiene la Z y a partir de las coordenadas terreno y los parámetros de orientación externa por medio de las ecuaciones de colinealidad se obtienen las fotocoordenadas (x, y) para finalmente por interpolación bilineal asignar el nivel digital (ND) correspondiente a cada píxel.

Las imágenes pertenecientes a la zona del proyecto y el modelo digital empleado se importan en Socet Set.

Una de las opciones para llevar a cabo el mosaico es el método de proyección, en este caso se elige Most Nadir, es decir, el fotograma base sobre el que se proyecta el mosaico es el que se encuentre en el punto más nadiral de este, además cuanto mayor sea el solape entre

imágenes se podrán evitar más los extremos, donde hay más distorsiones y más desplazamiento debido al relieve.

Otra opción es el método de interpolación, se elige interpolación bilineal que hace un promedio de los valores de los cuatro píxeles más próximos y pondera según la distancia, por lo que los píxeles más cercanos tienen más influencia en el resultado final.

### **Mosaico**

Se genera una ortoimagen a partir de la unión de varios fotogramas ortorectificados, por tanto, entre ellos hay una serie de líneas de mosaico que se deben revisar y editar, ya que interfieren en edificios u otros objetos, apareciendo discontinuidades geométricas debido al diferente abatimiento que presentan estos elementos en las distintas imágenes y a las imperfecciones que pudiera haber en los modelos digitales.

El problema anterior es muy acentuado en zonas de edificios o elementos de gran altura usando Modelos Digitales del Terreno como se aprecia en la Figura 33. Con el uso de Modelos Digitales de Superficie estas discontinuidades geométricas se reducen considerablemente.

La edición de las discontinuidades se lleva a cabo con la herramienta SeamLine Editor que nos permite editar las líneas de mosaico a partir de una serie de herramientas como:

- Move Vertex: Pulsamos sobre el vértice de la línea y lo situamos en la zona que más nos convenga.
- Insert Vertex: Insertamos vértices en la línea para poder dirigirla por zonas complicadas de edificios o árboles.

En la figura siguiente se ve el problema de las discontinuidades geométricas.



**Figura 33. Discontinuidades geométricas**

Por tanto se debe restaurar el mosaico geoméricamente con seamline editor:



**Figura 34. Mosaico inicial**



**Figura 35. Mosaico final**

Hecho el nuevo seam, se vuelve a lanzar el mosaico pero cambiando el metodo de proyección del mosaico de Most Nadir a seam polygons, eligiendo el seam generado. Como se ve en la Figura 35 se obtiene la ortoimagen sin errores geométricos.

### **Corrección radiométrica de la ortofotografía**

Al tratarse de imágenes provenientes de un vuelo fotogramétrico que han sido ajustadas y procesadas unas respecto a las otras, no ha sido necesario realizar ningún tratamiento adicional, ya que la radiometría y el cromatismo entre imágenes presenta continuidad.

## 6. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la comparación entre las nubes de puntos pertenecientes a los modelos digitales y en los controles de calidad a las ortofotos obtenidas.

El método de control ideal sería el de realizar un método de levantamiento cuya incertidumbre estándar fuera al menos tres veces mejor que la utilizada para la realización de los modelos, pero en este caso el control se ha hecho con respecto a una nube de puntos LiDAR ya que no ha sido posible tener puntos de la zona por medio de un levantamiento de precisión.

La siguiente evaluación es a partir de elementos puntuales, es decir, por Metodologías de Control Posicional por Puntos (MCP) y en base a los siguientes test:

- NMAP (Test National Map Accuracy Standard; USBB 1947), especifica si el producto cumple con los parámetros del NMAP.
- EMAS (Test Engineering Map Accuracy Standard; ASCE 1983), proporciona la exactitud a gran escala.
- NSSDA (Test National Standard for Spatial Data Accuracy; FGDC 1998), da una calidad del producto en metros.

Dichos test han sido aplicados para la comparación entre los MDT y MDS generados a partir de las diferentes metodologías (fotogrametría y LiDAR).

Estos test se emplean independientemente sobre las coordenadas planimétricas y altimétricas de una muestra distribuida homogéneamente y con un buen número de puntos para que se cumplan las hipótesis de normalidad estadística por el teorema de grandes números, y además se deben eliminar los errores groseros.

### **6.1. Control de calidad de la coordenada Z en los puntos pertenecientes al MDS obtenido por fotogrametría.**

Se hace un control posicional en Z de una serie de puntos distribuidos por nuestro producto y el de control.

El control se hace extrayendo puntos de control de la nube LiDAR ya que no ha sido posible tener puntos de la zona por medio de un levantamiento de precisión.

Estos puntos LiDAR, según el pliego de especificaciones técnicas, presentan una incertidumbre en Z igual o inferior a 0.15 metros y un error máximo menor o igual a 0.30 metros en el 95% de los casos, no pudiendo ser nunca superior a 0.60 metros.

Para la comparación se seleccionan puntos pertenecientes al terreno y a las edificaciones, ya que son puntos que no cambian con el paso del tiempo como si ocurre con la vegetación y el arbolado. Hay que decir que los puntos pertenecientes al terreno sí que pueden estar influenciados por la presencia de vegetación y pueden variar según en la época del año en la que sean capturados.

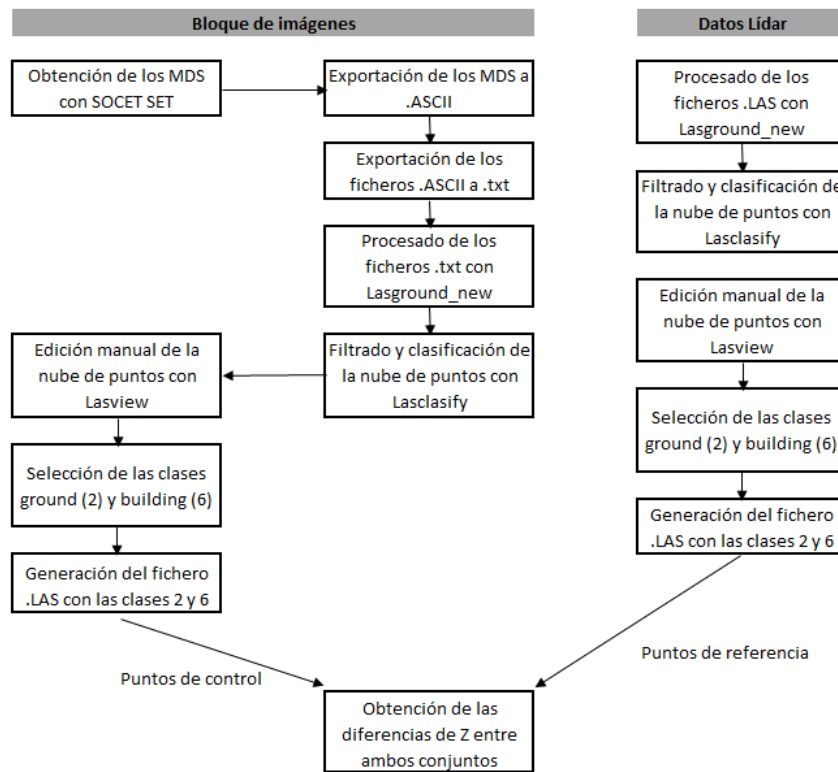
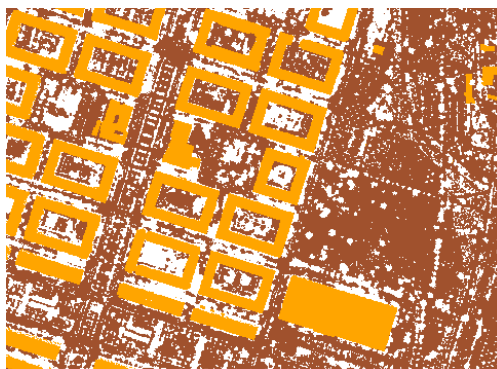


Figura 36. Esquema para la obtención de las diferencias en Z

### 6.1.1. Selección y obtención de las diferencias en Z.

Se hace un filtrado de los puntos a partir de su clasificación, por tanto se mantienen los puntos de clase 2 y clase 6, terreno y edificaciones, respectivamente.



**Figura 37. Archivo compuesto por los puntos pertenecientes al terreno y las edificaciones**

Con el uso del algoritmo LASControl se consigue, a partir de unos datos de referencia (datos LiDAR) y de control (datos obtenidos mediante técnicas de correlación automática a las imágenes que componen el bloque fotogramétrico), un fichero de diferencias entre ambos. La elección de los puntos obtenidos por métodos de correlación automática como puntos de control es debido a que el tamaño del fichero de datos que es mucho más pequeño que el de los ficheros LiDAR, así lo que se consigue es que el programa lleve a cabo la operación de forma más fluida.

Para la obtención de las diferencias se ha optado por mantener las clasificaciones ground (2) y building (6), dejando un paso de 0.5 metros con lo que los puntos de ambos conjuntos de datos que coincidan en coordenadas o se encuentren dentro de ese paso de malla serán comparados obteniéndose la diferencia de altura entre ambos.

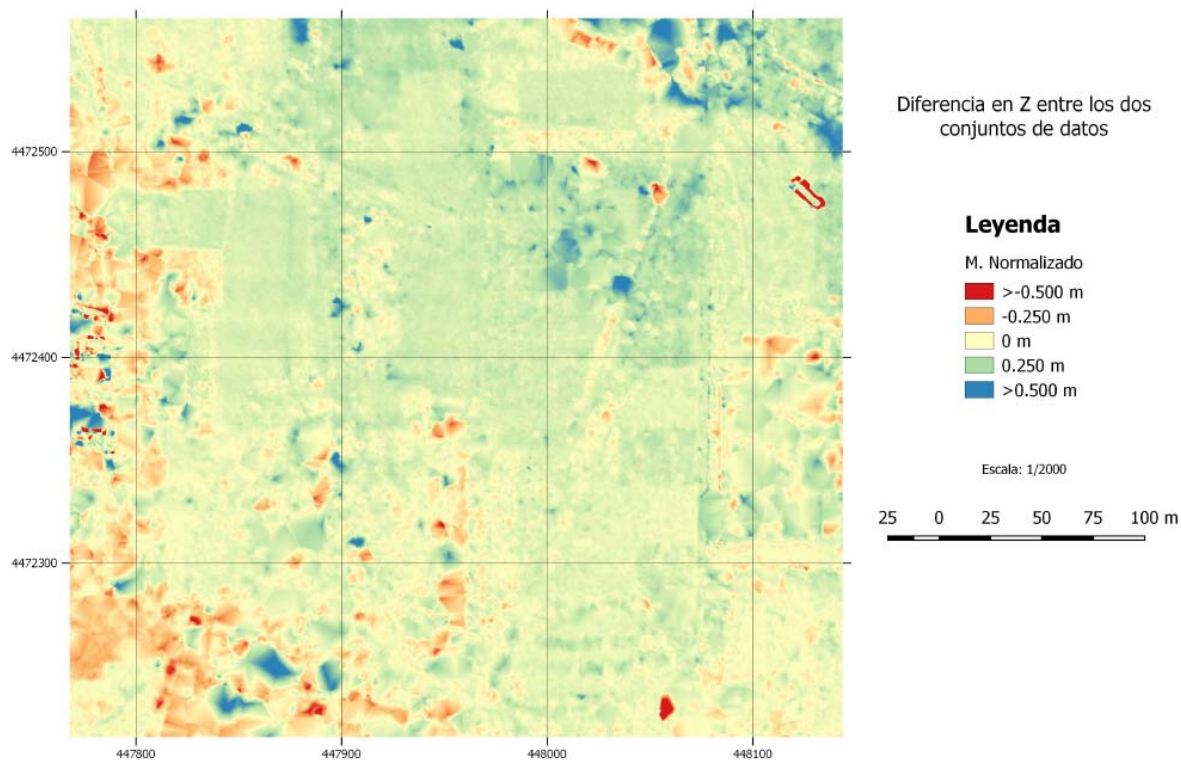
El resultado es un fichero con cinco columnas en el siguiente orden: Diferencia de dZ, Z1, X, Y, Z2.

dZ	Z1	X	Y	Z2
-0,0995919	688,29	447247,47	4473497,17	688,39
-0,0847825	688,295	447247,74	4473497,44	688,38
-0,103595	688,316	447247,74	4473497,98	688,42
-0,0623852	688,328	447248,82	4473500,13	688,39
-0,138404	688,332	447248,28	4473499,59	688,47
-0,11241	688,338	447247,74	4473498,51	688,45
-0,121603	688,348	447248,28	4473499,05	688,47
0,00281767	688,363	447248,01	4473497,17	688,36
-0,0664113	688,364	447249,35	4473501,74	688,43
-0,0104142	688,37	447248,82	4473500,67	688,38
-0,0971811	688,373	447247,74	4473499,05	688,47
-0,00919539	688,381	447228,37	4473498,51	688,39
-0,0763917	688,384	447249,35	4473501,2	688,46
-0,070391	688,4	447248,82	4473501,2	688,47
-0,0879827	688,402	447228,91	4473500,67	688,49

**Figura 38. Fichero resultante con las columnas dZ, Z1, X, Y y Z2**

A partir de las diferencias de Z se obtiene un modelo normalizado, básicamente lo que se ha hecho es restar la Z de los puntos base (LiDAR) a los puntos de control (bloque fotogramétrico).

A la vista de los modelos, las zonas con edificios presentan diferencias en Z elevadas ya que las aristas de estos no son recogidas igual mediante una técnica y otra y sobre todo, el paso de malla impuesto puede influir en la comparación de puntos pertenecientes al terreno y a las aristas de edificios.



**Figura 39. Modelo Normalizado**

En el modelo normalizado, Figura 39, se ve el resultado de la comparación entre ambos conjuntos de datos, con diferencias máximas entre modelos de entre +/- 0.5 a +/- 0.5 m, aproximadamente.

Se han eliminado los errores groseros, principalmente situados en las zonas con edificaciones y de arboleda, en estos lugares el resultado da diferencias máximas de entre +/- 25 a 28 metros aproximadamente, es decir la altura de los edificios, esto es debido principalmente al tratamiento que se le ha dado a los datos en la comparación, ya que una de sus premisas es que se puedan comparar puntos que se encuentren en un radio menor a 0.5 metros, por lo que se pueden llegar a comparar puntos situados en las aristas superiores e inferiores de un edificio. También se puede deber a que la captura de las aristas de los edificios puede tener una ligera diferencia, entre los resultados obtenidos a partir del tratamiento de datos

obtenidos por técnicas láser LiDAR y por metodologías fotogramétricas aplicadas a las imágenes.

Por lo general y según los modelos normalizados que se han obtenido, se observa que el perímetro de los edificios no es capturado de igual manera por ambas técnicas.

Por correlación automática sobre el bloque fotogramétrico la obtención del perímetro de los edificios suele ser irregular, esto se debe a que las técnicas de correlación basadas en área y en objetos están todavía en proceso de evolución, también influyen en el proceso las características de la imagen, su resolución, radiometría, las zonas de sombra y oclusión, etc.

Por otro lado, las nubes de puntos obtenidas por técnicas láser LiDAR ofrecen una malla regular con un paso determinado entre los puntos, por lo que si el paso de malla es pequeño, como es el caso de la nube de puntos LiDAR del presente proyecto, se consigue una buena resolución en la captura de las aristas de los edificios.

### **6.1.2. Evaluación de la calidad en la componente Z**

Se hace un control de calidad posicional en Z a partir de las diferencias obtenidas anteriormente con LASControl, entre el modelo obtenido por metodologías fotogramétricas aplicadas a las imágenes y el obtenido a partir de la nube de puntos LiDAR.

#### **Estándar NMAS**

Ajustándose a las exigencias de las especificaciones de los datos LiDAR con un error medio cuadrático en Z menor o igual a 0.15 metros y un error máximo menor o igual a 0.30 metros en el 95% de los casos, no pudiendo ser nunca superior a 0.60 metros.

Para la componente vertical se comprueba si el 10% de los puntos de la muestra tienen un error mayor a 0.5 metros, que es el error máximo admitido suponiendo que se va a realizar un plano a escala 1/1000 con una equidistancia entre curvas de 1 metro.

Se ha procedido a eliminar los errores groseros provenientes de la comparación.

La cantidad de puntos que están dentro de los intervalos de diferencias en Z, entre los puntos obtenidos por metodologías fotogramétricas aplicadas a las imágenes y los de control LiDAR, entre el intervalo comprendido de -0.5 a 0.5 metros es de 3.665.515 puntos, lo que

traducido en porcentaje es más del 99.9 % de la nube de puntos, por tanto, supera el test NMAS ya que hay menos del 10% de puntos que sobrepasan el error máximo admitido.

Es normal que haya diferencias entre las coordenadas, debido a que las nubes de puntos han sido obtenidas por técnicas diferentes. La coordenada Z obtenida mediante técnica láser LiDAR es más precisa que la obtenida por correlación automática sobre las imágenes, porque LiDAR es un método directo con la calidad de resultados que da la medida láser y la obtención de la coordenadas Z a partir de correlación automática de imágenes, depende de más parámetros como; las condiciones meteorológicas a la hora de la toma, la radiometría de la imagen, la técnica de correlación utilizada, etc.

### Estándar EMAS

Se calculan las diferencias entre los conjuntos de coordenadas y los valores estadísticos de ellas.

nube de puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
nº de puntos	237158	403096	101235	615438	587646	377312	372501	607684	364645
Mínimo (m)	-0.478	-0.499	-0.482	-0.460	-0.486	-0.494	-0.483	-0.444	-0.488
máximo (m)	0.496	0.470	0.500	0.476	0.460	0.458	0.469	0.469	0.479
media (m)	-0.083	0.029	0.060	-0.026	-0.014	0.081	0.001	-0.152	0.041
desv.est (m)	0.183	0.176	0.212	0.170	0.169	0.180	0.174	0.150	0.176
e.m.c (m)	0.201	0.178	0.220	0.172	0.169	0.197	0.174	0.214	0.181
percentil	0.281	0.313	0.342	0.265	0.272	0.330	0.281	0.152	0.296

Tabla 24. Valores y estadísticas de cada modelo

nº de puntos	3666715
Mínimo (m)	-0.499
máximo (m)	0.500
media (m)	-0.020
desv.est (m)	0.171
e.m.c (m)	0.186

Tabla 25. Valores y estadísticas del conjunto

La desviación estándar o típica supera la media, esto quiere decir que pueden existir errores aleatorios y sistematismos, además los máximos y mínimos lo corroboran.

Se aplica el test sobre la media para los sistematismos, y se ve si lo supera.

	Dif Z
nº de puntos	3666715
media (m)	-0.020
desv.est (m)	0.171
Tz	-222.761
Tcrítica	2.241

Tabla 26. Estadísticos para ver si hay errores sistemáticos

Con un nivel de significación del 0.05,  $t_z$  No supera el test, por tanto en la componente Z hay sistematismos. Se puede deber a que la obtención de las coordenadas en ambos casos es por técnicas distintas, por un lado la técnica LiDAR mide la altura de forma directa mediante láser y por otro la altura se obtiene tras aplicar metodologías fotogramétricas sobre el bloque de imágenes y, por tanto, puede ocurrir que la mayor parte de los puntos pertenecientes una nube esté por encima de la otra o viceversa.

Se aplica el test sobre la varianza del error para ver si el error aleatorio es aceptable.

	Dif Z
nº de puntos	3666715
Valor máx (m)	0.500
desv.est (m)	0.171
X <sup>2</sup>	275499
X <sup>2</sup> crítica	3671170

Tabla 27. Estadísticos para ver si el error aleatorio es aceptable

Con un nivel de significación de 0.05,  $X^2_z$  supera el test.

Por tanto hay aleatoriedad en el conjunto de datos, esto quiere decir que los errores presentan distribución Normal, ya que se distribuyen de manera homogénea.

### Estándar NSSDA

Se parte de la base que se cumplen las condiciones de aleatoriedad y normalidad, este estándar analiza la componente vertical Z a partir del error medio cuadrático y se obtiene el valor NSSDA vertical con un 95% de confianza:

	Dif Z
nº de puntos	3666715
e.m.c (m)	0.186
NSSDAz (m)	0.365

Tabla 28. Estándar NSSDAz

Se verifica que la exactitud vertical es de 0.365 metros al 95% de nivel de confianza.

Esta diferencia entre las nubes de puntos se ve influenciada por las diferentes técnicas y procesos llevados a cabo para su obtención. Además el método de comparación utilizado puede introducir errores, ya que se comparan puntos que estén en un radio menor a 0.5 metros y como se ha comentado se llegan a comparar puntos con Z muy diferentes, que se tratan como errores groseros y han sido eliminados para realizar el test.

## **6.2. Control de calidad de las ortoimágenes**

Los fotogramas utilizados en este proyecto son de gran calidad métrica y de gran resolución espacial, el solape entre fotogramas es del 80% con lo que se han conseguido unas ortofotos a partir de MDS sin ninguna pérdida de información por oclusión debida a los edificios.

En las ortofotos obtenidas a partir de MDT los edificios se aprecian un poco abatidos y si puede haber algo de oclusión pero casi desapercibida. Cuantitativamente el desplazamiento entre las ortoimágenes obtenidas con MDS y MDT, es variable dependiendo del punto sobre el que se esté.

El desplazamiento, en puntos situados en la parte superior de los edificios, varía en torno a +/- 0.40 metros en X y +/- 0.35 metros en Y. Esto se debe a que al realizar ortoimágenes a partir de MDT sobre zonas donde hay grandes diferencias de alturas, los objetos, cuanto más cota tengan y más alejados del punto nadiral estén, más se ven afectados por el desplazamiento debido al relieve.

### **6.2.1. Calidad radiométrica**

Se comprueba que en el producto final no haya puntos calientes (*hot spot*), que las uniones del mosaico presenten una geometría constante.

Con respecto a las imágenes utilizadas en la obtención de las ortoimágenes ya se ha hecho un análisis visual y de su histograma en el apartado: *5.1.1 Datos de partida – Imágenes*.

### **6.2.2. Calidad geométrica**

Se ha utilizado de partida la opción de proyección Most Nadir en la que la imagen principal es la que se encuentra más en la vertical y con el amplio solape que se tiene el

programa evita utilizar las zonas de los extremos de las imágenes, por tanto, se consigue evitar distorsiones y desplazamientos debidos al relieve que se intensifican proporcionalmente conforme más alejado se esté radialmente del punto nadiral.

Se obtiene un mosaico con sus líneas de corte entre las diferentes ortoimágenes que intervienen, éstas se deben controlar y editar en caso de que se encuentre alguna alteración geométrica debida a que estas líneas atraviesen algún objeto, produciendo una discontinuidad geométrica debida al diferente abatimiento que presentan, por ejemplo los edificios, en las diferentes imágenes.

### **6.2.3. Calidad posicional**

Se hace un control posicional en X e Y de una serie de puntos distribuidos en el producto de control y el producto a controlar, que es una ortoimagen obtenida a partir de un bloque de imágenes orientado y un MDS obtenido a partir del proceso de una nube de puntos LiDAR.

El método de control ideal sería el de realizar un método de levantamiento cuya incertidumbre estándar fuera al menos tres veces mejor que la utilizada para la realización de las ortoimágenes, pero en este caso se ha hecho con respecto al Catastro (<https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/mapa.aspx?pest=rc&from=OVCBusqueda&final=&ZV=NO>) ya que no ha sido posible tener puntos de la zona por medio de un levantamiento de precisión.

La cartografía catastral tiene las siguientes características:

- Sistema de Referencia ETRS89, Proyección UTM en el huso 30 y en este caso se ha consultado la Cartografía Catastral Urbana con escala 1/1000.

La evaluación es a partir de elementos puntuales, es decir, por Metodologías de Control Posicional por Puntos (MCP) y en base a los siguientes test: Test NMAP, Test EMAS y Test NMAP.



**Figura 40. Distribución de los puntos de control**

Con el sistema de información geográfica QGIS se extraen las coordenadas X e Y de una serie de puntos aleatorios distribuidos por la ortoimagen.

A tenor de la extensión de la zona se ha utilizado una muestra de 25 puntos, este aspecto es una de las claves a la hora de llevar a cabo los test estadísticos y lo ideal sería tomar un conjunto mayor de puntos de control para obtener resultados finales más fiables.

Resultados de las diferencias en planimetría:

Id	ORTOFOTO		CATASTRO		Ex [m]	Ey [m]
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]		
1	447514.051	4472919.298	447513.960	4472919.360	-0.091	0.062
2	447539.922	4473246.347	447539.850	4473246.240	-0.072	-0.107
3	448432.230	4473165.113	448432.320	4473165.030	0.090	-0.083
4	447972.717	4473331.541	447972.660	4473331.470	-0.057	-0.071
5	448203.814	4473356.152	448203.870	4473356.100	0.056	-0.052
6	448313.872	4473318.161	448313.760	4473318.040	-0.112	-0.121
7	448315.623	4473175.517	448315.750	4473175.590	0.127	0.073
8	448026.581	4473117.526	448026.510	4473117.510	-0.071	-0.016
9	448343.136	4472804.097	448343.240	4472804.010	0.104	-0.087
10	447929.602	4472928.631	447929.540	4472928.640	-0.062	0.009
11	447791.568	4473292.149	447791.520	4473292.080	-0.048	-0.069
12	447857.389	4472820.253	447857.330	4472820.140	-0.059	-0.113
13	448078.339	4473236.049	448078.200	4473235.960	-0.139	-0.089
14	447693.856	4473297.035	447693.990	4473296.910	0.134	-0.125
15	447814.947	4473135.724	447814.880	4473135.790	-0.067	0.066
16	447908.179	4473067.069	447908.210	4473067.210	0.031	0.141
17	447711.110	4473058.090	447711.070	4473058.130	-0.040	0.040
18	447706.664	4472940.035	447706.690	4472940.020	0.026	-0.015
19	447866.816	4472987.913	447866.880	4472987.940	0.064	0.027
20	448057.814	4472957.211	448057.790	4472957.140	-0.024	-0.071
21	448453.193	4472994.039	448453.110	4472994.090	-0.083	0.051
22	448198.073	4472807.312	448198.020	4472807.220	-0.053	-0.092
23	448427.122	4473384.794	448427.160	4473384.740	0.038	-0.054
24	448458.018	4472936.308	448457.920	4472936.350	-0.098	0.042
25	448235.444	4472984.742	448235.530	4472984.610	0.086	-0.132

Tabla 29. Coordenadas de los puntos en la ortofoto y en el catastro y sus diferencias

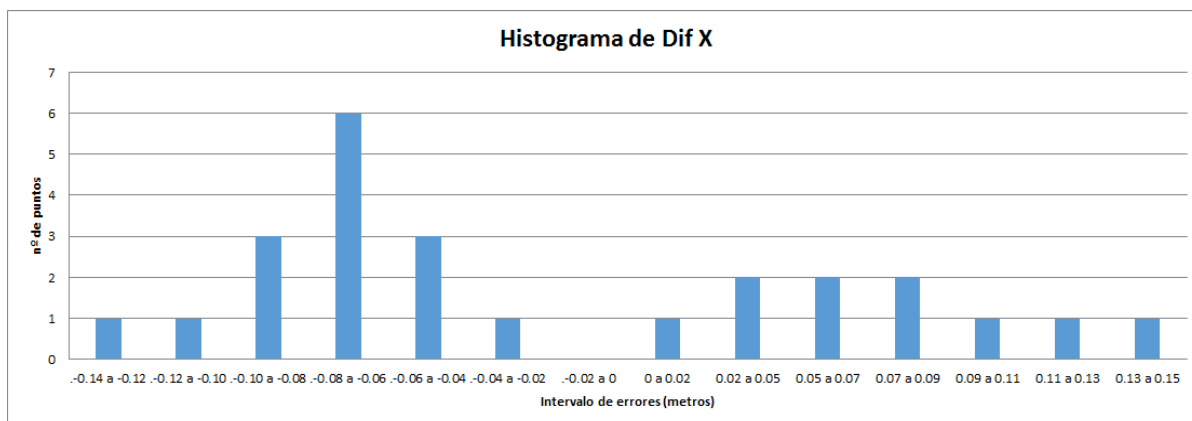


Figura 41. Número de puntos dentro de los intervalos de Diferencias en X

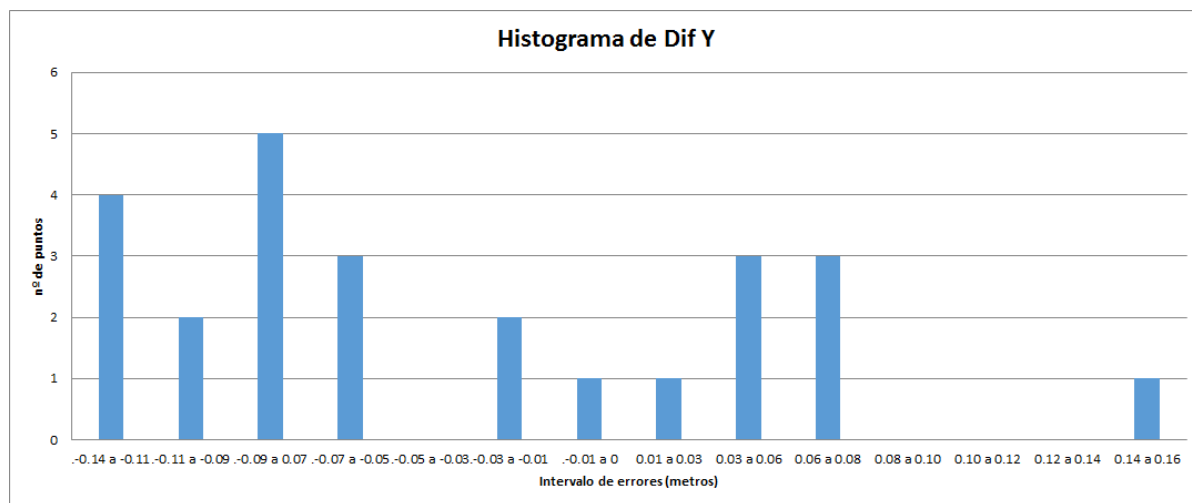


Figura 42. Número de puntos dentro de los intervalos de Diferencias en Y

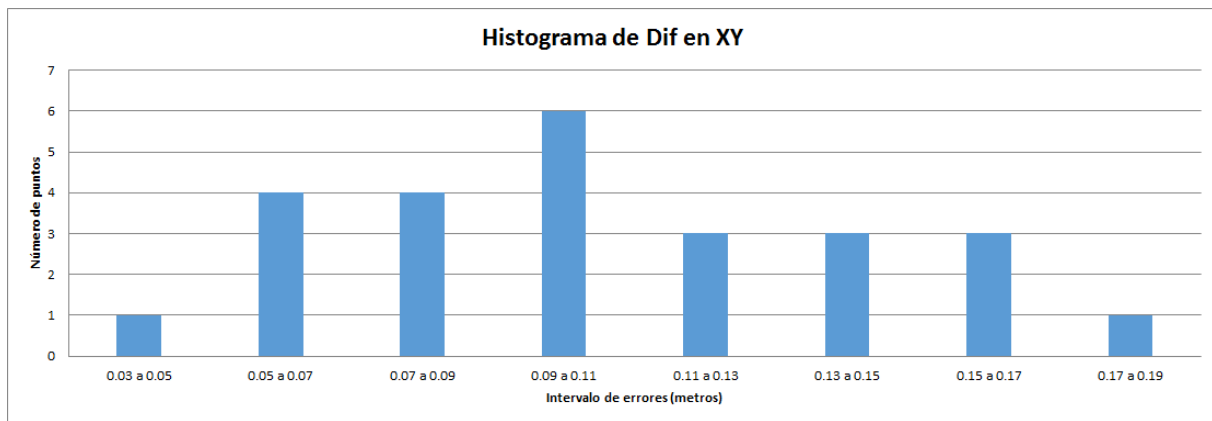


Figura 43. Número de puntos dentro de los intervalos de Diferencias en planimetría (XY)



Figura 44. Componente planimétrica del error XY

Con la incertidumbre del producto a controlar, el de control ( se asume que es 3 veces más preciso o en todo caso el Catastro ha sido la fuente de control debido a la imposibilidad de medir puntos insitu sobre el terreno), y las coordenadas de los puntos en ambos, se llevan a cabo los test estadísticos.

La información geográfica evaluada es una ortoimagen a escala 1/1000 de Ambroz que es un barrio perteneciente a Vicálvaro, municipio enclavado dentro de la Comunidad de Madrid (España) y se asume que tiene una calidad, es decir, una incertidumbre estándar en X e Y igual a  $0.2\text{mm} \cdot 1000 = 0.2$  metros.

La captura de información de la muestra ha sido de forma manual utilizando el software QGIS para obtener puntos de la ortoimagen a controlar y dentro del visor del Catastro para obtener los puntos de control equivalentes.

Hay que asumir que al capturar los puntos de forma manual se incurre en una serie de errores debidos al operador y a la resolución de la pantalla.

### Estándar NMAS

Se tiene un producto a escala 1/1000 y se toma como incertidumbre el error gráfico, es decir, 0.2 mm a la escala del plano es 0.2 metros.

El plano es de escala igual o menor a E20K, por tanto el error planimétrico límite es 0.847m (1/30" a escala 1/1000).

EX	EY	Eh
-0.091	0.062	0.110
-0.072	-0.107	0.129
0.090	-0.083	0.122
-0.057	-0.071	0.091
0.056	-0.052	0.076
-0.112	-0.121	0.165
0.127	0.073	0.146
-0.071	-0.016	0.073
0.104	-0.087	0.136
-0.062	0.009	0.063
-0.048	-0.069	0.084
-0.059	-0.113	0.127
-0.139	-0.089	0.165
0.134	-0.125	0.183
-0.067	0.066	0.094
0.031	0.141	0.144
-0.040	0.040	0.057
0.026	-0.015	0.030
0.064	0.027	0.069
-0.024	-0.071	0.075
-0.083	0.051	0.097
-0.053	-0.092	0.106
0.038	-0.054	0.066
-0.098	0.042	0.107
0.086	-0.132	0.158

Tabla 30. Errores en X, Y y componente horizontal de los errores

En vista de los resultados todos los puntos están por debajo del error máximo tolerable, ninguno ha tenido que ser desechado por error grosero y por tanto, el producto supera el test NMAS.

## Estándar EMAS

El error gráfico sobre el ortofotomapa de 0.2 mm, que a escala 1/1000 es 0.2 metros y se impone un valor máximo de 0.2 metros con un nivel de confianza del 95% en la distribución Normal (0, 1) circular, no pudiendo superar un error máximo de 0.3 metros.

A partir de lo anterior, de las diferencias entre los conjuntos de coordenadas y valores estadísticos de ellas se calcula el estándar EMAS.

	Dif X	Dif Y
nº de puntos	25	25
min (m)	-0.139	-0.132
max (m)	0.134	0.141
media (m)	-0.013	-0.031
mediana (m)	-0.048	-0.054
desv. Est (m)	0.081	0.076
e.m.c (m)	0.080	0.081
percentil	0.132	0.121

Tabla 31. Valores estadísticos de la muestra

En la tabla se ve que desviación típica o estándar supera la media en las dos componentes, esto da a entender que pueden existir algunos errores aleatorios y sistemáticos, también en la muestra hay máximos y mínimos tanto en X e Y rondando +/- 0.14 metros.

Se aplica el test sobre la media para los sistemáticos, y se ve si lo supera:

	Dif X	Dif Y
nº de puntos	25	25
media (m)	-0.013	-0.031
desv.est (m)	0.081	0.076
T	-0.794	-2.064
Tcrítica	2.391	

Tabla 32. Estadísticos para ver si hay errores sistemáticos

Con un nivel de significación del 0.05, tx supera el test, por tanto en la componente X no hay sistemáticos.

Con un nivel de significación del 0.05, ty supera el test, por tanto en la componente Y no hay sistemáticos, aunque el valor se acerca mucho al valor crítico por lo que las coordenadas Y presentan una tendencia con respecto a las coordenadas Y del control. Ello se puede deber a la influencia del operador a la hora de seleccionar los puntos o a que haya un mínimo

desplazamiento en Y entre ambos conjuntos de datos, por tanto la diferencia en muchos casos tiende a ir en la misma dirección.

Se aplica el test sobre la varianza del error y para ver si lo supera:

	Dif X	Dif Y
nº de puntos	25	25
Valor máx (m)	0.134	0.141
desv.est (m)	0.081	0.076
X <sup>2</sup>	23.340	20.845
X <sup>2</sup> crítica	36.415	

Tabla 33. Estadísticos para ver si el error aleatorio es aceptable

Con un nivel de significación de 0.05  $X^2_x$  y  $X^2_y$  superan el test.

Las componentes X e Y superan el test de errores aleatorios, lo que indica que la distribución de ellos es Normal, atendiendo a la campana de Gauss. Los errores se encuentran dentro de los límites máximos y en relación a los estadísticos calculados, como la desviación estándar, se puede ver que hay una distribución de los errores homogénea, por tanto, se cumple la verificación EMAS.

### Estándar NSSDA

Partiendo de que se cumplen las condiciones de aleatoriedad, normalidad, que no hay valores atípicos.

	X	Y
mediana	-0.048	-0.054
n <sub>1</sub>	12	12
n <sub>2</sub>	13	13
R	16	14
μ <sub>R</sub>	13.48	13.48
σ <sub>R</sub> <sup>2</sup>	5.97	5.97
Z <sub>R</sub>	1.03	0.21
Z <sub>1-α/2</sub>	1.96	1.96
¿Aleatorio?	SÍ	SÍ

	X	Y
n	25	25
media	-0.013	-0.031
desviación	0.079	0.075
K	3	3
Lim inf	-0.250	-0.255
Lim sup	0.224	0.192

Tabla 34. Izquierda comprobando la aleatoriedad de los datos y derecha que no hay atípicos

Este test analiza la componente horizontal (X e Y conjuntamente), da un índice de calidad posicional pero sin decir si el producto, en base a ese valor, es aceptado o rechazado y a partir del error medio cuadrático en ambas componentes se obtiene el valor NSSDA horizontal:

	Dif X	Dif Y
nº de puntos	25	25
e.m.c (m)	0.080	0.081
NSSDAh (m)	0.197	

Tabla 35. Estándar NSSDAh

Todos los puntos superan el test NSSDAh al 95% de confianza.

Por tanto, el control de calidad efectuado a la ortoimagen generada a partir del MDS LiDAR es favorable, en vista al resultado, a los errores medio cuadráticos en X e Y.

Ya que se trata de una ortoimagen a E1K y errores de 0.2 metros o menores no se aprecian porque la mínima unidad cartografiada es 0.2 metros, que en el plano equivalen a 0.2 milímetros.

Además la calidad posicional que se ha obtenido con el test NSSDAh con un nivel de confianza del 95% de 0.197 metros a E1K, no habiendo ningún punto del test que sobrepase dicho valor y por tanto la calidad posicional de la ortoimagen es buena y entra dentro de los estándares de calidad.

### 6.3. Creación del Ortofotomapa

Pasados los test de calidad se procede a realizar el ortofotomapa final del barrio de Ambroz, perteneciente a la población de Vicálvaro.

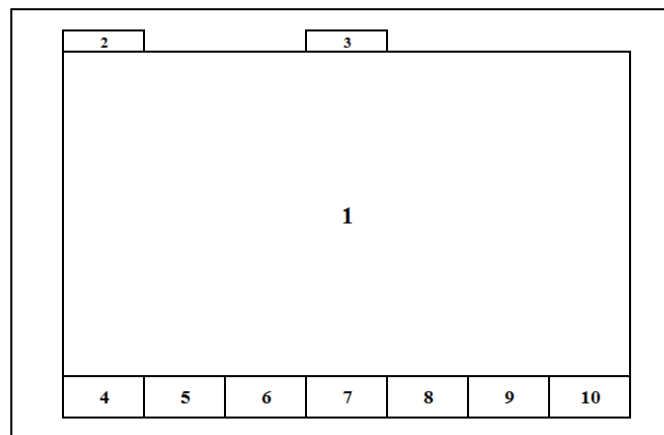


Figura 45. Esquema de distribución del ortofotomapa

El ortofotomapa se ha realizado sobre un formato A0 (841x1189mm), en su impresión se han usado 4 tintas CMYK (cián, magenta, amarillo y negro), conocida como impresión en cuatricomía que permite representar una gama más amplia de colores que el modelo RGB.

Se ha utilizado papel estucado que está recubierto por un polímero, en este caso brillante, para que los colores se vean de forma nítida y contrastada, el gramaje es de 150g, para que sea un papel consistente.

La resolución tanto para el texto, como el mapa y las imágenes es de 300 ppp (píxeles por pulgada), la zona útil utilizada es de 780x1060mm y se compone de 10 partes bien diferenciadas (Figura 46), están son:

**1:** Ortofotomapa a escala 1/1000, la región representada se encuentra entre las coordenadas ETRS87-UTM30, 447500 a 448500 en X y 4472800 a 4473400 en Y, porque es la zona de interés por la variedad de espacios, donde contrastan zonas de edificaciones, con vegetación y descampados, tiene unas dimensiones sobre el papel de 600x1000 mm.

En los laterales, izquierdo e inferior posee una cuadrícula con coordenadas ETRS89-UTM30, espaciada cada 100 metros en X e Y. Se han incluido las calles y lugares de interés (con un tipo de letra Ms Shell Dlg 2, estilo Bold y tamaño 8) extraídos del servidor de mapas del Excm Ayuntamiento de Madrid: [http://www-2.munimadrid.es/urbanismo\\_inter/visualizador/index\\_inter.jsp?mapa=cartobase](http://www-2.munimadrid.es/urbanismo_inter/visualizador/index_inter.jsp?mapa=cartobase)

**2:** Denominación del producto y escala, tipo de letra Ms Shell Dlg 2, estilo Bold y tamaño 20.

**3:** Zona objeto del proyecto, tipo de letra Ms Shell Dlg 2, estilo Bold y tamaño 36.

**4:** Descripción de las fases de trabajo llevado a cabo hasta la obtención del ortofotomapa y del control de calidad posicional realizado sobre el producto. Tipo de letra Ms Shell Dlg 2, estilo Normal y tamaño 10.

**5:** Representación en 3D del modelo digital de superficie de la zona, obtenido a partir del tratamiento de los datos capturados por técnicas láser LiDAR.

**6:** Barra de escala a E: 1/1000, parte derecha dividida en tres partes y el segmento izquierdo dividido en cuatro partes. En la parte inferior se incluye información sobre el sistema

de referencia, proyección y sus características en la zona, huso, declinación magnética y representación gráfica indicando la dirección del norte magnético, geográfico y de la cuadrícula. Tipo de letra Ms Shell Dlg 2, estilo Normal y tamaño 6.

**7:** Representación del ámbito en el que se encuentra la zona, tiene unas dimensiones sobre el papel de 60x85 mm.

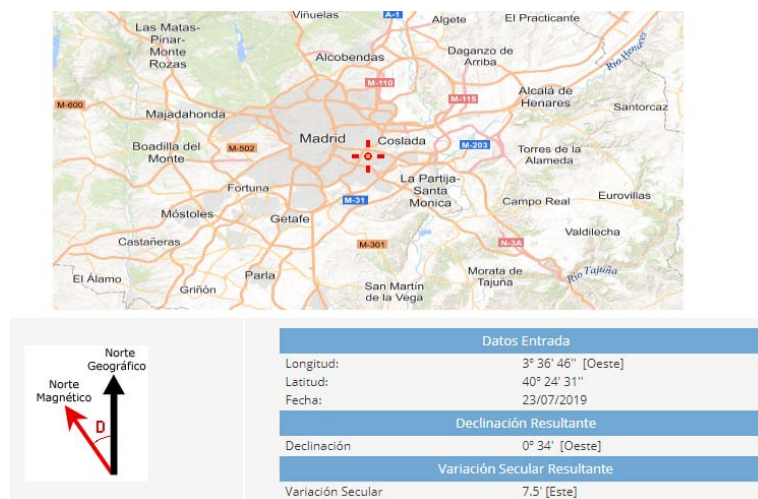
**8:** Situación de la zona dentro de las hojas a escala 1/1000 de la Cartografía Urbana del Ayuntamiento de Madrid. Tiene unas dimensiones sobre el papel de 37.5x50 mm.

**9:** Listado de las coordenadas ETRS89-UTM30 y geográficas, de las esquinas del ortofotomapa. Tipo de letra Ms Shell Dlg 2, estilo Normal y tamaño 6.

**10:** Universidad (incluido el escudo en la parte superior derecha) y Departamento, Autor, Tutor y Título del Proyecto Fin de Grado. Tipo de letra Ms Shell Dlg 2, estilo Normal y tamaño 8.

La declinación se ha obtenido a partir de la aplicación que tiene el IGN en su web:

<https://www.ign.es/web/ign/portal/gmt-declinacion-magnetica>



**Figura 46. Obtención de la declinación y su variación**

La convergencia de la cuadrícula UTM y el factor de escala se han obtenido por medio del PAG (Programa de Aplicaciones Geodésicas) del IGN, que se puede descargar en el siguiente enlace: <ftp://ftp.geodesia.ign.es/utilidades/PAG/>

## 7. CONCLUSIONES

En este apartado se presentan las conclusiones, atendiendo a los procesos llevados a cabo para llegar a los productos finales y a los resultados que se han obtenido. Se divide en los siguientes apartados.

- Conclusión general respecto a la validez del uso de MDS/MDT generados a partir de LiDAR.
  - Conclusiones respecto a la obtención de las nubes de puntos.
  - Conclusiones respecto a los resultados en la comparación de las nubes de puntos.
  - Conclusiones respecto a la producción y control de calidad del ortofotomapa.
- **Conclusión general**

En este Proyecto Fin de Grado se han llevado a cabo técnicas de filtrado y clasificación sobre los datos obtenidos por técnica láser LiDAR y de correlación automática sobre un bloque de imágenes, para la obtención de nubes de puntos que posteriormente se han utilizado para la creación de los modelos digitales de superficie y del terreno, que son parte importante en el desarrollo de diversos productos y como base en diversidad de aplicaciones implementadas, en las ciudades inteligentes (Smart cities).

Comparando ambas técnicas, se ha llegado a la conclusión de que la generación de MDS/MDT a partir de una nube de puntos LiDAR presenta varias ventajas con respecto al uso de nubes de puntos obtenidas por correlación automática.

Las ventajas que presenta la técnica LiDAR son:

Se obtiene una precisión en planimetría de 20 cm y en Z de 15 cm.

LiDAR puede obtener para cada pulso varios rebotes, el primero referido a la parte más alta, por ejemplo de un árbol, y el último, si el rayo no se disipa, referido al terreno. Esta característica da la posibilidad de obtener puntos pertenecientes al terreno que por técnicas fotogramétrica aplicadas a las imágenes, no son posibles. Por tanto la generación de MDT en zonas boscosas con datos LiDAR da soluciones más coherentes con la realidad.

Tanto a las imágenes y trayectoria de un bloque de imágenes fotogramétrico, como LiDAR, se le han de calcular la orientación absoluta para referir las imágenes, en un caso, y la nube de puntos en el otro, al sistema de referencia del proyecto. A partir de ahí, la obtención de los Modelos a partir de la nube LiDAR es más rápida y directa, “solo” hay que filtrar y clasificar la nube, mientras que el bloque de imágenes se tiene que someter a técnicas de correlación automática y una posterior edición.

Por otra parte, el sensor ALS es un sensor activo y la toma de datos se puede realizar de día, de noche e con nubosidad alta. Para la toma de imágenes si influye la nubosidad alta y la altura a la que se encuentre el sol, ya que según el estado de ambos parámetros se capturarán imágenes con más o menos sombras, con lo que ello conlleva a la hora de realizar la correlación.

La mejor metodología es combinar la información procedente de LiDAR, que da una buena precisión geométrica, y de la captura de imágenes aéreas, que proporcionan información en las bandas visibles e infrarroja y buena información métrica. Además, la combinación de ambas tecnologías, reduce el control terrestre, agilizan o eliminan la fase de aerotriangulación, reducen el tiempo de ejecución, el coste y el número de imágenes.

En los siguientes apartados se explican de manera objetiva las conclusiones a las que se ha llegado.

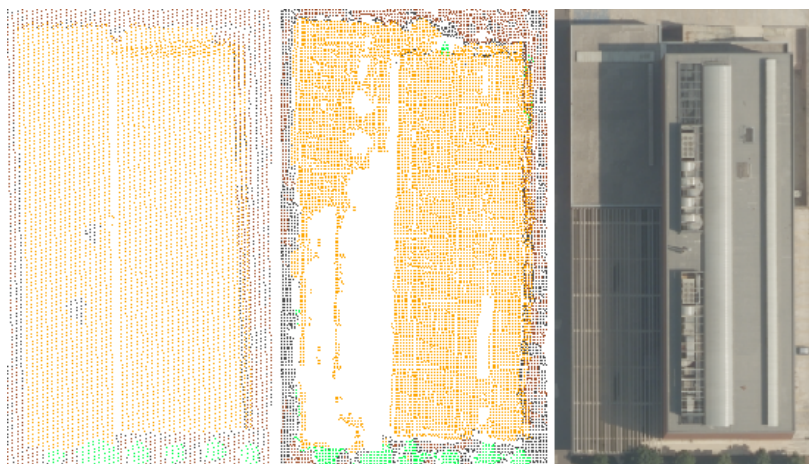
**- Obtención de las nubes de puntos por ambas técnicas.**

Las coordenadas en el sistema de referencia requerido de la nube de puntos LiDAR se obtiene a partir del procesado de los datos del sistema GPS/INS, junto con un conjunto de estaciones terrestres y junto con la información capturada por el sensor ALS.

Por otra parte, la obtención de los parámetros de orientación externa (POE) de cada imagen que compone el bloque fotogramétrico, se realiza de la misma manera que para la nube de puntos LiDAR. Pero en este caso a las imágenes se les debe de aplicar un proceso posterior de correlación automática para obtener la nube de puntos.

La correlación automática se ve afectada por las zonas de sombra, por zonas en las que los niveles digitales sean homogéneos, como pueden ser monocultivos, por cambios de radiometría entre el nivel digital de un objeto en diferentes imágenes. Dando lugar a errores, a

espacios sin ningún punto medido y a la definición irregular de las formas de los objetos (Figura 47).



**Figura 47. Puntos LiDAR (izq), obtenidos por correlación de imágenes (centro), imagen (der).**

Por tanto, se puede concluir que el uso de una nube de puntos LiDAR, con unas características, paso de malla, etc, acordes a lo que se quiera ejecutar, es ideal para generar modelos porque definen mejor los objetos, sus formas y en definitiva la realidad de la zona.

- **Clasificación**

Las nubes de puntos obtenidas por ambas técnicas pueden ser clasificadas tanto por métodos de clasificación y filtrado como por medio de las herramientas disponibles en SOCET SET.

La diferencia radica en que los puntos LiDAR poseen características como intensidad y número de eco, que se pueden utilizar como parámetros en la clasificación de los diferentes elementos que componen la zona. Se puede filtrar el primer eco y obtener el MDS directamente, evidentemente editando errores groseros. Y utilizar el último eco para la generación de MDT.

Por otra parte, las imágenes poseen IR próximo, muy útil en el filtrado de la vegetación.

En conclusión, ambos conjuntos de datos poseen características que permiten llevar a cabo el filtrado y clasificación de la vegetación, edificios y terreno. Las nubes de puntos LiDAR tienen la ventaja de que se pueden clasificar y filtrar a partir de sus ecos y de obtener MDT más acordes a la realidad, en zonas abruptas, de arbolado y vegetación densa.

- **Generación de los Modelos Digitales**

Para la obtención de los Modelos se seleccionan las clases que los van a determinar, el MDT se genera a partir de la clase terreno y el MDS se genera con todas las clases, excepto la clase ruido.

A los modelos se les debe imponer un paso de malla y una estructura determinadas. La elección de la estructura TIN (red de triángulos irregulares) es debido a que se adapta mejor al terreno que una estructura GRID, donde la elevación se le asigna a un área o píxel por lo que no representa de forma idónea la realidad.

- **Comparativa entre puntos pertenecientes a los modelos.**

La información geográfica evaluada es dos conjuntos de puntos obtenidos mediante técnicas láser LiDAR y por correlación automática sobre un bloque de imágenes, los errores groseros se han eliminado para realizar la comparativa.

Con el estándar NMAS se comprueba que la diferencia en el 10% de los puntos entre ambos conjuntos de datos no supere 0.5 metros, que es el error máximo admitido porque se va a generar un ortofotomapa a escala 1/1000 con equidistancia entre curvas de 1 m.

Entre el intervalo de +/- 0.5 m hay 3.665.515 puntos, más del 99.9%, por tanto se supera el test NMAS.

En el test EMAS se detectan errores sistemáticos entre ambos conjuntos de datos en la coordenada Z. Se debe a las diferentes precisiones que se obtienen por ambas técnicas y al método de captura, por un lado LiDAR mide la altura de forma directa mediante láser y por otro, la altura se obtiene tras aplicar metodologías fotogramétricas sobre el bloque de imágenes y, por tanto, en base al resultado obtenido del test de errores sistemáticos, ocurre que la mayor parte de los puntos pertenecientes a la nube de puntos de un conjunto esté por encima de la nube del otro o viceversa.

En cuanto a la aleatoriedad de las muestras, el resultado indica los errores presentan una distribución Normal, es decir, tienen una distribución conforme a la campana de Gauss.

La exactitud obtenida en el test NSSDA al 95% de confianza para la altimetría es de 0.365 m, por tanto la mayoría de los puntos comparados tienen diferencias inferiores a ese valor, aunque hay un porcentaje de ellos que lo supera y se debe a las diferentes metodologías para la obtención de ambos conjuntos de puntos, a sus precisiones asociadas y en cierta medida, al método de comparación utilizado, que relaciona puntos que estén dentro de un radio inferior a 0.5 metros.

En base a los resultados obtenidos ambos conjuntos son válidos para la realización de Modelos Digitales y productos derivados, en todo caso, la nube de puntos LiDAR presenta coordenadas Z más precisas y un paso de malla de 0.25 m y homogéneo, por lo que es la mejor opción a la hora de generar Modelos.

– **Producción de ortoimágenes y control de calidad**

• **Calidad posicional**

Se ha analizado una muestra de 25 puntos en las coordenadas X e Y, las diferencias máximas 0.134 m y 0.141 m, respectivamente, no superando ninguna de las componentes los 0.2 m establecidos a partir del error gráfico máximo de 0.2 y la escala del producto 1/1000.

Por lo tanto ningún punto ha sido desechado del test por la existencia de errores groseros.

La desviación estándar y el e.m.c rondan los 0.080 m en ambas componentes, por tanto no superan el error máximo tolerable y se cumple el NMAS.

En los resultados obtenidos en el EMAS no se detectan errores sistemáticos para ninguna de las componentes, pero sí que se acerca al valor crítico la componente Y, esto se puede deber a la influencia del operador a la hora de seleccionar los puntos o a que haya un mínimo desplazamiento en Y entre el producto de control y la ortoimagen, por eso la diferencia en muchos casos tiende a ir en la misma dirección.

En cuanto a la aleatoriedad de la muestra, no hay errores casuales y el resultado indica que los errores se distribuyen atendiendo a una distribución Normal.

La exactitud obtenida en el test NSSDA al 95% de confianza para planimetría es de 0.197 m, quiere decir que todos los puntos presentan una diferencia inferior a ese valor y el producto cumple con el control establecido, ya que al 95% de confianza ningún punto supera el error gráfico máximo de 0.2 m.

Los error medio cuadrático medio en planimetría está en 0.114 m, por tanto se pueden generar ortoimágenes a escala 1/1000 con un GSD de entre 10-20 cm, a partir del vuelo con GSD de 9 cm.

- **Calidad visual**

Repasando las ortofotos obtenidas a partir de los MDS obtenidos por ambas técnicas, se ha visto que aparecen pequeños arrastres en los elementos elevados de la ortoimagen. Estos son más acentuados en la ortoimagen generada a partir del MDS obtenido a partir del tratamiento de la nube de puntos obtenida por correlación de imágenes.

Esto se debe a que el Modelo Digital de Superficie tiene pequeños errores locales, debidos a los factores que influyen en el proceso de correlación automática para la obtención de la nube de puntos, como: oclusiones, diferente radiometría entre imágenes, zonas con niveles digitales homogéneos, sombras, etc.

Los errores en el modelo se transmiten a la ortoimagen en el proceso de rectificación diferencial y por tanto, la imagen se deforma para acoplarse al modelo, apareciendo, por ejemplo, aristas de edificios deformadas.

Por tanto, los Modelos obtenidos a partir de la nube de puntos LiDAR representan mejor las formas, como se aprecia en la Figura 48, donde la imagen derecha pertenece a la ortoimagen generada con el MDS obtenido a partir de la nube de puntos LiDAR y la izquierda a la generada con el MDS obtenido con la nube de puntos extraída por correlación automática de las imágenes.



**Figura 48. Diferencia entre ortoimágenes generadas con distintos MDS**

En vista a los resultados comentados, la obtención de ortoimágenes a partir de los fotogramas de un vuelo fotogramétrico y el modelo digital de superficie generado con datos obtenidos por técnicas LiDAR es la mejor opción para generar el producto.

Por otra parte, utilizando MDT generados por cualquiera de ambas técnicas el resultado es similar, teniendo un paso de malla adecuado a la escala del producto que se quiera obtener, para este caso un paso de malla de entre 0.25 m y 0.5 m es suficiente. Los edificios y objetos no pertenecientes al terreno van a estar influenciados por el desplazamiento debido al relieve y se van a proyectar de la misma manera tanto en la ortoimagen a partir del MDS obtenido con puntos derivados de la correlación automática de imágenes, como los obtenidos del tratamiento de la nube LiDAR.

Para finalizar, debo decir que llevar a cabo este trabajo me ha enriquecido tanto académica como personalmente, he aprendido y afianzado conceptos sobre metodologías fotogramétricas y técnicas LiDAR, desde la captura de los datos en bruto hasta la obtención de los modelos digitales, ortoimágenes y demás productos derivados, así como las ventajas e inconvenientes de las técnicas empleadas.

Durante este tiempo frente a las diferentes problemáticas aparecidas en la consecución del proyecto, además de la ayuda importante de mi tutor, he tenido que buscar información por mi cuenta, leerme manuales sobre el software utilizado, artículos, etc... todo esto me ha permitido desarrollarme en el trabajo autónomo y en la búsqueda de soluciones correctas a los problemas planteados.

## Bibliografía

Álvarez, M.; Miranda, M.; Raposo, J. F. y Bello, A. B. (2018). Metodología de Generación de Modelos Virtuales Urbanos 3D para ciudades inteligentes. *Informes de la construcción, Vol. 70*.

Ariza, F. J. y García, J. L. (2017). *Evaluación de la calidad de la información geográfica*. Jaén: Universidad de Jaén.

BAE SYSTEMS. (2011). *SOCET SET User's Manual*. (Version 5.6).

Delgado, J. y Pérez, J. L. (2016). *Temas 7 y 8 Fotogrametría y Teledetección III*. Jaén: Universidad de Jaén.

Hug, C.; Krzystek, P. y Fuchs, W. (2004). Advanced LiDAR data processing with LASTools. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/228347125\\_Advanced\\_lidar\\_data\\_processing\\_with\\_LasTools](https://www.researchgate.net/publication/228347125_Advanced_lidar_data_processing_with_LasTools)

Li, D.; Shan, J. Zhenfeng, S.; Zhou, X. y Yao, Y. (2013). Geomatics for Smart Cities – Concept, Key Techniques, and Applications. *Geo-spatial Information Science, Vol. 16*, 13-24.

Pereira Uzal, J. M. (2013). Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de structure from motion. *Ph investigación, n° 1*, 77-88.

Pérez, J. A. (2001). *Apuntes de Fotogrametría II*. Mérida: Universidad de Extremadura.

Pérez, J. A. (2001). *Apuntes de Fotogrametría III*. Mérida: Universidad de Extremadura.

Podobnikar, T. y Vrecko, A. (2012). Digital Elevation Model from the Best Result of Different Filtering of a LiDAR Point Cloud. *Transactions in GIS, 16 (5)*, 603-617.

Quirós, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*. Cáceres: Universidad de Extremadura.

Walker, S. (2007). New Features in SOCET SET. *Photogrametric week, 07*, 35-38.

Rodríguez, R.; Álvarez, M.; Miranda, M.; Díez, A.; Papi, F y Rodríguez, P. (2013). Generación de modelos urbanos tridimensionales. *Informes de la construcción, Vol. 65*, 229-240.

Santos, L. J. (2015). La tecnología LiDAR en el procedimiento de regularización catastral. Resultado de su validación. *CT (catastro)*, 83, 31-51.

Virgos, L. I. y García, F. (2015). La ortofotografía y la Cartografía catastral. *CT (catastro)*, 83, 7-31.

Wachowicz, M. (2013). *New Frontiers for Geomatics*. Canada: Recuperado de: <https://www.gim-international.com/content/article/new-frontiers-for-geomatics>